



**Masarykova univerzita
Přírodovědecká fakulta**



**VYUŽITÍ METOD GEOMETRICKÉ
MORFOMETRIE V BIOLOGII
ČLOVĚKA A PŘIDRUŽENÝCH
OBORECH**

HABILITAČNÍ PRÁCE

Petra Urbanová

Brno 2010

„For the harmony of the world is made manifest in Form and Number, and the heart and soul and all the poetry of Natural Philosophy are embodied in the concept of mathematical beauty.“

D'Arcy Thompson

OBSAH

PŘEDMLUVA		7
ABSTRACT		9
KAPITOLA 1	TVAR A ANALÝZA TVARU	13
	<i>Tvar</i>	13
	<i>Geometrická morfometrie</i>	17
	<i>Přípravná fáze analýzy tvaru</i>	18
	<i> Záznam vstupních dat</i>	19
	<i>Analýza tvaru</i>	22
	<i>Statistická analýza tvarových proměnných</i>	34
	<i>Alternativní přístupy k analýze tvaru</i>	39
	<i>Vizualizace a grafické výstupy</i>	41
KAPITOLA 2	ANALÝZA TVARU KOSTĚNÉHO OKRAJE OČNICE	51
KAPITOLA 3	ANALÝZA TVARU MOZKOVNY JIHOAMERICKÝCH MUMIÍ Z NÁPRSTKOVA MUZEA PRAHA	67
KAPITOLA 4	URČENÍ POPULAČNÍ AFINITY METODAMI GEOMETRICKÉ A TRADIČNÍ MORFOMETRIE V KRIMINALISTICE	
	<i>Případ nálezu mumifikované lidské hlavy</i>	85
KAPITOLA 5	ANALÝZA TVARU STOP ZVÍŘAT NA STŘEDOVĚKÝCH CIHLÁCH	101
KAPITOLA 6	ANALÝZA TVAROVÉ PODOBNOSTI DROBNÉ STŘEDOVĚKÉ PLASTIKY POMOCÍ 3-D MODELŮ	115
KAPITOLA 7	KVANTITATIVNÍ POPIS TVARU ŘÍMSKÝCH NÁDOB POMOCÍ METOD GEOMETRICKÉ MORFOMETRIE	125
KAPITOLA 8	VYUŽITÍ METOD GEOMETRICKÉ MORFOMETRIE V PROCESU IDENTIFIKACI NEDOSPĚLÝCH JEDINCŮ PODLE OBLIČEJE	141
	<i>Appendix</i>	163

PŘEDMLUVA

Tvar, jedna ze základních vlastností pevné hmoty, nás provází na každém kroku. Při studiu biologické rozmanitosti organismů, orgánů či tělesných pozůstatků je na základě tvaru vysvětlována funkce, kvalita, chronologický vývoj, interakce s okolím nebo příslušnost ke skupině. Tyto souvislosti řadí hodnocení tvaru a tvarové variability mezi prioritní kroky v biologickém výzkumu. Předložená habilitační práce tvoří kompilaci studií biologických a kulturních souvislostí života člověka, jejichž společným jmenovatelem je použití pokročilých metod analýzy tvaru, které se v biologických oborech ustavily pod názvem geometrická morfometrie.

Úvodní, teoretická kapitola této práce seznamuje s podstatou kvantitativní analýzy tvaru, ve které jsou vysvětleny základy nejběžněji používaných postupů a technik. Geometrická morfometrie je vystavěna na teorii, která vyžaduje, alespoň z pohledu biologa, hlubší znalosti matematických a statistických souvislostí. Text sumarizuje hlavní oblasti geometrické morfometrie do podoby, která, jak doufám, bude srozumitelná pro biologicky i humanitně zaměřené čtenáře a která usnadní pochopení navazujících částí práce.

Po teoretickém úvodu následují samostatně stojící kapitoly, které nabízejí vybrané příklady analýzy tvaru při výzkumu biologické a kulturní podstaty člověka. Příklady byly zvoleny tak, aby pokryly široký rozsah problematiky a naznačily univerzálnost, s jakou lze popsané metody aplikovat. V této podobě lze na práci pohlížet jako na ucelenou publikaci vypovídající o současném stavu poznání v oblasti kvantitativní analýzy tvaru v biologii na straně jedné a metodickou příručku nebo zdroj inspirace na straně druhé.

Ukázkové příklady byly řešeny v kontextu rozsáhlejších studií, kde analýza tvaru působila pouze jako jeden z prostředků, jak se ke studovanému problému postavit. Původní výsledky z těchto analýz byly do předložené habilitační práce upraveny, doplněny nebo revidovány tak, aby spolu s ostatními kapitolami tvořily konzistentní publikaci. Podobně jako antropologie tak se i geometrická morfometrie proplétá různými obory. Z tohoto důvodu se i každá z kapitol dotýká rozličných hraničních podoborů a přidružených disciplín, se kterými antropologové přicházejí do kontaktu. Kosterní antropologie je zastoupena hned v první kapitole (*Analýza tvaru kostěného okraje očníce*) zabývající se, jak název napovídá, popisem tvarové variability jednoho ze styčných znaků lebky člověka, okraje očníce. Kapitola naznačuje, jakým směrem by se mohl ubírat formalizovaný popis trojrozměrných anatomických struktur, které byly ještě do nedávna trivializovány do rovinných útvarů. Následující dvě studie se týkají studia mumifikovaných lidských nálezů. První z nich (*Analýza tvaru mozkovny jihoamerických mumii z Náprstkova muzea Praha*) pokrývá problematiku paleopatologie a tafonomie a diskutuje výzkum mumifikovaných těl a umělých deformací lebek metodami trojrozměrného modelování a analýzy obrysů. Druhá studie (*Určení populační afinity metodami geometrické a tradiční morfometrie v kriminalistice. Případ nálezu mumifikované lidské hlavy*), ačkoliv je podobného metodického zaměření, se dotýká využití trojrozměrných popisných a analytických metod v současné forenzní praxi. Na tyto studie navazuje blok tří kapitol (*Analýza tvaru stop zvířat na středověkých cihlách, Analýza tvarové podobnosti drobné středověké plastiky pomocí 3-D modelů, Kvantitativní popis tvaru římských nádob pomocí metod geometrické morfometrie*), který je odklonem od čistě biologického zaměření ke studiím, ve kterých se prolíná spolupráce antropologie s humanitními obory. Celou práci uzavírá pilotní studie zabývající se ontogenetickým vývojem morfologie dětských obličejů u současné české populace (*Využití metod geometrické morfometrie v identifikaci nedospělých jedinců podle obličeje*), jež poukazuje na odlišnosti studia morfometrických dat s časovou posloupností a současně zkoumá teoretické předpoklady zamýšlené implementace poznatků geometrické morfometrie do procesu fotokomparace nedospělých jedinců ve forenzní antropologii.

Ačkoliv text této habilitační práce i všechny prezentované výstupy jsou výsledkem samostatné vědeckovýzkumné činnosti, u některých z prezentovaných studií byla analýza tvaru pouze jedním z prvků problematiky řešené v širším kontextu kolektivem více autorů. Jmenovitě jsou to:

RNDr. Hana Eliášová, Ph.D – Kriminalistický ústav Praha Policie České republiky

Mgr. Monika Baďurová – Náprstkovo muzeum Praha

doc. RNDr. Miroslav Králík, Ph.D. – Ústav antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity

Mgr. Tomáš Mořkovský – Ústav antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity

Mgr. Martin Čuta – Ústav antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity

Mgr. Petr Vachůt – Muzeum města Brna

PhDr. Zdena Měchurová, CSc. Moravské zemské muzeum

Mgr. Dagmar Vachůtová, Ph.D. – Ústav archeologie a muzeologie, Filozofická fakulta Masarykovy univerzity

Za poznámky, rady a přínos, který měli výše zmínění pro realizaci této habilitační práce, jim patří mé upřímné poděkování.

V Brně dne 17.12.2010

Petra Urbanová

ABSTRACT

Applications of Geometric Morphometrics in Human Biology and Associated Disciplines

The shape represents one of the most essential features to be observed and recognized in biological sciences. Daily we collect a large amount of information solely by observing morphology of objects that surround us. In the everyday life, the information is mostly of a subjective qualitative nature. Yet, dealing with biological or/and cultural diversity of mankind anthropologists are frequently put into positions wherein an accurate and reliable assessment or a precise description of shape is required and is crucial in the execution of anthropological research.

The most recent development in quantitative shape analysis has been linked to a trend which nowadays is customarily addressed as geometric morphometrics. Geometric morphometrics represents a set of descriptive, analytical and exploratory tools which deal with shape and shape variation in a manner that fulfil effectively requirements for combining techniques from geometry, computer graphics and biometrics. Despite emerging from technological novelties of last two decades the theory of morphometrics has been built upon a long tradition of quantitative research in biological sciences traceable back to roots of modern biometrics and associated with names such as Francis Galton, Ronald Fisher, Karl Pearson, D'Arcy Thompson or further to Albrecht Dürer and Leonardo da Vinci. And to be absolutely honest about true origins of fundamental mathematical basics of the geometric morphometrics we must go back to the wisdom of Ancient Greeks and Egyptians.

This habilitation thesis follows the most recent development in the field of morphometrics as it presents a set of stand-alone anthropological studies accompanied by a theoretical background which deal with various subjects of human biology and sociocultural aspects of human life. As the field of anthropology itself, the geometric morphometrics transpires through a variety of biology or humanity-oriented applications. Following seven chapters combine both and thus demonstrate the wide range of applicability for modern anthropological research.

The Shape of the Human Orbital Rim using Elliptical Fourier Analysis

The shape of the orbital rim is one of essential craniofacial features which plays crucial role in face perception, recognition or personal identification and as a consequence continues to attract a large variety of researchers (e.g. skeletal or forensic anthropologists, anatomists, physicians, psychologists etc.). Despite being a focus since the rise of traditional anthropometrics, the three-dimensional nature of the orbital rim has not been satisfactorily quantified. The study presents an approach to numerically describe the within- and among-population shape variation of the orbital rim, its curviness and spatial orientation by using the elliptic Fourier analysis. The quantitative descriptive approach showed that specimen's population affinity and sex are two main factors responsible for shaping orbital rim. In contrast to what is generally considered to be a pattern of sex differences, the shape of frontally-viewed orbits failed to perform as a good sex predictor and cannot be recommended as a reliable trait in sexing human skeletal remains.

Shape Analysis of the Cranial Vault in Two South American Mummified Bodies from the Náprstek Museum Prague

Mummification and artificial cranial deformation are two of commonly recognized trans-cultural phenomena. Although independent in many cases both can co-occur intentionally or unintentionally in the same individual. The study represents a challenging case of two mummified human bodies, originally from Chile, nowadays showpieces at the Naprstek Museum, which were bought for an anthropological CT-assisted examination. In the course of the postprocessing it was pointed out that the cranial morphology differed from

normally shaped crania to an extent which raised questions of an intentional alteration during childhood. Being rather mild or transitional cases of deformation a simple visual examination could not confirm one way or the other. Therefore, in order to accept or reject the hypothesis of intentional cranial deformation mummies' cranial vaults were compared with a sample of normally shaped and intentionally modified crania using the elliptic Fourier analysis and sliding semilandmarks. Both methods showed that crania shared a pattern of deformation similar to the deformed cases and ought to be taken for an example of individuals with artificially altered cranial morphology.

Assessment of Population Affinity by Using Geometric and Traditional Morphometrics in Criminalistics. A Case of an Isolated Human Mummified Head

An implementation of the computed tomography-assisted reconstructions and three-dimensional virtual modeling into the field of forensic anthropology has brought novel impulses into a process of personal identification. Virtual models allow studying human remains non-invasively and indirectly detached from the physical reality. As far as mummified human remains are concerned, it allows studying soft tissues and underlying hard bony layers which is commonly known to embody morphological traits leading to individual's identity (e.g. facial morphology) without needs for an unnecessary destruction of the soft tissues. Herein reported case involved a mummified human head separated violently from the body. In the process of identification, the population affinity and sex was assessed based on the Generalized Procrustes Analysis combined with the multivariate statistics. The results were subsequently confronted with those attained via the traditional morphometrics and available software applications helpful in estimating biological profile in a forensic context.

Animal Tracks on Medieval Bricks

Studies of traces and tracks upon the surface of the utilitarian ceramics bring new insight into aspects of the everyday life in the craftsman suburban areas in the Middle Ages. A sample of medieval bricks was examined for a presence of animal tracks. The visual examination paired with more objective shape analysis identified animal tracks on bricks as those of domestic dogs and cats. Based on the thin-plate spline analysis combined with the relative warp analysis, the shape of tracks was compared with a sample of domestic and wild-living carnivores (genus *Felidae* and *Canidae*, e.g. wolf, fox, wild cat). The outcome supports the concept of medieval bricks being produced in a constant presence of domestic animals allowed to be running freely across freshly made products while bricks were being left to dry-off.

Magnitude of Similarity Expressed in Facial Components of Medieval Figurines

Medieval figurines are known to demonstrate striking resemblance as far as their facial morphology is concerned. It has been hypothesized that many examples could be products of an identical cast used in the process of making. Traditionally, confirming or rejecting a hypothesis of this kind involves a simple visual observation or comparative survey. In the present study, the issue was addressed by carrying out a quantitative shape analysis. The facial morphology of 6 medieval anthropomorphic figurines was captured by using 3D laser scanning technology and cross section profiles originated in intersections between a model and transversal and mid-sagittal cutting planes were studied by means of semilandmark-based descriptive and analytical tools and multivariate statistics..

Quantitative Descriptive Approaches Applied on the Shape of Roman Ceramic Vessels

In archeology, the advanced quantitative shape description has been generally neglected in favor of more traditional, typological or measurement-based methods. This study addresses the shape of archeological items, namely roman ceramic vessels uncovered in Kostelec na Hané site, in a complex, objective and repeatable manner. The performance of four different approaches incorporating outline-based and semiland-based approaches was applied on a sample of 67 digitized photographs and drawings. Based on the observed performance applicability and recommendations of studied methods for archeological ceramics are discussed.

Variations in the Facial Morphology of Sub-Adult Individuals and Its Application in the Process of Personal Identification in Forensic Anthropology

The human face possesses individually unique characteristics applicable in the course of personal identification in the field of forensics. Somatic traits, those of face included, nevertheless, undergoes age-related modifications which may interfere with the process of identification. The preliminary study focuses on age-dependent changes in those facial traits which are relevant in the process of photo-to-photo comparison applied on individuals of unequal ontogenetic stages. Based on a large sample of photo documentation originated in an extensive longitudinal study running in a time-span from the 1960s to 1980s and most recent human biology-orientated studies the intra and inter-individual variability in the shape of human faces was expressed via Procrustes distance and approached by permutation-based tests.

Kapitola 1

Tvar a analýza tvaru

TVAR

Tvar a velikost jsou dvě klíčové charakteristiky, na základě kterých rozpoznáváme a identifikujeme objekty rozmanité podstaty. Už René Descartes (1596-1650) poukazoval na skutečnost, že lidská těla se shodují svým složením, proto jakékoliv rozdíly lze vyjádřit pouze a jedině veličinami jako je velikost, tvar a pohyb tělních orgánů. Ačkoliv je tvar a velikost objektu obvykle vnímána uceleně, jejich podstata i vyjádření, tolik důležité v biologických vědách, jsou velmi odlišné. Velikost je obecně chápána jako důsledek proliferace buněk a růstu. Naopak koncepce vzniku tvaru je mnohem složitější. Podle Oxnarda (1980) existují tři základní mechanismy, kterými se ustavuje tvar biologického objektu. V první řadě je tvar výsledkem individuálního vývoje, nerovnoměrné rychlosti růstu jednotlivých částí organismu a jejich odlišného nástupu v průběhu ontogeneze. Do této kategorie náleží také interakce mezi velikostí a všemi důsledky, které větší velikost těla přináší (nárůst tělesné váhy, větší energetický výdej, respirační nároky apod.), a výsledným tvarem. Tento vztah obvykle označujeme jako růstová nebo ontogenetická alometrie.

Druhý mechanismus formování tvaru předpokládá, že tvar je výsledkem interakce mezi strukturou a funkcí. Jinými slovy, že tvar je produktem určitého chování organismu. Tato koncepce tvaru bere v úvahu také dlouhodobé mikroevoluční změny. Poslední třetí mechanismus předpokládá, že tvar je výsledkem postupných na sebe navazujících evolučních procesů.

Oddělení morfogeneze do konceptu tří složek je však zjednodušením skutečných procesů, které vedou k ustavení konkrétního tvaru, a pouze napomáhá rekonstruovat probíhající děje. Pozorovaná morfologie struktury obvykle není produktem jediného nezávislého děje, ale je dána celou skupinou samostatných i provázaných „příčin“. Toto pojetí nacházíme podle Goulda (1971) již u Aristotela, jež vysvětluje původ libovolné formy na příkladu, jak a proč vznikne dům. Dům byl postaven proto, aby v něm muž mohl žít se svou rodinou (*causa finalis*), ale také proto, že jej architekt vytvořil plány (*causa formalis*) a dělníci postavili z cihel (*causa efficiens*). Ve vztahu ke tvaru zahrnuje tato multifaktoriální interakce dějů všechny tři Oxnardovy mechanismy. Některé z probíhajících

Ukázkovým příkladem růstové alometrie je změna proporcí končetin slona v průběhu ontogeneze. Se zvětšující se velikostí těla narůstá tíha, kterou tělo slona působí na končetiny. Aby mohlo zvíře ustát svou narůstající váhu, musí ji rozprostřít na větší plochu. Důsledkem toho narůstá v průběhu ontogeneze slona šířka končetin rychleji než zbytek těla. Jiným příkladem je vznik sekundárních pohlavních znaků na lebce člověka. Pohlavní rozdíly obličejové části lebky jsou úzce spojeny s dýchací soustavou. Nárůst velikosti těla, především u mužů, vyvolává zvýšené nároky na oksylčení krve a ventilaci plic. Zvyšuje se kapacita plic a současně množství vzduchu proudícího do nosní a vedlejších nosních dutin. Pneumatizace lebky se zvyšuje a mění vnější morfologii lebky (Cobb 1940, Rosa, Bastir 2002).

dějů lze sledovat úspěšně, jiné mohou být skryté nebo ve svém účinku natolik nepatrné, že ani je nezachytí ani nejmodernější technologie.

Vedle rozdílné vývojové koncepce, se tvar a velikost objektu liší také podle prostředků, jakými jsou obě charakteristiky vyjádřeny. Z hlediska klasifikace vlastností objektů se na tvar můžeme dívat jako na *a priori* nemetrickou kvalitativní veličinu, jejíž formální vyjádření vyžaduje buď sémantický, ikonografický nebo geometrický konstrukt. Standardizované objektivní vyjádření tvaru a tvarové variability je základem pro správnou interpretaci struktury a pochopení dějů, které vedou k jeho vzniku. Neustrannost, přesnost a opakovatelnost jsou vlastnosti, které bychom měli mít na mysli při výběru popisné metodiky tvaru. Obrazový i slovní popis tvaru je vždy svázán se zkušenostmi a dovednostmi pozorovatele a proto vždy bojoval s tendencemi a subjektivními prvky, které badatel vědomě i nevědomě do popisu vnáší. Věda a umění jdou při pravdivém zachycení empirické reality nemyšlitelně ruku v ruce a nelze se divit tomu, že mnohé objevy a znalosti o biologické realitě byly učiněny a popsány předními umělci. Bylo to dáno zejména absencí technických prostředků záznamu tvaru, které máme k dispozici dnes (fotografie, videokamera, skenery). Jako příklad za všechny uvedme, že bez J. W. Goethe by nebylo moderní definice morfologie, Leonardo da Vinci a Albrecht Dürer přispěli k popisu anatomie lidského těla člověka a změn jeho proporcí v průběhu ontogeneze.

Ritterbush (1970) uvádí úsměvnou historku z konce 19. století ilustrující, do jaké míry může nedostatečně formalizovaný popis tvaru fosilií pozměnit konečnou interpretaci. V důsledku nekompletního grafického vyobrazení tvarové variability spirálovitých struktur nalezených v Severní Americe, jež poukazovaly pouze na ideálně tvarované nálezy, byly výlitky nor hlodavců, které nabývají rozličných tvarů, považovány po několik let za nový druh fosilních řas, které se působením přírodního výběru vyvinuly v dokonalou spirálu.

Kvantitativní vyjádření tvaru

Kvantitativní (číselné) vyjádření tvaru je úzce propojeno s vyjádřením prostoru. Velikost lze primárně klasifikovat jako skalární veličinu a je možné ji vyjádřit již v prostoru definovaném jednou proměnnou (délka, obsah, objem). Naopak tvar nabývá smyslu pouze u dvou a vícerozměrných objektů (ačkoliv ve fyzické realitě existují pouze dvourozměrné a trojrozměrné objekty, v matematickém pojetí lze objekt popsat nekonečným počtem proměnných zastupující osy vícerozměrného prostoru) a jednorozměrné objekty jako je bod nebo vektor nabývají nulového tvaru. V případě absence tvarových rozdílů lze velikost vyjádřit libovolnou proměnnou (vzdálenost, objem, povrch atd.). Způsob, jakým tvar vyjádříme souvisí mimo jiné s typem tvaru. Základní klasifikace rozeznává tvary geometrické a tvary organické. Jako organický označujeme tvar, který je nepravidelný, asymetrický a nelze jej zcela popsat jednoduchým matematickým výrazem. Zde patří většina tvarů, které nacházíme v přírodě. Podskupinou jsou tvary, které vztahujeme k živé přírodě neboli tvary biologické. Naopak mezi geometrické tvary, jak již vyplývá z názvu, patří pravidelné geometrické obrazy nebo tělesa. Obvykle se jedná o ideální tvary, jejichž primitivní (triviální) formy máme podle Platóna vrozené – trojúhelník, kružnice, čtverec, hranol aj. Pravidelné tvary se v přírodě nacházejí výjimečně. Příkladem takové pravidelnosti je tvar sněhové vločky, listy kapradí nebo javoru nebo schránky čeledi loděnkovitých. Takové geometrické tvary, které vykazují pravidelné tvary i jejich uspořádání na různých úrovních rozlišení se označují jako fraktály (Prossinger 2005).

Tvar vyjádřený jako kvantitativní veličina, nabývá smyslu až v prostoru nejméně dvou metrických proměnných, a je tudíž smysluplná i pro jednorozměrný objekt (např. bod nebo vektor) má nulový tvar.

Z pohledu geometrie je nejjednodušším tvarem spojnice tří bodů, které neleží na jedné přímce, tedy trojúhelník. Numerické vyjádření tvaru trojúhelníku, stejně jako ostatních pravidelných (primitivních) geometrických obrazců nebo těles, je pouze otázkou aplikace základních geometrických pravidel. Pokud však objekt nabývá nepravidelného tvaru, jak pozorujeme u většiny biologických objektů, pak kvantifikace tvaru nebo tvarových změn získává komplexnější podobu. Kvantifikace tvaru biologických objektů řeší otázku objektivnosti, přesnosti a spolehlivosti (i když možná ne zcela úplně) záznamu tvaru, na kterou se odvolává kaž-

dý biologických obor. Vedle toho otevírá další možnosti pro predikci, testování a skutečného srovnání dvou reálných tvarů nebo reálných a teoretických tvarů (Gould 1971).

Obecně si kvantifikaci tvaru můžeme představit jako převod vizuální informace o tvarové variabilitě do veličiny, která je číselná, kontinuální a která rozdílnému tvaru přiřadí rozdílnou hodnotu nebo hodnoty na číselné ose. Nejjednodušší způsob jak číselně vyjádřit rozdíly ve tvaru objektů je srovnání dvou a více standardizovaných lineárních vzdáleností nebo úhlů mezi nimi anebo použít jejich

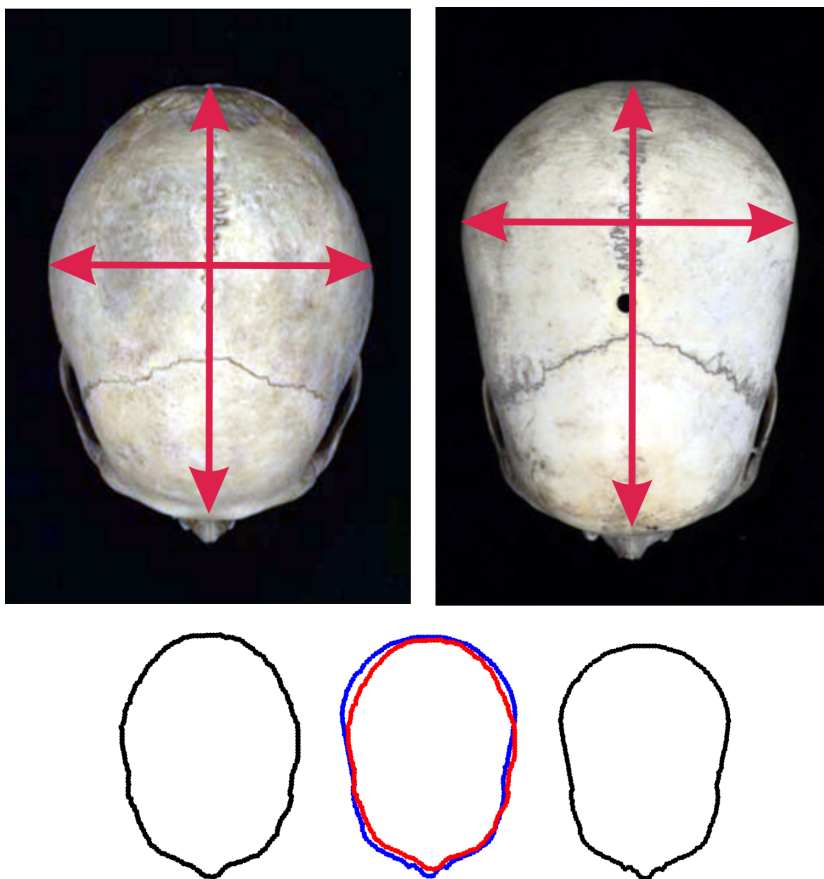
První matematický popis biologického tvaru, který vedl ke konkrétnímu biologickému zjištění, pochází z roku 1838, kdy byl tvar schránek mořských hlavonožců rodu *Nautilus* vyjádřen logaritmickou (rovnoúhlovou) spirálou (*spira mirabilis*, prvně popsanou již Descartem) a vztážen k růstu struktury a energii, jež musí organismus vynaložit k její stavbě (Ritterbush 1970). Nejvýznamnější zastánce použití matematiky v biologii byl D'Arcy Wentworth Thompson (1860-1948).

vzájemných kombinací do hodnot poměrů a indexů. Počátky těchto tvarových analýz, které dnes souhrnně označujeme pod hlavičkou **tradiční morfometrie** (také klasická morfometrie, konvenční morfometrie) (Malina *et al.* 2008), spadají do období na přelomu 19. a 20. století, kdy analytické a deskriptivní postupy biometrie byly v plném rozkvětu. O rozvoj tradiční morfometrie se zasloužily osobnosti jako Francis Galton, Karl Pearson, Ronald Aylmer Fisher. Tradiční morfometrie je na rozdíl od řady pokročilejších technik postupem velmi jednoduchým a prostým. Z pohledu studia živých organismů (např. antropometrie člověka) vystačíme s nezákladnějším měřícím vybavením, kterým je posuvné a dotykové měřidlo nebo úhломěr. Nelze se proto divit, že i na počátku 21. století je tradiční morfometrie stále základním kamenem studia tvarových rozdílů, který ustál i invazi nových pokročilých metod do přírodních věd v posledních dvou dekáдах. Na druhé straně je třeba si uvědomit, že technická nenáročnost těchto postupů má zákonitě svůj dopad na celistvost, s jakou je tvar numericky popsán.

Abstrakce tvaru do triviálního poměru nebo indexu u tradiční morfometrie je již řadu let předmětem ostře kritiky. Zelditchová a její kolegové (2004) shrnuli problematiku tradiční morfometrie z pohledu moderní analýzy tvaru do pěti bodů. Podle autorů jsou všechna tato úskalí natolik významná, že ani pohodlí spojené s jednoduchostí a nenáročností, kterou tradiční morfometrie poskytuje, není schopna vyvážit ztráty a metodické mezery.

Za první, tradiční morfometrie poskytuje dobrou představu o celkové velikosti objektu, ale informace o tvaru je zredukována na minimum. Dále dodávají, že v rámci tradičních postupů nelze nikdy úplně oddělit složku velikostní a složku tvarovou a zkoumat je odděleně nebo dát do vzájemné souvislosti. To znamená, že tradiční tvarové proměnné jsou vždy více méně závislé na jiném parametru, který určuje celkovou velikost objektu. Druhé úskalí tradičního vyjádření tvaru se týká silné závislosti měřených parametrů. Lineární rozměry jednoho objektu nebo struktury začínají v mnoha případech od společného počátku, což zákonitě vede k jejich silné korelaci. Přítomnost takové závislosti zasahuje do dalších kroků analýzy i výsledné interpretace. Třetí nedostatek souvisí s nejasnou homologií lineárních parametrů, jež jsou definovány body s nejasným vztahem k tvaru objektu. Pokud je, například, do srovnání zahrnuto více druhů organismů nebo jsou srovnávány objekty, u kterých došlo k významné strukturální změně, která pozměnila globální morfologii, pak rozměry definované s ohledem na hraniční nebo koncové body celé struktury ztrácí vzájemnou relevanci. Srovnání těchto rozměrů má své opodstatnění při studiu velikostních nikoliv však tvarových rozdílů. Jak bude dále vysvětleno, kritice biologické homologie mezi proměnnými se do určité míry nevyhnou ani moderní metody analýzy tvaru. Čtvrtý problém tradičních postupů se týká neschopnosti plně rozpoznat, kde leží podstata skutečné variability, pokud máme k dispozici pouze hodnotu vzdálenosti mezi dvěma krajními body měřených rozměrů. Lze argumentovat, že tento nedostatek je možné kompenzovat definováním nových rozměrů, které budou mít větší relevanci k testované hypotéze. Poslední argument, kterým konečný výčet nedostatků tradiční morfometrie doplníme, je dán konečným počtem parametrů, které je možné na objektu získat. Toto omezení buď souvisí s překážkami v reálném světě, které brání v získání některých rozměrů (anatomická komplexita organismu, komplikované rozměry, fragmentárnost objektů) anebo je tvar natolik komplexní a komplikovaný, že prosté rozměry nebo jejich indexy nejsou schopny

plně podchytit tvar v míře, která by byla pro dané účely dostačující. Řešení pro první část argumentu dnes nabízí přesun měření biologických objektů do virtuálního prostoru (Grosman *et al.* 2008). Využití virtuálního prostoru, který poskytuje nepřímé, neinvazivní a bezkontaktní studium vlastností objektu, se stalo natolik populární, že v antropologii dalo vzniknout novému směru – virtuální antropologie (Weber *et al.* 2000, Weber *et al.* 2001). Jedná se o podobor spojující v sobě prvky tradičních oblastí zájmu biologické antropologie s metodikou využívající výhradně počítačovou podporu, kvantitativní analýzu tvaru a trojrozměrnou vizualizaci biologických objektů.



Obr. 1. Schéma demonstrující jednu z hlavních nevýhod tradiční morfometrie, kdy je dvěma lebkám o různém tvaru v *norma verticalis* přiřazena stejná hodnota délkošířkového indexu. Pod fotografiemi jsou zobrazeny kontury lebek a jejich superpozice.

GEOMETRICKÁ MORFOMETRIE

V 80. letech minulého století zavál na poli morfometrie proud zcela nových myšlenek, které navázaly na předchozí ojedinělé pokusy využívající pokročilé geometrické techniky (Lu 1965, Lestrel, Brown 1976). V průběhu další dekády se zformoval zcela nový směr, který dnes označuje jako **geometrická morfometrie**. Podle Denise Slice (Slice 2007) je geometrická morfometrie skupina morfometrických metod, která uchovává kompletní informaci o vzájemném prostorovém uspořádání objektu a všech jeho částí v celém průběhu analýzy. Bližší vymezení pojmu specifikuje geometrickou morfometrii jako sérii postupů, které jsou zaměřeny na usnadnění převodu kvalitativní informace o tvaru objektu do kvantitativního vyjádření. Fred L. Booksteina, jeden ze zakladatelů geometrické morfometrie, chápe geometrickou morfometrii jako odvětví statistiky, která kombinuje nástroje geometrie, počítačové grafiky a biometrie do jednoho metodického postupu, který je schopen analyzovat rozdíly ve tvaru objektu z pohledu vícerozměrné statistiky (Bookstein 1996).

V 90. letech se z malé skupiny nadšenců, kteří se koncentrovali okolo vůdčích osobností, jako byli F. James Rohlf, Fred L. Bookstein, Norman MacLeod, vytvořila početná komunita a z pokusů se stala ucelená sada nástrojů s popisným, analytickým a výzkumným potenciálem, která byla zařazena do metodické základny většiny biologických oborů a našla uplatnění také v geologii nebo archeologii (Brande, Saraguti 1996, Buchanan *et al.* 2007, Gero, Mazzullo 1984, Lycett *et al.* 2006). Masivní rozvoj v oblasti analýzy tvaru je přičítán 1) zavedení nových postupů pro získávání numerických dat (Rohlf 1990), 2) schopnosti analyzovat kartézské souřadnice anatomických bodů (Slice 2007), 3) potřebám zredukovat nechtěný vliv registrace objektů do arbitrárních prostorových systémů (Cheverud *et al.* 1983), 4) potřebách oddělit velikostní a tvarovou složku při studiu biologické či jiné variability (Corruccini 1987) nebo zcela pragmaticky 5) je důsledkem aktivního propojení badatelů, analytiků a softwarových vývojářů pomocí internetové sítě, která tímto způsobem poskytla a stále poskytuje potřebnou zpětnou vazbu a zároveň nové impulzy. V této souvislosti je třeba zmínit alespoň některé internetové zdroje: webová stránka Morphometrics at SUNY Stony Brook (<http://life.bio.sunysb.edu/morph/index.html>) poskytuje ucelenou základnu pro studium tvaru od aktualit, přes freeware programy až po odbornou literaturu nebo také stránka s IMP (*Integrated Morphometrics Package*) programy (<http://www3.canisius.edu/~sheets/morphsoft.html>), která poskytuje základnu pro začátečníky i pokročilé. V retrospektivě posledních dvou dekad lze geometrickou morfometrii bezpochyby označit za jedno z nejrychleji se vyvíjejících odvětví v biologii. Tento vývoj jen podtrhuje počet sumarizačních prací, které byly za posledních dvacet let publikovány (Rohlf (1990), Bookstein (1997), Pavlinov (2001), Richtsmeier *et al.* (2002), Adams *et al.* (2004), Slice (2007), Mitteroecker, Gunz (2009)). Technický rozvoj sebou přinesl také nutnost inovovat pohled na tvar po stránce teoretické. Tato inovace se týká především přesného vymezení pojmu tvar, které má podle obecně přejímané definice následující podobu: „*tvar je taková vlastnost objektu, která nabývá stále stejných hodnot při jakékoliv proporční změně velikosti a v různém prostorovém uspořádání*“ (Kendall 1984). Přesné vymezení tvaru napomohlo také blíže vymezit hranici mezi proměnnými, které popisují tvar a velikost. Oddělení těchto dvou složek je tak nejvýznamnějším přínosem k vyřešení problému, se kterým se potýkaly předchozí generace badatelů.

Obecné pobláznění geometrickou morfometrií by však nemělo být bráno na lehkou váhu. Metody geometrické morfometrie tvoří pouhou sadu analytických nástrojů, jež by neměla být zaměňovaná za koncepci nebo fenomén (Roth, Mercer 2000). Pokud bychom to chtěli vyjádřit vhodným přirovnáním, pak je geometrická morfometrie pro biologa něco jako textový editor počítače pro spisovatele. Člověk může mazat, kopírovat, spojovat slova jak se mu zalíbí, ale Karla Čapka to z něj neudělá. Metody geometrické morfometrie nemohou samy o sobě odhalit nebo vysvětlit morfologické souvislosti. Pokud jsou však vhodně aplikovány, mohou osvětlit cestu k jejich vysvětlení.

Postup aplikace metod geometrické morfometrie se tradičně řídí třemi základními kroky – přípravná fáze, vlastní popis tvaru a následné statistické zpracování.

PŘÍPRAVNÁ FÁZE ANALÝZY TVARU

Přípravná fáze odpovídá té části analýzy, ve které jsou získána vstupní data. Od vlastní analýzy tvaru se odlišuje z toho důvodu, že získaná data nemusí být primárně určena pro popis tvaru ve smyslu geometrické morfometrie, ale mohou zahrnovat vlastnosti, které se určují formu (tvar, velikost, barva, textura, lesk apod.). Analýza tvaru je *a priori* kvantitativní postup, a proto cílem této přípravné fáze je získat numerická, tedy digitální data. Jinak řečeno účelem přípravné fáze je zaznamenat „geometrii“ objektu (Weber *et al.* 2001). V závislosti na požadavku analýzy a počtu dimenzí, ve kterém analýzu provádíme, je možné použít různé způsoby zisku dat. V případě dvou dimenzí, tj. rovinných objektů, lze tvar objektu zachytit optickými nebo digitálními fotoaparáty, grafickým tabletem nebo stolním skenerem (Urbanová *et al.* 2006). Získané digitální snímky často vyžadují úpravu v programech pro analýzu obrazu, kde jsou snímky editovány a zjednodušeny na méně složitý numerický výstup. Ten může být zapsán v různých formátech, obvykle v souladu s následujícími kroky analýzy.

Skutečnost, že žijeme v trojrozměrném světě, ustavuje všechny reálné objekty do tří dimenzí. Při výběru vhodného postupu je potřeba mít na mysli, že biologické i nebiologické objekty jsou ve většině případů trojrozměrná tělesa a zanedbání jedné z dimenzí vede nezbytně ke zjednodušení původní morfologie a mnohdy i ke zkrácení zachycených informací. V případech, u kterých dva rozměry výrazně převažují nad rozměrem třetím, můžeme uvažovat o tom, že jej zanedbáme. Převod 3D objektů na 2D data je obvykle dán postupem, jaký použijeme v přípravné fázi. Redukce může být daná projekcí struktury na snímací plochu skeneru nebo fotoaparátu anebo matematickou transformací 3D dat.

V oblasti analýzy trojrozměrných dat byla pro účely geometrické morfometrie do dnešního dne aplikována celá řada zařízení (MicroScribe, Faro, Polhemus digitizéry, laserové nebo optické skenery).

S využitím těchto přístrojů je možné získat vstupní data (např. oblak bodů, křivky nebo povrchy) přímou interakcí s objektem nebo po-

dobně jako v případě dvourozměrných postupů editací zachycené 3D struktury v grafickém programu. Do popředí se mimo jiné dostávají také postupy využívající klinická zobrazovací zařízení a virtuální modelování pracující s objemovými daty (Zollikofer *et al.* 1998, Zollikofer 2002, Neubauer *et al.* 2004). V těchto situacích je interakce mezi pozorovatelem a pozorovaným objektem přesunuta do virtuálního prostoru. Tento přesun usnadňuje manipulaci, posunutí a otočení objektů bez toho, aby byly tyto činnosti omezeny fyzikálními zákony. Nevýhodou těchto zařízení a postupů, v porovnání s finančně dostupnějšími skenery, je jejich omezení na klinická radiodiagnostická oddělení nebo specializovaná technická pracoviště.

Zisk určité formy záznamu (digitální snímek, 3D model, sada souřadnic) u 2D i 3D postupů přípravné fáze, poskytuje badateli prostor pro volnější a flexibilnější plánování výzkumu. Na rozdíl od tradičních postupů založených na přímé interakci mezi hodnotitelem a hodnoceným objektem (např. antropometrie živého člověka), jež vyžaduje striktní předem promyšlený design výzkumu, u nepřímého hodnocení je možné se k zaznamenanému objektu kdykoliv vrátit. Rozšiřuje se tak nabídka alternativních metodických postupů nebo

Ačkoliv projekci 3D struktury do 2D záznamu objektů si spojujeme převážně s fotoaparáty, přesné zachycení tvaru, často obrysu, je dosažitelné i jinými prostředky, např. *camera lucida*, jež ačkoliv patentována na počátku 19. století (1807, William Hyde Wollaston) má své kořeny už u Johanna Keplera nebo Albrechta Dürera. V antropologii jsme se do nedávna mohli setkat dioptografem nebo diagrafem. Dioptograf podle Martina umožňoval překreslit obrazy libovolného objektu v poměru 1:1, zatímco diagraf nabízel totéž v různém měřítku.

Digitizéry jsou záznamová zařízení, která pracují na principu přímé interakce mezi pohyblivou částí zařízení (rameno přístroje nebo externí polohovací zařízení) a studovaným objektem. Prostorová data jsou získána buď na základě informace pocházející z čidel v kloubech ramene (Faro, MicroScribe) nebo z polohy externího zařízení uvnitř magnetického pole (Polhemus). Naproti tomu 3D skenery (MicroScan, Konika Minolta, Vectra) využívají bezkontaktní záznam. Informace o poloze v prostoru je určena o vlastnostmi odraženého signálu (laserový nebo světelný paprsek). Celá řada nejnovějších skenerů dokáže vedle informace o morfologii zachytit také texturu objektu (Vectra).

proměnných, jež do hodnocení vstupují a není nezbytně nutné (často je to i nemožné) se vracet k původnímu studovanému materiálu (Rohlf 1990).

Záznam vstupních dat

Kvantifikovat můžeme tvar libovolné struktury, která nabývá určitého, třebaže dočasného, tvaru, a má biologické či jiné opodstatnění. Typ vstupních dat a v konečné fázi i postupu tvarové analýzy se nicméně vždy odvíjí od morfologické podstaty zkoumaného biologického objektu. Přesněji řečeno, odvíjí se od toho, zda jsou na objektu přítomny *a priori* definovatelné orientační body, tzv. význačné body. Geometrická morfometrie rozeznává dvě základní kategorie morfometrických postupů: techniky založené na diskrétních, tzv. význačných bodech (analýza význačných bodů) a techniky založené na kontinuální analýze uzavřených nebo otevřených křivek (analýza obrysů). Rozlišujeme tudíž 2 základní skupiny vstupních dat: význačné body a obrysy (křivky, kontury). Podle MacLeoda (1999) tato dichotomie setrvávající v ucelené koncepci geometrické morfometrie odkazuje nikoliv na odlišnou podstatu vstupních dat, ale na odlišný úhel pohledu, kterým se na morfologii objektu díváme. Zatímco metody analýzy význačných bodů řeší morfologii v „hrubých rysech“ bez jemných nuancí a kontinuálních změn tvaru, metody analýzy obrysů řeší tvar ve své komplexitě a zabývají tak tvarem *in sensu stricto*.

Někteří autoři nepovažují analýzy obrysů za součást geometrické morfometrie (Mitteroecker, Gunz 2009). Nicméně, již na konci 90. let minulého století MacLeod, sám velký zastánce analýzy obrysů, kritizoval arbitrárnost tohoto rozdělení a argumentoval, že metody analýzy obrysů „nelze považovat za o nic méně geometrické“ (MacLeod 1999).

Význačné body

První typ vstupních dat, který zde představíme, jsou význačné body. Podle definice se jedná o takové body, které si mezi objekty vzájemně odpovídají a shodují se také mezi organismy stejné i různých populací (Dryden, Mardia 1998). Sada význačných bodů patřící jednomu objektu se označuje jako konfigurace. Minimální počet bodů pro jednu konfiguraci jsou tři, maximální počet se obvykle odvíjí od složitosti struktury a je dán také matematickými omezeními analýzy (např. počtem stupňů volnosti). Ačkoliv každý objekt zájmu lze popsat konfigurací o libovolném počtu význačných bodů, počet bodů v rámci analýzy jedné skupiny objektů, např. v rámci jedné zkoumané populace, nelze měnit. Tato podmínka komplikuje studium neúplných vstupních dat. Taková situace nastane, je-li poškozena část objektu, kde se nachází význačný bod, nebo jsou srovnány různá vývojová stádia, u kterých sledovaný znak, respektive jeho bodové zastoupení vymizelo. Jak již bylo řečeno, reálné objekty jsou obvykle trojrozměrné a převod na jednodušší dvourozměrná data je možné provést výběrem vhodného typu záznamu tvaru nebo matematickou transformací numerických dat. Nejjednodušším způsobem jak transformovat 3D data do rovinného 2D záznamu je zanedbání jedné z os kartézského systému souřadnic. Alternativním postupem je projekce bodů souřadnic význačných bodů na libovolnou rovinu. První způsob se nabízí u objektů, u kterých je jeden z rozměrů výrazně redukován nebo není smysluplné jej zahrnovat do analýzy. Druhý způsob transformace trojrozměrných dat je obvykle určen specifickými požadavky studie.

Typy význačných bodů

Podle Booksteinova klasifikačního systému (Bookstein 1991) rozlišujeme 3 základní skupiny význačných bodů. Typem I se označují body, ve kterých se setkávají struktury kvalitativně odlišného původu (materiálního nebo tkáňového) a jejich průsečík tvoří jeden konkrétní bod na objektu. Příkladem význačného bodu typu I je kraniometrický bod bregma, místo styku vazivové tkáně šípového a korunního švu s kostmi klenby lebky. MacLeod (2001) upozorňuje, že tyto body jako jediné splňují podmínky pravé biologické homologie, nicméně pro skutečné zachycení tvaru je jich na objektech velmi málo a musí být kombinovány s ostatními typy bodů.

Body typu II leží v místech maximálního zakřivení relativně malých a prostorově ohraničených a struktur,

u kterých je dobře známa jejich morfogeneze. Takové body jsou obvykle vrcholky nebo nejhlubší místa pozitivního a negativního reliéfu tvarovaného v důsledku působení skutečné biomechanické síly na objekt, například tah svalových vláken v místě úponu na kostře nebo špička drápu tlapy šelmy apod. Jako body typu III jsou označovány extrémní body definované s ohledem na geometrické vlastnosti objektu, např. nejvzdálenější bod nebo koncový bod apod. Tyto body postrádají jednoznačně zdůvodnitelný biologický význam a jsou určeny výhradně na základě geometrických vlastností objektu. Jejich použití v analýze tvaru je v mnoha ohledech kontroverzní, protože ve své podstatě nerespektují přísnou homologii mezi jedinci nebo skupinami. Příkladem tohoto typu jsou kraniometrické body euryon, zygon, ektomolare. Všechny tyto body také obvykle poskytují nejvyšší chybu záznamu dat (Urbanová 2009).

V roce 1997 revidoval Bookstein vlastní typologii a typ III přejmenoval na pomocné body (viz dále). Stanislav Katina (2007) doplnil Booksteinův seznam o dalších 3 podtypy, které jsou klasifikovány jako podtypy Booksteinova typu III: typ 3a je průsečíkem středové křivky s okrajem plochy struktury, typ 3b je průsečíkem středové křivky s křivkou pozorovanou, typ 3c průsečíkem pozorované křivky a okraje objektu. Podobně jako u kteréhokoliv jiného klasifikačního systému, se setkáváme s případy, u kterých je klasifikace do té či oné skupiny nadměru subjektivní a sám Bookstein uvádí příklady tzv. přechodných typů (1-2, 2-3).

Obrisy

Obrisy neboli kontury, také křivky či okraje jsou druhým typem vstupních dat, jež lze zkoumat současnými metodami geometrické morfometrie. Obvykle k jejich analýze přistupujeme tehdy, pokud náš primární zájem výzkumu směřuje k popisu komplexního tvaru nebo popisovaný objekt postrádá vhodný počet definovatelných uzlových bodů. Ačkoliv tvar je opět rozložen na sadu bodů, jejich poloha a počet nejsou omezeny podmínkami vzájemné homologie. Podobně jako u význačných bodů, lze obrisy vyjádřit primárně jako dvourozměrná nebo trojrozměrná data. Vlastní formát dat (kartézské souřadnice, úhlové souřadnice, řetězový kód) záleží na preferencích hodnotitele a zvolené analytické metodě,

Řetězový kód (také řetězové kódování) přiřazuje každému bodu struktury celočíselnou hodnotu v rozsahu od 0 do 7 v závislosti na směru, kterým se nachází předcházející bod podle následujícího kódovacího pravidla: S-0, SZ-1, Z-2, JZ-3, J-4, JV-5, V-6, SV-7, kde S, SV atd. představují směr světových stran.

Kombinace obrysů s jinými typy dat byla až do nedávna spíše raritou (Dhurjati *et al.* 2005). V roce 1990 ukázal James F. Rohlf na skutečnost, že spojení obrysů s význačnými body přináší do analýzy příliš mnoho technických problémů a další vývoj v této oblasti jakoby se tohoto prohlášení zalekl.

Pomocné body

Pomocné body jsou třetím typem vstupních dat pro analýzu tvaru metodami geometrické morfometrie. Stejně jako obrisy jsou pomocné body umístěny na objektech nebo jeho částech, které mohou být obvykle popsány pouze kontinuální křivkou. Příkladem je kontura vchodu do očníce, tvar neurokrania nebo *corpus callosum* na mediasagitálním řezu mozku (Bookstein 1996, Delson *et al.* 2001, Bookstein *et al.* 2001). Tyto struktury obvykle postrádají dostatečný počet přirozeně definovatelných význačných bodů. Termín „pomocné“ je v češtině ekvivalentem k anglickému originálu „semi-landmarks“ a naznačuje jejich podřadné nebo přechodné postavení vůči význačným bodům a obrysům. Od obou těchto typů je odlišuje celkový počet na strukturu (nižší proti obrysům a vyšší proti význačným bodům), odlišný postup vlastní analýzy tvaru a skutečnost, že neexistují na jedné izolované struktuře, ale výhradně v kontextu nějaké skupiny tvarů a jejího průměru (Bookstein 1996). Pomocné body jsou obvykle rozmístěny blízko sebe ve více méně pravidelných intervalech. Pečlivost, s jakou je takového uspořádání dodrženo, není nezbytně vyžadována, protože drobné odchylky lze korigovat v následujících krocích analýzy tvaru (analýza pomocných klouzavých bodů). Počet bodů mezi objekty však musí být konstantní a každá konfigurace pomocných bodů by měla být zakončena význačným bodem o přesném morfologickém významu (typ I nebo typ II).

Rozšíření pomocných bodů na 3D struktury (tj. povrchy nebo 3D křivky) se potýká s náročností výpo-

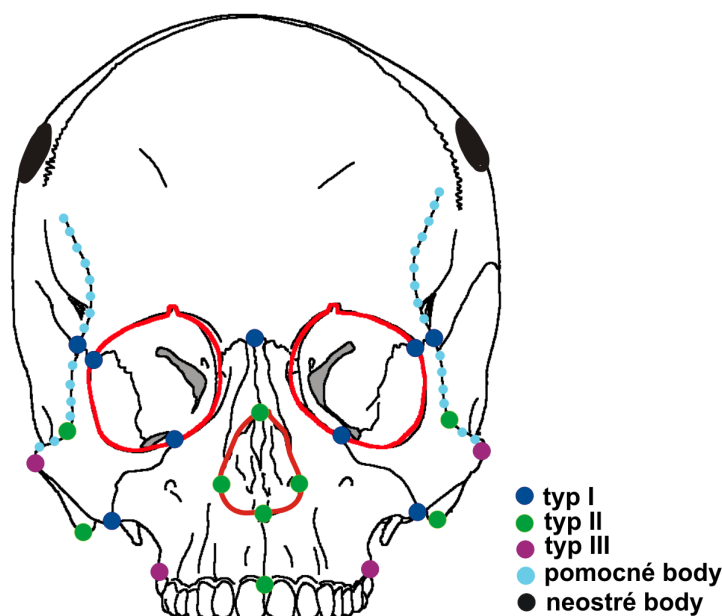
čtu i záznamu konstantního počtu optimálně rozmístěných bodů na povrchu struktury (Gunz *et al.* 2005). Vhodné postupy, jak se s tímto problémem vypořádat, jsou uvedeny v syntéze autorů Mitteroeckera a Gunze (2009).

Na rozdíl od analýzy obrysů jsou pomocné body často kombinovány s body význačnými a v tomto spojení jsou mnohými autory také doporučovány (Bookstein *et al.* 1999, Monteiro *et al.* 2004).

Katina *et al.* (2007) uvádí klasifikaci pomocných bodů do 3 samostatných typů, jež připojil k již zavedeným Booksteinovým typům pro význačné body: typ 1 (spolu s Booksteinovými typy uváděn jako typ 4) představují pomocné body na hraně, typ 2 (typ 5) jsou pomocné body na ploše a poslední typ 3 (typ 6) náleží matematicky generovaným pomocným bodům.

Neostré body

S nárůstem nových technologií zaměřených na záznam prostorových dat se ukázalo, že řada definic význačných bodů nespĺňuje nároky, které si moderní postupy kladou. Například některé tradiční antropometrické body jsou definovány buď s ohledem na jiné, například sousedící, struktury a jejich polohu, nebo s ohledem na techniku, s jakou body vyhledáváme. Jako klasický případ uveďme antropometrické body euryon nebo zygion. Oba body jsou definovány jako nejlaterálnější místa klenby lebky, respektive zygomatického oblouku (Martin, Saller 1957). Technika vyhledání je v praxi určena tak, že konce branží dotykového měřidla posunujeme v místě přibližného výskytu bodu tak dlouho, dokud nenaměříme největší vzdálenost. V případě dotykových digitizérů nebo virtuálních modelů je tento postup vyhledávání bodu značně nepraktický a vzhledem k tomu, že není hlavním cílem zjistit vzdálenost mezi body, pak i zbytečný. Matematické řešení tohoto problému označujeme jako neostré body (anglicky *fuzzy landmarks*) (Valeri *et al.* 1998). Záznam polohy neostrých bodů je založen na jednoduchém postupu. Souřadnice mraku bodů, které jsou zaznamenány v oblasti pravděpodobného výskytu skutečného bodu, jsou zprůměrovány a aritmetický průměr zastupuje bod v dalším zpracování. Termín neostré body by měl být podle definice používán u takových biologických struktur, které, ačkoliv jsou přesně vymezené a jejich morfogeneze vysvětlitelná, zabírají prostor větší než jediný bod.



Obr. 2. Schéma demonstrující typy vstupních dat pro kvantitativní analýzu tvaru, význačné body (barevně podle typu) a obrysy (červeně).

ANALÝZA TVARU

V daném čase nabývá každý objekt na Zemi určité konkrétní pozice, která je na úrovni globální vztažena k zemské ose a vyjádřena zemskými souřadnicemi, například v rámci geodetického systému nebo je na úrovni lokální vyjádřena souřadnicemi zvoleného referenčního systému, např. kartézského (pravoúhlého) systému souřadnic. Podle axiomu geometrické morfometrie je analýza tvaru schopna podat smysluplné informace o tvaru nebo tvarové změně pouze tehdy, splňují-li popisované objekty následující tři podmínky: 1) poloha objektů v rámci jedné referenční soustavy je stabilní a objekty jsou okupují stejnou pozici, 2) objekty jsou orientovány stejným směrem a úhly otočení mezi nimi jsou nulové, 3) objekty se neliší velikostí. Aby bylo možné tyto podmínky zajistit, je potřeba, aby objekty nebo konfigurace bodů, které je zastupují, prošly sérií transformací. Tyto transformace upraví vstupní dat do podoby, která bude naplňovat požadavky geometrické morfometrie, případně bude vyhovovat specifickým nárokům studie. Informace o tvar objektu zůstane zachována pouze tehdy, pokud všechny transformace, kterými objekty projdou, budou výhradně izometrické. Soubor izometrických transformací, v geometrické morfometrii označován jako standardizace nebo normalizace dat, zahrnuje změnu polohy (lineární posun a stranová symetrie), orientace (otočení) a velikosti (úprava měřítka). Platí, že lineární posun je právě taková transformace, kterou všechny body objektu změni svou relativní i absolutní polohu v prostoru a vektor této změny je pro všechny body konfigurace konstantní. Otáčením rozumíme právě takovou změnu, která změni polohu bodů objektu pohybem okolo jedné nebo více os. Úhel otočení je pro všechny body objektu konstantní. Stranová symetrie je transformace, která převrátí polohu bodů objektu zrcadlově symetricky vůči rovinám os soustavy souřadnic nebo vůči libovolné rovině. A konečně proporční změna velikosti násobí všechna vstupní data konstantou o stejné hodnotě.

Jakkoliv se zdají být podmínky pro úpravu vstupních numerických dat striktní, jejich přesné dodržení není zavazující. V některých situacích může mít uchování velikostní složky nebo dané pozice v prostoru specifický význam (např. při výzkumu alometrie nebo asymetrie).

Velikost

Podíváme-li se na míru variability mezi objekty, které nás obklopují, pochopíme, že nikoliv tvar, ale velikost je hlavní determinantou rozdílů mezi objekty. Proto také vyjádření velikosti je jedním z hlavních předpokladů v komparativních morfologických studiích. Velikost hraje důležitou roli na úrovni samostatných objektů, ale určuje také rozdíly mezi skupinami objektů, ať už se jedná o objekty biologické nebo jiné podstaty. Snaha vyrovnat se s těmito omezeními vedla řadu autorů k úsilí oddělit velikostní a tvarové složky variability nebo korigovat zastoupení velikosti v získaných parametrech (např. Darroch, Mosimann 1985, Wilson, Loesc 1989, pro další viz Corruccini 1987). Postupy pro korekci velikostní variability dat lze rozdělit na podskupinu jednorozměrných a vícerozměrných postupů. Do první spadá 1) logaritmování s přirozeným nebo dekadickým základem, 2) poměr dvou proměnných, který v čitateli obsahuje standardizovanou proměnnou a ve jmenovateli velikostní ukazatel (objem, obsah atd.) nebo 3) regresní analýza, v níž je velikostní parametr brán jako nezávislá proměnná a tvarový parametr jako proměnná závislá. Logaritmování a poměry by však měly být používány opatrně. Ačkoliv se jedná o tradiční postupy v biologických vědách, log-transformace i výpočty poměrů patří mezi statisticky velmi nevyzpytatelné způsoby úpravy dat, jež mohou původní závislosti změnit po kvalitativní (pokřivení linearity) i kvantitativní (nárůst korelace, změna rozptylu dat) stránce. Hlavní problém pro oba postupy nastává, pokud transformovaná data vstupují do vícerozměrných statistických postupů.

Zvláštním případem korekce velikosti pomocí regresní analýzy je extrakce růstového trendu pomocí alometrické rovnice.

Tvar a velikost jsou úzce propojené vlastnosti objektu a platí to i pro způsoby jakými jsou kvantitativně vyjádřeny. Pokud se objekty shodují ve tvaru, pak lze jejich rozdílnou velikost vyjádřit libovolným metrickým parametrem (objem, maximální délka, poloměr apod.). Pokud se však liší ve tvaru, pak se i vyjádření velikosti stává složitějším problémem.

$$y = 10^b x^a$$

kde koeficient a označuje alometrický faktor a b je integrační konstanta.

V úvodu kapitoly jsme alometrii vysvětlili na příkladu proporcí slona. Připomeňme, že alometrie v takovém pojetí je vztah dvou libovolných proměnných. Podle Hammera a Harpera (2006) se jedná o alometrii *in sensu lato*. Alometrie *in sensu stricto* je vztah dvou růstových trendů struktury X a Y , který lze přesně vyjádřit matematickým vztahem. Pokud je změna proměnné X k proměnné Y proporční, tedy obě struktury rostou stejně rychle, pak označujeme tento vztah za izometrický. Pokud je hodnota alometrického faktoru vyšší než 1, pak struktura X roste rychleji a vztah se stává pozitivně alometrický. Naopak v případě, že je hodnota alometrického faktoru nižší než jedna, odkazuje to na zpožděný růst struktury X a vztah označujeme jako negativní alometrie.

$$\frac{dy/dt}{x} = a \frac{dx/dt}{x}$$

$$\ln y = a \ln x + b$$

V geometrické morfometrii je alometrie brána jako vztah tvarových a velikostních proměnných, přičemž jako velikostní proměnná stojí hodnoty velikosti centroidu nebo logaritmované hodnoty velikosti centroidu (viz dále).

Vícerozměrné postupy pro korekci rozdílné velikosti zahrnují 1) Barnabyho korekci, což je metoda založená na projekci dat metrických proměnných na normálovou rovinu k první hlavní komponentě. Tato transformace předpokládá, že velikost je hlavní faktor determinující variabilitu dat a proto lze první hlavní komponentu považovat za velikostní. Dále zde patří 2) vícerozměrné varianty lineární nebo nelineární regrese a 3) vícerozměrná podoba alometrické rovnice (Hammera, Harpera 2006). Nejčastěji používanou metodikou je však 4) výpočet velikostního parametru s názvem velikost centroidu (anglicky *centroid size*, CS). Velikost centroidu je hodnota odpovídající sumě čtverců vzdáleností všech význačných bodů dané konfigurace od středu gravitace (centroid). Centroid je právě ten bod, který při otáčení ostatních bodů objektu nebo konfigurace nemění svou polohu (střed gravitace). Tato korekce velikosti je zahrnuta do obecné prokrústovské superimpozice (viz dále). Je potřeba zdůraznit, že v teorii geometrické morfometrie je velikost centroidu jediným metrickým parametrem, který není ovlivněn variabilitou tvaru (Bookstein 1991).

Pro úplný přehled můžeme zmínit další pokusy o oddělení velikosti a tvaru do dvou nezávislých proměnných. Jedním z nich je tzv. metoda neutralizace (francouzsky *une méthode de neutralization*) (Menk 1981). Jednalo se v podstatě o poměr vzdáleností a globálního modulu (francouzsky *modul global*), což byl součet nebo index zahrnující všechny měřené proměnné.

Jedním z úspěšnějších pokusů jak se vypořádat s tvarovými a velikostními na úrovni srovnání populací byla Penroseova statistika (Penrose 1954), která se do dnes používá k vyjádření podobnosti mezi populacemi (Franklin 2005). Při srovnání populací jsou celkové rozdíly mezi dvěma skupinami dat vyjádřené hodnotou průměrného čtverce vzdálenosti (C^0_H) rozděleny na dvě komponenty: velikostní komponenta (C^2_Q) počítaná jako součet standardizovaných rozdílů (d) mezi průměrnými hodnotami každého páru v souborech a tvarová komponenta (C^2_Z) vyjádřená odchylkou relativní amplitudy ze všech rozměrů.

V závěru této kapitoly je nutné uvést, že navzdory zmíněným technikám a úsilí, které bylo do jejich vývoje vloženo, je extrakce velikostní a tvarové složky v čisté podobě neuskutečnitelný úkol a rozdíly ve velikosti nelze nikdy zcela odstranit (Richtsmeier *et al.* 2002). Obě složky je možné oddělit do nezávislých nekorelovaných proměnných pouze ve statistickém smyslu.

Prokrústovská superpozice

Jednou z nejběžnějších metod standardizace vstupních dat pro účely analýzy tvaru je v současnosti obecná prokrústovská analýza, také někdy uváděná jako obecná prokrústovská superpozice (anglicky *Generalized Procrustes Analysis* – GPA nebo *Generalized Procrustes Superimposition* – GPS). Metoda původně vyvinutá pro účely psychologie minimalizuje rozdíly (euklidovské vzdálenosti) mezi vzájemně si odpovídajícími body (význačnými body) dvou a více konfigurací. Podobně jako metody korekce velikosti je i prokrústovská superpozice transformace dat. Vstupní data tedy mění své numerické hodnoty, ale stále si zachovávají původní informaci o tvaru. Jednotlivé konfigurace bodů jsou nejdříve navrstveny jedna na druhou (superponovány), poté otočeny, posunuty a proporčně přizpůsobeny na jednotnou velikost tak, aby si body srovnávaných konfigurací nejvíce odpovídaly.

Název transformace odkazuje na řeckou mytologickou postavu lupiče Prokrústa (prokrústés, řecky napínač), jenž číhal na pocestné a násilím je přizpůsoboval rozměrům svého lože, dokud jej na své cestě do Atén stejným způsobem nezabil řecký hrdina Théseus. Jako kritérium podobnosti a optimálního přizpůsobení bodů byla velikost lože nahrazena metodou nejmenších čtverců.

Jednotlivé na sebe navazující kroky transformace jsou iniciovány výpočtem polohy centroidu z hodnot souřadnic význačných bodů konfigurací zastupujících studované tvary. Matematicky je poloha centroidu určena průměrnými souřadnicemi všech bodů dané konfigurace. Body jsou následně přesunuty tak, aby se centroid shodoval s počátkem soustavy souřadnic nebo aby odpovídal jinému zvolenému bodu v prostoru, například centroidu první konfigurace. Z takto upravených konfigurací je vypočítána hodnota velikosti centroidu a všechny souřadnice dané konfigurace jsou jí vyděleny. Nová hodnota velikosti centroidu pro všechny konfigurace v analýze se po této úpravě rovna hodnotě 1. Matematický výraz pro výpočet velikosti centroidu má podobu:

$$CS = \sqrt{\sum_{j=1}^k [(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2]}$$

V následujících krocích jsou redukovány zbývající rozdíly určené odlišnou orientací bodů konfigurací. Z velikostně a prostorově unifikovaných konfigurací je nejdříve vypočítán dočasný průměr a samostatně pro každou z konfigurací v analýze optimální úhel otočení podle vztahu:

$$\theta = \arctg \frac{\sum x_{konsensus} x - x_{konsensus} y}{\sum x_{konsensus} x + y_{konsensus} y}$$

Souřadnice jsou otočeny o optimální úhel a po otočení je přepočítána hodnota konsensu. Postup se opakuje, dokud nejsou splněny podmínky minimálních rozdílů určené pravidlem nejmenších čtverců. Transformované konfigurace vystupující z analýzy jsou superponovány, velikostně uniformní a s minimálními rozdíly v pozici bodů v prostoru.

Obecná prokrústovská analýza, jak byla právě popsána, má celou řadu modifikací. Dílčí prokrústovská analýza obsahuje pouze kroky, které upravují konfigurace vzhledem k jejich pozici v prostoru a orientaci, přičemž původní velikost konfigurace zůstává zachována. U symetrické prokrústovské analýzy je do protokolu zapojeno také zrcadlové převrácení konfigurace. Tato možnost je zakomponována jako zvláštní funkce do řady počítačových aplikací a lze ji využít především v situacích, kdy stranová symetrie tvarů není předmětem zájmu studie a je potřeba ji odstranit jako nechtěný zdroj rozdílů. V podobném duchu je možné základní kroky superpozice různě kombinovat. Obvykle je vynechán nebo pozměněn jeden ze základních kroků tak, aby to posloužilo účelům analýzy. Nahrazení hodnoty velikosti centroidu ve vyjádření velikosti konfigurace hodnotou kosinu úhlu mezi vícerozměrnými vektory konfigurace konsensu se označuje jako kompletní prokrústovské přizpůsobení (naproti tomu použití velikosti centroidu je částečné prokrústovské přizpůsobení) (Rohlf 1999).

Standardizovat je možné nekonečné množství konfigurací současně. Při vyšším počtu jedinců v souboru

však musíme počítat s vyššími hardwarovými i časovými nároky na výpočet. Z logiky věci vyplývá, že minimální počet konfigurací pro standardizaci jsou dvě. V takovém případě je jedna z konfigurací (sekundární konfigurace) přizpůsobena konfiguraci druhé (primární konfigurace) a celou operaci označujeme jako obyčejná nebo prostá prokrústovská analýza.

Tvarové proměnné prokrústovské analýzy

Bez ohledu na to jaký postup zvolíme, jsou výstupem výše zmíněných transformací numerické hodnoty tvarových proměnných. Každá sada tvarových proměnných popisuje specifický tvar, podobně jako délkové a šířkové rozměry popisují proporce nebo hodnoty barevného odstínu, kontrastu a jasu odkazují na vnější texturu objektu.

Transformovaná vstupní data kartézských souřadnic bodů „očistěná“ od velikostních a prostorových diskrepancí se nazývají prokrústovské souřadnice. Průměrná konfigurace výsledných prokrústovských souřadnic se označuje jako konsensus nebo prokrústovský průměr. Konsensus je možné určit pro jakoukoliv část standardizovaného souboru. Velikost vektoru mezi standardizovaným bodem konfigurace a relevantním bodem konsensu označujeme jako prokrústovské reziduum.

Každý tvar, respektive každá tvarově odlišná konfigurace bodů, okupuje specifické místo v tzv. prostoru tvarových proměnných (anglicky *shape space*, *morphospace*), také Kendallově prostoru nebo Kendallově prostoru tvarových proměnných (Kendall 1984). Vlastnosti a počet dimenzí tohoto imaginárního prostoru jsou určeny celkovým počtem bodů v jedné konfiguraci a typem objektů (2D nebo 3D objekty). Před transformací je tvar vyjádřen proměnnými o $2p$ (dvourozměrná data) nebo $3p$ (trojrozměrná data) dimenzích, kde p je počet bodů v jedné konfiguraci. S každou z provedených transformací se však snižuje počet stupňů volnosti, s jakou lze se vstupními daty operovat. Unifikace velikosti, rotace okolo jedné z os a posunutí v jednom směru ubírá vždy 1 stupeň volnosti. V závislosti na směrech vektoru posunutí (2 pro 2D data, 3 pro 3D data) a osám rotace (1 pro 2D, 3 pro 3D data) je výsledný počet dimenzí prostoru tvarových proměnných determinován následujícími výrazy: $2p-4$ pro dvourozměrná data, $3p-7$ pro trojrozměrná data. Prostor tvarových proměnných nesmí být zaměňován za skutečný prostor s reálnými objekty, ve kterém žijeme. Je potřeba, aby byl prezentován čistě jako matematický konstrukt, který nemá odpovídající ekvivalent ve fyzickém světě. Vzdálenost mezi tvary nebo mezi místy, jež obsazují odlišné tvary, se označuje jako prokrústovská vzdálenost.

$$D^2 = \sum [x_{\text{konsensus}} - (x \cos \theta - y \sin \theta)]^2 + [y_{\text{konsensus}} - (x \sin \theta + y \cos \theta)]^2$$

Tato vzdálenosti je určena součtem druhých mocnin vzdáleností mezi relevantními body dvou konfigurací. V geometrické morfometrii je prokrústovská vzdálenost využívána jako měřítko podobnosti nebo odlišnosti mezi tvary a je *de facto* analogií k euklidovské vzdálenosti. Zde však veškerá podobnost končí. Prostor tvarových proměnných postrádá linearitu a lineární závislosti skutečného světa. U nejjednoduššího tvaru, kterým je konfigurace 3 bodů definující rovinu (trojúhelník) vzniká prostor o dvou dimenzích. Tvar Kendallova prostoru však nevytváří rovinu, ale tvoří plášť koule. S rostoucím počtem význačných bodů konfigurace nabírá na komplexnosti a je popisován jako Riemannovská varieta (O'Higgins 2000, Mitterocker, Gunz 2009).

Variety jsou útvary o n -rozměrech, u kterých neplatí lineární vztahy n -rozměrného euklidovského prostoru. Vlastnosti variety jsou vyjádřeny především mírou zakřivení. Příkladem jednorozměrné variety je kruh, dvourozměrná varieta je povrch koule (Kovalski 1995)

Kvantitativní vlastnosti prostoru tvarových proměnných lze zkoumat běžnými geometrickými postupy jako je měření úhlové či jiné vzdálenosti, popřípadě na matici prokrústovských vzdáleností aplikovat libovolné shlukovací pravidlo ve shlukovací analýze. Již zmíněná nelineárnost prostoru nicméně výrazně ztěžuje použití jiných konvenčních metod vícerozměrné statistiky, které jsou založené na předpokladech lineárních vztahů a vzájemných nezávislosti proměnných. Prokrústovská vzdálenost může sloužit jako vstupní data pro výpočet morfologické disparity (Zelditch *et al.* 2004) nebo rozsahu variability uvnitř dané popula-

ce, avšak parametrické testy založené na lineární regresi jako je analýza rozptylu (ANOVA) nebo diskriminační analýza by měly být používány opatrně nebo by měly být nahrazeny neparametrickými alternativami (Mitterocker, Gunz 2009).

Přítomnost nelineárních vztahů mezi parametry vyústila ve snahu zjednodušit vztahy a vlastnosti prostoru tvarových proměnných do podoby, jež by odstranila překážky, ale zároveň zachovala souvislosti mezi tvary, které jsou v prostoru zobrazeny. Pro tyto účely byl zaveden tzv. tangenciální nebo Kentův tangenciální prostor. Vzniká projekcí tvarů z prostoru tvarových proměnných na tečnou rovinu umístěnou v poloze průměrného tvaru souboru tvarů. Tento prostor má stejný počet dimenzí jako svůj předobraz a zároveň naplňuje podmínky o euklidovských lineárních vztazích. To je ovšem nastoleno za cenu nezbytné ztráty a pokrivení původní informace o vztazích mezi odlišnými tvary. Tangenciální prostor proto nelze brát jako ekvivalent prostoru tvarových proměnných, ale pouze a jedine jako aproximace svého originálu. Za předpokladu, že tvary obývají pouze malou část Kendallova prostoru, to znamená, že jsou konzistentně rozloženy v blízkosti konsensu, je pokrivení původních vztahů nepatrné a zanedbatelné. Doporučuje se však, aby prozkoumání vzájemných vztahů obou prostorů bylo součástí každé interpretace založené na analýze vztahů v tangenciálním prostoru (Rohlf 1990).

Na rozdíl od vícerozměrných statistických prostorů není geometrie Kendallova ani Kentova prostoru dána vztahy mezi tvary vyplňující prostor (tj. kovarianční maticí proměnných), ale výhradně konfigurací konsensu. Znamená to, že geometrie prostoru tvarových proměnných je nejdříve ustavena na základě této jediné konfigurace a teprve poté je prostor vyplněn vlastními tvary. Mimo jiné to znamená, že orthogonalita stejně jako další vlastnosti tangenciálního prostoru jsou určeny prokrústovským parametry dříve, než proběhne jakákoliv analýza dat a konkrétní vztahy mezi tvary jej žádným způsobem neovlivní. Tato skutečnost je například v protikladu k předpokladům faktorové analýzy (Bookstein 1996). Správný odhad konsensu proto hraje klíčovou roli v teorii geometrické morfometrie i v její schopnosti účinně kvantifikovat tvarové rozdíly. Způsob, jakým je konsensus definován, nebo změna ve složení vstupních dat, ze kterých je konsensus určen, vede ke změně vlastností prostoru tvarových proměnných.

Vedle prostoru tvarových proměnných a tangenciálního prostoru je zapotřebí zmínit také prostor tvarových a velikostních proměnných (anglicky *form space* nebo *size-shape space*) a prostor tvarových proměnných s korekcí na velikost (anglicky *size-adjusted morphospace*). Tyto prostory vznikají úpravou tvarových proměnných zvoleným parametrem velikosti. Tato veličina je nejčastěji zastoupena logaritmovanými hodnotami velikosti centroidu a může odkazovat na individuální velikost objektu nebo být teoretickou hodnotou zastupující skupinu objektů, např. střední hodnota. V obou případech umožňuje tato úprava tvarových dat prozkoumat vztahy mezi velikostí a tvarem v jediném prostoru dat.

Analýza robustního přizpůsobení

Jak vyplývá z předchozí kapitoly o prokrústovské analýze, konsensus má v popisu tvaru centrální postavení a ovlivňuje, jakým způsobem jsou popsány vztahy mezi tvary v souboru. Výpočet průměrné konfigurace se tak stává velmi citlivým krokem a zároveň slabinou celé analýzy. Je obecně známo, že aritmetický průměr vyjadřující střední hodnotu souboru je parametr nesmírně náchylný na odlehlé ojedinělé hodnoty, jež nemusí být nutně výsledkem přirozené variability, ale jsou často chybou záznamu nebo přepisu dat. Na základě pravidla nejmenších čtverců, na kterém je prokrústovská superprojekce založena, se původní vzdálenost jednoho bodu rozprostře mezi ostatní body konfigurace. V případě analýzy tvaru pak jakákoliv odchylka v jednom nebo několika bodech, přítomnost anomálního tvaru (např. patologicky pozměněný tvar) se promítně do podoby průměrné konfigurace a současně do geometrie prostoru tvarových proměnných. Tato analogie „motýlího efektu“ se označuje jako Pinocchiův efekt (von Cramon-Taubadel *et al.* 2007). Termín je častěji spojován s Fourierovou analýzou, avšak důsledky pro popis tvaru jsou v obou případech stejné.

Analýza robustního přizpůsobení nabízí alternativní řešení této situace. Postup je v principu totožný s prokrústovskou analýzou. Konfigurace význačných bodů jsou vycentrovány, proporčně zvětšeny nebo zmenšeny na jednotnou velikost a otáčeny tak dlouho, dokud rozdíly mezi konfiguracemi nejsou minimální. Pod-

statným rozdílem mezi oběma metodami je měřítko podstoupených transformací. Zatímco v případě prokrústovské analýzy je to hodnota aritmetického průměru, u analýzy robustního přizpůsobení je to hodnota mediánu (Zelditch *et al.* 2004).

Booksteinovské tvarové souřadnice

V chronologickém vývoji standardizačních metod geometrické morfometrie předchází booksteinovské tvarové souřadnice jak prokrústovské analýze tak robustnímu přizpůsobení. Ačkoliv obě výše zmíněné techniky ji v mnohém překonaly, jisté aspekty stojí stále za povšimnutí, protože nacházejí svůj užitek v analýze některých specifických problémů. Z pohledu vývoje pokročilých metod analýza tvaru se to zdá těžko pochopitelné, ale kořeny této standardizace můžeme vystopovat už u Francise Galtona. Jak naznačuje název, jako plnohodnotnou standardizační techniku ji do analýzy tvaru zakomponoval Fred L. Bookstein (1991). Podobně jako prokrústovská analýza i booksteinovské tvarové souřadnice pracují na principu vycentrování a otáčení objektů. Konfigurace bodů však nejsou standardizovány s ohledem na ostatní konfigurace v analýze nebo s ohledem na míru jejich variability, ale výhradně na základě polohy a vzdálenosti dvou zvolených bodů tvořící základnu. Základna je směrový vektor, jehož délka a orientace v prostoru určuje, jakým způsobem bude ten či onen objekt transformován. Není nezbytnou podmínkou, aby body základny byly součástí studované konfigurace významných bodů, dokonce se ani nemusí nacházet na zkoumaném objektu. Musí si však zachovávat konstantní prostorový vztah k bodům konfigurace.

Konfigurace jsou nejdříve přemístěny a superponovány podobně jako v prokrústovské superpozici, pouze střed gravitace je zde nahrazen jedním z koncových bodů základny. Základna a s ní všechny body konfigurace jsou následně otočeny o úhel, který základna svírá s osou X systému souřadnic.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

$$x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha$$

$$y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha$$

Body konfigurace se v podstatě chovají jako vrcholy (C_{1-n}) trojúhelníků ABC, jež jsou transformovány tak, aby se poloha a velikost základen AB shodovaly. Z toho vyplývá, že korekce velikosti konfigurací se odvíjí od délky základny. Podobně jako v předchozích superpozičních postupech, je i zde možné zdánlivě rigidní postup modifikovat. Například, časté je vynechání korekce velikosti. Konfigurace jsou prostorově uspořádány, ale zachovávají si původní velikost nebo je postup doplněn o standardizaci velikosti na základě hodnot velikosti centroidu.

Pro studium tvaru mnoha biologických i nebiologických objektů je tento způsob standardizace výhodnější než pokročilejší prokrústovská analýza. Za prvé, analýza je pod větší kontrolou uživatele, což je zapotřebí tehdy, pokud se objekty přirozeně ustavují do určitého definovaného postavení v prostoru. Za druhé, zvolené dva body základny lze velice snadno použít v kombinaci s metodami analýzy obrysů. Stačí pouze vedle bodů na křivce definovat dva významné body ležící uvnitř nebo vně analyzovaných obrysů. Za třetí, tato transformace je zvláštním případem projekce bodů z Kendallova na tangenciální prostor a tudíž nevyžaduje další úpravy dat pro zajištění linearitu mezi tvarovými proměnnými.

Příkladem z biologických věd může být postavení očních na lebce člověka. V základním anatomickém postavení směřují očníce dopředu a jejich spodní okraj leží v jedné rovině. Základna pro ustavení obrysů očních do anatomického postavení je pak definována nejspodnějšími body očníce (antropometrický bod orbitale, Knußmann 1988). Jiným příkladem může být standardizace umělé tvarů, jako je archeologická nádoba. Jelikož nádoba stojí vždy dnem na podložce, bylo by nesmyslné a pro interpretaci tvarové změny také nevhodné, aby byly tvary superponovány například prokrústovskou analýzou, při které jsou rozdíly mezi tvary rozloženy mezi body zvolené konfigurace bodů.

Klouzavé pomocné body

Jestliže pomocné body představují přechodné stadium mezi význačnými body a obrysy, pak klouzavé pomocné body jsou odklopen od superpozicních metod zastoupených především prokrústovskou analýzou k metodám deformačním (např. metoda tenkých ohebných plátek). Tato metoda byla stejně jako v předchozích případech navržena Fredem Booksteinem. Vychází v podstatě z kritiky metod význačných bodů žádající detailnější méně diskrétní způsob popisu tvaru. Podle definice, se pomocné body liší od význačných bodů způsobem, jakým jsou definovány teoreticky a jakým jsou rozeznány na objektu prakticky. Pomocné body jsou definovány vždy ve vztahu k jiným vlastnostem objektu (Zelditch *et al.* 2004). Jsou umístěny na jedné jediné struktuře natolik blízko sebe, že mezi sebou silně korelují, přestávají být libovolně transformovatelné a zákonitě nesou menší množství informace o tvarové variabilitě v daném místě, čímž se snižuje počet stupňů volnosti. Pokud jsou brány jako ekvivalent standardních význačných bodů, je jim neprávem přičítán nepatřičný objem tvarové informace. Jedním ze způsobů, jak se vyrovnat s touto nerovnováhou, je přiřadit význačným bodům a bodům, jejichž definice je založena vágní morfogenetické podstatě, rozdílnou váhu.

V roce 1996 navrhl Bookstein dnes již velmi rozšířenou metodu kombinující prokrústovskou analýzu s metodou tenkých ohebných plátek (viz dále). Pomocné body rozmístěné podél obrysu odlišných, ale morfologicky srovnatelných tvarů, se posunují tak dlouho, dokud nejsou prostorové vztahy mezi tvary minimální. Pohyb pomocných bodů však není libovolný. Každý z bodů „klouže“ tam a zpět po tečně kolmé na směr zakřivení tvaru v místě, do kterého byl původně umístěn.

Standardizační postup začíná shodně s obecnou prokrústovskou analýzou. Pokud jsou pomocné body kombinovány s body význačnými, pak superpozice transformuje pozici v prostoru, velikost i orientaci podle význačných bodů. Pokud tato kombinace schází, pak jsou za klíčové brány koncové body křivky. Poté co jsou body přemístěny na společný centroid, upraveny na konstantní velikost a otočeny s ohledem na klíčové body, začnou kmitat nebo klouzat po určené trajektorii tam a zpět, čímž se snižují prostorové rozdíly mezi studovanými tvary. Kritérií pro určení optimální polohy pomocných bodů je buď hodnota deformační energie nebo prokrústovská vzdálenost (Perez *et al.* 2006). Dalšími ukazateli mohou být také geodetická nebo tangenciální vzdálenost. V případě těchto kritérií jsou však na rozdíl od deformační energie brány v úvahu všechny složky rozdílů ve tvaru, tj. celý Kendallův nebo Kentův prostor s afinity i neafinní komponentou (viz metoda tenkých ohebných plátek). Je potřeba mít na paměti, že modifikace pravidel může vést k odlišným výsledkům i interpretacím. Celý proces je ukončen výpočtem nové hodnoty centroidu a konsensu. Ačkoliv metoda klouzavých pomocných bodů byla primárně vytvořena pro studium dvourozměrných dat, existuje i modifikace pro trojrozměrná data (Gunz *et al.* 2005).

Alternativní přístup ke studiu pomocných bodů uvádí Reddy *et al.* (2005), kteří klouzání bodů nahradili projekcí na rovinu ortogonální k tečně v původním bodě. Tuto metodu označili jako neuniformní standardizace křivky (anglicky *nonuniform curve relaxation*).

Fourierova analýza

Fourierova analýza nese svoje jméno po francouzském matematikovi Jeanu Baptistu Josephu Fourierovi (1763-1830). V rámci metod analýzy tvaru spadá Fourierova, také harmonická nebo spektrální, analýza do skupiny metod analýzy obrysů. Základní charakteristikou metoda je, že nepracuje s význačnými body. Interpretace tvaru je podmíněna interpolací vstupních dat do matematické funkce. Z tohoto důvodu není některými autory řazena mezi metody geometrické morfometrie (Mitteroecker, Gunz 2009). Na druhé straně metodám analýzy význačných bodů je vytýkán důraz na uzlové oblasti tvaru, který neřeší potenciální strukturální rozdíly, které nacházejí v oblasti mezi význačnými body a jejichž výběr nemusí vždy splňovat nároky, které si komplexita popisu tvarových změn žádá.

Fourierova analýza je zproštěna povinnosti hledat místa, ve kterých jsou si objekty vzájemně homologní. Metoda bere v úvahu obrys jako kontinuální křivku nikoliv jako konfiguraci nezávislých diskretních bodů.

Studovaný tvar se tak stává funkcí zakřivení obrysu. Vstupními daty je opět sada těsně sousedících bodů rozmístěných na siluetě tvaru. Body však slouží pouze jako lokální quasi-kontinuální odhady tvaru a polohy objektu v prostoru, do nichž je vkládána vyhlazovací funkce. Body tedy neslouží jako primární ukazatele tvaru, jak je tomu u analýzy význačných bodů nebo u pomocných klouzavých bodů, ale pouze jako vodítka matematické transformace, která tyto ukazatele poskytně.

Podobně jako v analýze tvaru „s body“ jsou tvarové rozdíly metod analýzy obrysů měřeny s ohledem na referenční tvar. V případě Fourierovy analýzy však referenční tvar neodráží složení zkoumaného souboru ani účely analýzy, ale je určen geometrickou entitou s přesným matematickým vyjádřením (sinusovka).

Obecně je Fourierova analýza založena na vztahu, ve kterém je kontinuální tvar uzavřeného nebo otevřeného obrysu objektu rozložen do série čísel neboli koeficientů, v jejichž hodnotách je zastoupena vizuální informace o tvaru. Matematickou podstatou Fourierovy analýzy je Fourierova transformace:

$$f(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)$$

, kde A_0 je konstanta, a_n a b_n jsou koeficienty a θ je fázový úhel.

Pomocí této periodické funkce je prostorová informace o tvaru přeložena do nekonečně dlouhého rozvoje aditivních hierarchicky uspořádaných výrazů obsahujících funkce sinus a kosinus o vzrůstající frekvenci. Tyto výrazy označujeme jako harmonické a vyšší harmonické proměnné. Každá harmonická proměnná je v rozvoji vážena hodnotou tzv. Fourierova koeficientu. Jelikož jsou harmonické proměnné shodné pro všechny popisované objekty, je to právě hodnota Fourierova koeficientu, která určuje, jaký tvar je ve skutečnosti popisován a jakou mírou přispívá daný výraz do celkového vyjádření. Platí, že harmonické proměnné s nižším pořadovým číslem odkazují na celkové tvarové rozdíly. Naopak harmonické proměnné s vyšším pořadovým číslem popisují jemnější odchylky a nepravidelnosti ve tvaru. Vliv harmonických proměnných se načítá v pořadí od první po poslední. Z toho vyplývá, že přidáním další harmonické proměnné se kvalita popisu zlepšuje.

U detailního popisu nepravidelné komplexní struktury je potřeba mít na mysli, že s počtem harmonických proměnných neodvratně roste objem výstupních dat. Snaha o maximální přesnost popisu se tak střetává s nároky na hardwarové vybavení počítače a také na čas a prostředky pro interpretaci velkého objemu numerických dat. V praxi se proto stává, že převládne pragmatický přístup nad potřebou detailnějšího popisu. Může se mimojině stát, že harmonické proměnné s vysokým pořadovým číslem zachytí vedle interpretovatelné (biologické) informace také nechtěný metodický „šum“.

Postup, s jakým se vypořádát s problémem optimálního počtu proměnných, se liší případ od případu a neexistuje žádné přesně dané pravidlo určující, jaký by měl být ideální počet. V pracích s biologickým zaměřením se často objevuje hodnota dvaceti (Lestrel, Roche 1979, Ferson *et al.* 1985, Lestrel 1989, Le Minor, Schmittbuhl 1999, Viguier, Tort 2000) nebo třiceti (Baylac, Frieß 2005) harmonických proměnných. V konečné fázi je to ale vždy na rozhodnutí samotného badatele, jak si nastaví optimální práh s ohledem na přesnost popisu a snesitelnou dávku ztráty dat o tvaru.

Ačkoliv Fourierova transformace může nabývat nekonečného počtu harmonických proměnných, skutečné množství harmonických proměnných, které je možné vygenerovat pro jeden tvar, je omezené. Fourierova analýza se řídí tzv. Nyquistovým kritériem (také kritériem Nyquistovy frekvence), které vyžaduje, aby počet proměnných v rozvoji nepřekročil polovinu z celkového počtu bodů, kterými je tvar zastoupen (Lestrel, Huggare 1997). Obrys zastoupený k -počtem bodů je proto popsitelný $k/2$ harmonickými proměnnými, pokud je k sudé číslo nebo $(k-1)/2$, pokud je k liché číslo.

V průběhu posledních 30 let se zformovalo několik přístupů, jež využívají teoretické základy Fourierovy transformace při popisu tvaru. Za původní lze považovat tradiční nebo také konvenční Fourierovu analýzu, na kterou navázala její modifikace s názvem eliptická Fourierova analýza (EFA). Název metody odkazuje na základní tvar analýzy, kterým je elipsa. EFA kompenzovala zásadní nedostatky svého předchůdce, které lze shrnout do následujících bodů: 1) popis obrysu se děje výhradně v systému polárních souřadnic, 2) polární souřadnice musí nabývat pouze jedné jediné hodnoty, 3) střed gravitace (centroid obrysu) se musí shodovat se systémem souřadnic.

Tradiční přístup byl i přes tyto nedostatky velice efektivní, jak dokládají práce z 60. a 70. let minulého století (Lu 1965, Lestrel, Brown 1976, Lestrel, Roche 1979). U složitějších tvarů s komplikovaným průběhem se však stávalo, že k jednomu danému úhlu byl přiřazen více než jeden bod. Inovace tradiční Fourierovy analýzy za prvé zasadila popis tvaru do systému kartézských souřadnic a za druhé parametricky vyjádřila polohu bodů obrysů oddělením hodnot pro osu x a osu y se společnou proměnnou t vyjadřující polohu bodu na křivce. Tvar obrysu je tak vyjádřen dvěma na sobě nezávislými funkcemi, což zajistí, aby body složitějšího tvaru nabývaly vždy unikátních hodnot (Kuhl, Giardina 1982).

Parametrické vyjádření eliptické Fourierovy analýzy pro rovinné 2D objekty má podobu:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt) + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin nt)$$

$$y(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \cos nt) + \sum_{n=1}^{\infty} (d_n \sin nt)$$

Popisujeme-li tvar 3D křivky, je připojena rovnice pro z-osu:

$$z(t) = E_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (e_n \cos nt) + \sum_{n=1}^{\infty} (f_n \sin nt)$$

Uvádíme-li nadstavbu parametrického vyjádření pro 3D data, je nutné doplnit důležitou skutečnost, na kterou se často zapomíná. 3D Fourierova analýza není popis dat zastupující povrch struktury, ale výhradně analýza křivky nebo u zavřeného obrysu umístěného v trojrozměrném prostoru.

Alternativa pro 3D povrchy (polygonální modely) je založena na sférických harmonických proměnných (SPHARM). Četnost těchto analýz vzrostla s aplikacemi virtuálního modelování (s podporou optických nebo laserových skenerů nebo s asistencí počítačového tomografu) v přírodních i humanitních oborech (Grosman *et al.* 2008). Princip metody je analogií tradiční 2D Fourierovy analýzy. Popis vychází ze základního tvaru, kterým je koule, a každý bod povrchu struktury je popsán amplitudou a dvěma úhly od středu systému souřadnic (Shen *et al.* 2009).

Standardizace

Také u metod analýzy obrysů je standardizace prostorových a velikostních rozdílů mezi objekty klíčovým bodem celého postupu. Ačkoliv o významu úpravy dat není pochyb, z hlediska technického provedení je univerzální standardizační postup stále nejednoznačným a otevřeným problémem. Je obecně známo, že Fourierova analýza je velice citlivá na bod, od kterého začíná numerický popis křivky a současně na orientaci křivky v prostoru, respektive ve zvoleném systému souřadnic. I nepatrné rozdíly v jedné z podmínek mohou výrazně ovlivnit kvantifikaci tvaru i výslednou interpretaci (Haines, Crampton 2000). Volba standardizačního postupu se může odvíjet od způsobu, jakým byla záznamenána vstupní data. Vytvoření protokolu pomůže zajistit potřebnou konzistenci dat nebo usnadnit některý z následných kroků standardizace. Například umístění počátku digitalizace křivky do místa výskytu význačného bodu zaručí shodný počáteční bod pro všechny zaznamenané obrysy. Analýza obrysů má však být alternativou pro objekty, které postrádají význačné body, proto může být i tato podmínka u řady objektů těžko splnitelná. Ze stejného důvodu nelze aplikovat ani prokrústovkou superpozici.

Kuhl a Giardina (1982) navrhli vedle parametrického vyjádření Fourierovy transformace také dva způsoby, jakými je možné docílit standardizace dat pro eliptickou Fourierovu analýzu. První způsob orientuje všechny objekty v analýze tak, aby hlavní osa první elipsy byla orientována rovnoběžně nebo shodně s hlavní osou. Úhel, o který je otočena osa elipsy první harmonické proměnné (fázový úhel) tímto způsobem transformované kontury, je roven nule. Druhý způsob standardizace dat je orientace obrysů do polohy, ve které je počáteční bod u všech objektů v analýze shodný.

Standardizace trojrozměrných dat je otázkou mnohem složitější, které v podstatě schází univerzální řešení

podobné tomu pro 2D obrysy. Navrženo bylo východisko využívající 3D Zernikovy momenty a deskriptory (Novotni, Klein 2004) i klíčové body podobné význačným bodům prokrústovské superpozice. Shen *et al.* (2009) popisují standardizaci 3D modelů pro aplikaci sférických harmonických proměnných. V první fázi začíná postup podobně jako prokrústovská analýza. Registraci několika význačných bodů, které na povrchu můžeme rozeznat, je na základě kritéria nejmenších čtverců ustavena hrubá homologie srovnávaných struktur. Poté přechází standardizace na úroveň bodů, kterými je popsán tvar 3D povrchu. Těmito body jsou vrcholy (vertexy) polygonů virtuálního modelu. Každé dva polygony, jejichž vrcholy dosahují stejných úhlů od počátku systému souřadnic, jsou označeny jako homologní.

Vedle standardizace polohy v prostoru je druhým základním předpokladem kontrola velikostní složky variability, jež by mohla zastřít skutečné tvarové rozdíly. Nejpoužívanějším měřítkem velikosti a zároveň faktorem standardizace bývá obsah plochy ohraničené obrysem, obsah elipsy první harmonické proměnné nebo obvod obrysu. Před použitím obvodu jako měřítka velikosti je však důležité varovat u objektů, které se liší přítomností invaginací nebo jejich počtem. Rozdílná délka obvodu v těchto případech vede k rozdílným hodnotám tvarových proměnných.

Tvarové proměnné Fourierovy analýzy

Na rozdíl od doposud představených postupů Fourierova analýza poskytuje objektivní číselné vyjádření tvaru, které nezávisí na tvaru referenčního objektu ani na variabilitě tvarů uvnitř souboru. Tvarové proměnné jsou nezávislé a u stejných tvarů nabývají vždy stejných hodnot. Transformací dat dochází dále k potřebné redukci vstupních dat, protože objem získaných tvarových proměnných je nižší než počet vstupních souřadnic (Kaesler 1997).

Transformace vstupních dat poskytuje 4 základní typy výstupů: Fourierovy koeficienty, konstanty, fázové úhly a amplitudy. Koeficienty slouží jako váhy opakovaných výrazů harmonických proměnných a jejich celkový počet je přímo závislý na typu Fourierovy analýzy, počtu dimenzí a standardizaci dat. Tradiční Fourierova analýza vychází primárně z dvourozměrných dat popsaných úhlovými souřadnicemi a pro každou harmonickou proměnnou poskytuje dvě hodnoty: koeficient a, koeficient b.

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{\infty} \left(R_0 \cos \frac{2\pi n}{N} \right)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{\infty} \left(R_0 \sin \frac{2\pi n}{N} \right)$$

Aplikací parametrické korekce a přesunem popisu do kartézského systému souřadnic se u eliptické Fourierovy analýzy zvyšuje počet proměnných na 4 Fourierovy koeficienty (a,b,c,d) pro každou harmonickou proměnnou u rovinného obrysu a o další dva, celkem tedy 6 Fourierových koeficientů (a,b,c,d,e,f) u křivky v trojrozměrném prostoru.

$$a_n = \frac{2}{2\pi n^2} \sum_{p=1}^q \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} [(\cos(nt_p) - \cos(nt_{p-1}))]$$

$$b_n = \frac{2}{2\pi n^2} \sum_{p=1}^q \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} [(\sin(nt_p) - \sin(nt_{p-1}))]$$

$$c_n = \frac{2}{2\pi n^2} \sum_{p=1}^q \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} [(\cos(nt_p) - \cos(nt_{p-1}))]$$

$$d_n = \frac{2}{2\pi n^2} \sum_{p=1}^q \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} [(\sin(nt_p) - \sin(nt_{p-1}))]$$

$$e_n = \frac{2}{2\pi n^2} \sum_{p=1}^q \frac{\Delta z_p}{\Delta t_p} [(\cos(nt_p) - \cos(nt_{p-1}))]$$

$$f_n = \frac{2}{2\pi n^2} \sum_{p=1}^q \frac{\Delta z_p}{\Delta t_p} [(\sin(nt_p) - \sin(nt_{p-1}))]$$

Vedle koeficientů poskytuje analýza hodnoty konstant, A_0 pro tradiční a A_0 , C_0 , E_0 pro eliptickou alternativu. Konstanta je definována jako průměrná hodnota všech vstupních dat. V parametrickém vyjádření zastupuje pozici centroidu obrysu v systému souřadnic, A_0 pro hodnotu na ose x, C_0 pro hodnotu na ose y a E_0 pro hodnotu na ose z (je-li brána v úvahu). V tradiční Fourierově analýze je konstanta A_0 rovna poloměru kruhu vepsaného do popisovaného obrysu (nulová harmonická proměnná) (Hammer, Harper 2006).

Každá harmonická proměnná je dále charakterizována hodnotou amplitudy a fázového úhlu. Amplitudu můžeme chápat jako ukazatel vlivu, jaký má daná harmonická proměnná na celkový tvar. Jinak řečeno určuje, jak moc se signál o dané frekvenci projevuje v tvaru struktury. U většiny organických tvarů klesají hodnoty amplitud po několika prvních harmonických proměnných. Je to dáno výskytem tvarů bez ostrých hran a přechodů, které v přírodě obvykle nacházíme. Matematické vztahy pro výpočet amplitudy tradiční, 2D eliptické a 3D eliptické Fourierovy analýzy jsou buď vyjádřeny odděleně pro jednotlivé osy nebo jsou kombinovány do jednoho vyjádření (Navarro *et al.* 2004):

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$A_n = \sqrt{(a_n + c_n)^2 + (b_n + d_n)^2} \text{ nebo } A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2 + c_n^2 + d_n^2}$$

$$A_n = \sqrt{(a_n + c_n + e_n)^2 + (b_n + d_n + f_n)^2} \text{ nebo } A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2 + c_n^2 + d_n^2 + e_n^2 + f_n^2}$$

Fázový úhel určuje orientaci hlavní osy dané harmonické proměnné. Podle Lestrela (1997) hraje důležitou roli v popisu struktur, které se liší v pozici počátečního bodů křivky.

Teorie a matematická podstata prostoru tvarových proměnných je u Fourierovy analýzy narušena nedostatkem nebo úplnou absencí význačných bodů, jež by spoluvytvářely Kendallův prostor nebo jakoukoliv jeho analogii (Zelditch *et al.* 2004). V úvahu musíme brát fakt, že Fourierovy koeficienty, ačkoliv relevantní tvarové proměnné, netvoří Kendallův prostor tvarových proměnných, tak jak byl vysvětlen u prokrústovské analýzy. Hierarchický způsob výpočtu harmonických proměnných navíc kompromituje vzájemnou nezávislost a ve svém důsledku vede k nežádoucí korelaci, jež omezuje další statistické zpracování. Pořadí výrazů zvyšuje první harmonickou proměnnou a znevýhodňuje diskriminační možnosti detailů popsanych harmonickými proměnnými s vyšším pořadovým číslem (Haines, Crampton 2000).

Někteří autoři (Schmittbul, Le Minor) upřednostňují při popisu tvaru před Fourierovými koeficienty použi-

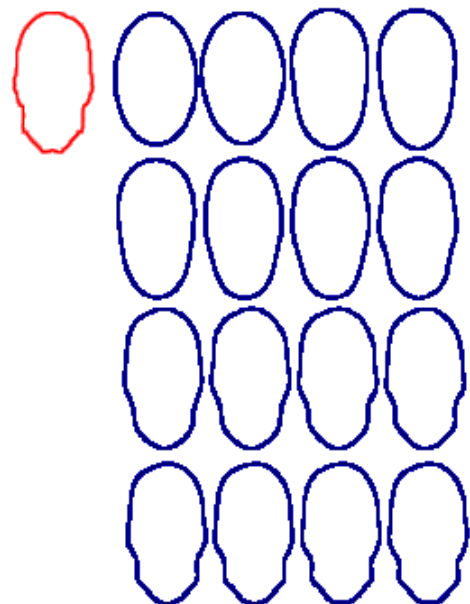
tí amplitudy a fázového úhlu, které dohromady označují jako Fourierovy deskriptory. Tento postup usnadňuje interpretaci aditivního příspěvku každé harmonické proměnné k celkovému tvaru obrysu. Sami autoři aplikovali tento postup na celou řadu anatomických struktur od morfologie distálního konce kosti stehenní (Le Minor, Schmittbul 1999), přes konturu dolní čelisti v laterálním pohledu (Schmittbul *et al.* 2001, Schmittbul *et al.* 2002) až po tvar okraje očníce (Schmittbul *et al.* 1999). Již v 80. letech však Bookstein a Rohlf (1986) kritizovali použití Fourierovy analýzy a její nejednoznačnost, pokud nejsou zahrnuty informace o fázovém úhlu a interpretace zahrnuje výhradně hodnoty amplitud.

Nevýhody a omezení

Fourierova analýza je účinný nástroj pro kvantitativní popis tvaru, ale ani ona není ušetřena omezení, které pramení především z matematické podstaty, která Fourierovu transformaci řadí mezi vyhlazovací funkce. V důsledku toho je Fourierova analýza zaměřena především na popis globálních rozdílů ve tvaru. Často se však stává, že cílem studie je popsat vedle celkových rozdílů i jemné nuance na vyšší úrovni rozlišení. Jakmile však popisovaná struktura začne vykazovat nepravidelné tvarové prvky, lokální odchylky ve směru nebo náhlé invaginace, schopnost harmonických proměnných s nižším pořadovým číslem zachytit tyto nepravidelnosti se vytrácí. Navýšení počtu harmonických proměnných může zvýšit přesnost popisu, ale současně s tím neodvratně narůstá objem numerických výstupů. V odborné literatuře se tomuto jevu říká Pinocchiov efekt.

Typickým příkladem takového náhlého přerušení průběhu křivky je přítomnost čelního nebo nadočnicového zářezu, případně obou (*incisura frontalis*, *incisura supraorbitalis*) v horní části kostěného okraje očníce. V případě popisu tvaru eliptickou Fourierovou analýzou bude zářez nebo zářezy ignorovány prvními harmonickými proměnnými, ale ovlivní vlastnosti první elipsy, která má v popisu tvaru nejvyšší prioritu.

Dalším důležitým nedostatkem je skutečnost, že Fourierova transformace není schopna podat informaci o přesné poloze požadované struktury. Ve fyzice je tento jev označován jako Heisenbergův princip neurčitosti dvou konjugovaných veličin. Princip říká, že čím přesněji určíme jednu proměnnou, tím více ztrácíme přehled o druhé. Na Fourierovu analýzu se princip vztahuje ve formě neurčitelnosti času a frekvence. Je-li kontinuálně zvyšována frekvence (počet harmonických proměnných), pak čas (poloha na obryse) není zachycen. Z pohledu analýzy obrysů to znamená, že tvarové proměnné jsou schopny určit, že dva tvary jsou skutečně rozdílné, ale již neurčí, které z bodů se na variabilitě podílejí. V technických oborech, které Fourierovu transformaci využívají především, je tento nedostatek kompenzován tzv. diskrétní nebo okénkovou Fourierovou transformací. Obrys je rozdělen do menších oken, částí křivky, které jsou popsány samostatně a tímto způsobem blíže lokalizují případné struktury. Z pohledu studia biologických věd by byl tento přístup užitečný pouze tehdy, pokud bychom nepožadovali informaci o globálních aspektech tvaru (Chatfield 1989). Odlišné řešení navrhuje Dhurjati *et al.* (2005). Podél popisované kontury rozmístili kontrolní body, které slouží jako vodítka pro prostorovou orientaci na křivce. Body, které nazvali OCC (anglicky *outline characteristics curves*), korespondují s lokálními extrémy v zakřivení, shodují se tak s definicí význačných bodů Booksteinova typu III. Použitelnost tohoto postupu však závisí na přítomnosti takových lokálních extrémů na křivce. Jiné východisko nabízí propojení Fourierovy a vlnkové analýzy (Lestrel *et al.* 2005).



Obr. 3. Schéma demonstrující aditivní efekt harmonických proměnných. Tvar lebky člověka ve frontálním pohledu je rekonstruován na základě vzrůstajícího počtu harmonických proměnných (1-20).

STATISTICKÁ ANALÝZA TVAROVÝCH PROMĚNNÝCH

Třetím bodem analýzy tvaru je statistická analýza tvarových proměnných. Kvantitativní postupy poskytnou číselné vyjádření tvaru, ale postavení tvarových proměnných nemá význam, dokud nejsou zahrnuty do kontextu řešeného problému.

Jak bylo zdůrazněno, nelineárnost prostoru tvarových proměnných a silná vazba mezi proměnnými představují hlavní překážky bezproblémového testování metodami jednorozměrné nebo vícerozměrné statistiky. Řešení poskytují neparametrické postupy, které nejsou vázány postulátem lineárních vztahů. Z nich permutační a randomizační testy, jako je bootstrapping, permutační test nebo Goodallův F-test byly navrženy jako vhodné způsoby testování hypotéz rozdílů průměrných tvarů (na základě prokrústovských reziduí) nebo šíře variability (na základě prokrústovských vzdáleností) mezi skupinami.

Prokrústovská rezidua představují vektory posunu význačného bodu mezi konfiguracemi průměrného a pozorovaného tvaru a mohou sloužit jako měřítko podobnosti mezi tvarem objektu A a objektu B, například pokud je podobnost vyjádřena jako úhel mezi relevantními vektory (Neustupa, Skaloud 2007). Stejným způsobem mohou posloužit vzdálenosti mezi objekty v zakřiveném prostoru tvarových proměnných. Prokrústovské vzdálenosti jsou parametrem odlišnosti nebo podobnosti dvou různých tvarů. V tomto duchu mohou být použity jako měřítko pro posouzení rozdílů mezi skupinami i jako ukazatel variability uvnitř skupiny nebo metodickými postupy (Foote 1992, Foote 1997, Neustupa, Němcová 2007). Podobný koeficient lze spočítat také pro skupiny tvarů srovnávané Fourierovou analýzou. Označuje se jako koeficient harmonické proměnné a bere v úvahu amplitudy a fázové úhly všech harmonických proměnných (Kaesler 1997).

$$DH_{jk} = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{I=1}^N [(c_{ij} \cos \varphi_{ij} - c_{ik} \cos \varphi_{ik})^2 + (c_{ij} \sin \varphi_{ij} - c_{ik} \sin \varphi_{ik})^2]}$$

Druhým řešením problému nelinearity je transformace proměnných tak, aby byly splněny podmínky pro následnou aplikaci parametrických testů. Pro tento účel byly navrženy tři možné postupy. Všechny tři jsou známější pod zkratkami odvozenými z anglických názvů – PCA (*Principal Components Analysis*, analýza hlavních komponent), CVA (*Canonical Variates Analysis*, kanonická analýza) a TPS (*Thin-Plate Spline*, metoda tenkých ohebných plátek). Zatímco analýza hlavních komponent a kanonická analýza jsou dobře známé metody vícerozměrné statistiky, metoda tenkých ohebných plátek vychází výhradně z metodiky geometrické morfometrie (Bookstein 1997, Slice 2007). Základní princip převodu proměnných do lineárního prostoru je u všech tří metod shodný. Ve své podstatě se jedná o projekci vícerozměrného prostoru tvarových proměnných na tangenciální rovinu umístěnou v bodě, ve kterém se nachází průměrný tvar všech tvarů v souboru.

Analýza tenkých ohebných plátek

Metodika tenkých ohebných plátek původně vysvětlovala mechanické chování kovových desek pod tlakem ve fyzice a v kvantitativní analýze tvaru našla široké uplatnění především zásluhou nabídky lehce ovladatelných a přístupných programových aplikací pro analýzu 2D dat, jejichž akvizice neklade větší nároky na vybavení ani na hlubší znalosti analýzy tvaru (Bastir, Rosas 2002, Pretorius *et al.* 2005, Corti *et al.* 2001).

Koncepcí metody tenkých ohebných plátek je vystavěna na přirovnání změny mezi dvěma různými tvary k deformaci ideálního nekonečně velikého a tenkého plátu nebo plátů s minimálním odporem na požadovaný tvar (tj. na tvar zkoumaného objektu). Energie, která musí být vynaložena na vytvarování objektu, se označuje jako deformační energie. Při srovnání dvou objektů je to množství energie, které by byla vynaložena na změnu jednoho tvaru v druhý. Nejdříve jsou tvary již standardizované zvolenou technikou (prokrústovská analýza, booksteinovské tvarové souřadnice aj.) srovnány s tvarem referenčním (konsensus nebo jiný

zvolený tvar) a rozdíly mezi nimi jsou vyjádřeny vzdálenostmi mezi relevantními význačnými body konfigurace. Poté jsou pomocí transformační funkce rozdíly přepočítány na hodnoty deformační energie. Tvarová změna, jejíž deformační energie je rovna nule se označuje jako afinní (lineární, uniformní) deformace. Souhrn těchto transformací se označuje jako afinní komponenta tvarových rozdílů. Při afinní deformaci dochází k synchronnímu posunu skupiny bodů v jedné rovině. Konfigurace bodů se mění tak, že si pomyslný plát zastoupený deformační čtvercovou mřížkou zachovává rovinný charakter a paralelnost linií mřížky není porušena. Všechny ostatní deformace měnící průběh linií mřížky nabývají nenulové hodnoty deformační energie a označují se jako neafinní (nelineární, neuniformní) a dohromady určují neafinní komponentu tvarové změny.

Uniformní (afinní) transformace jsou operace s geometrickými vlastnostmi objektů, které nemění tvar objektu (lineární transformace), kam patří posun, otočení, změna měřítka, a které mění tvar, například disproporční změny velikosti (patří zde zkosení, ale již ne projekce), ve kterých se body mění svoji polohu ve směru os pravouhlých souřadnic.

Matici deformační energie (neafinní tvarové změny) lze kombinovat do sady nových tvarových proměnných. Rozklad je vyjádřen hodnotami vlastních čísel, vlastních vektorů a hodnotami skóre, podobně jako u jiných ortogonálních projekcí (PCA, CVA). Ortogonální vlastní vektory matice deformační energie nesou označení hlavní varpy. Představují komponenty tvarové variability, jejichž účinek je vzhledem k celkovému tvaru aditivní a klesá se vzrůstajícím pořadovým číslem hlavní varpy (podobně jako harmonické proměnné Fourierovy analýzy). Platí, že hlavní varpy s nižším pořadovým číslem odpovídají změnám, které jsou globálního charakteru. S pořadovým číslem narůstá i míra „lokálnosti“ popsání změny. Projekce tvaru na hlavní varpu se označuje jako vedlejší varpa a její hodnota se označuje jako skóre vedlejší varpy (vedlejší varpy jsou v podstatě váhy hlavní varpy pro osu x a osu y). Skóre určuje, jaká část hlavní varpy je nutná k deformaci referenčního tvaru (konfigurace) do tvaru cílového. Čím vyšší je hodnota skóre, tím větší a lokálnější energie musí být vynaložena. Kombinace hodnot vedlejších varp přiřazuje každému tvaru unikátní místo v prostoru tvarových proměnných. Jejich vliv není vzájemně nezávislý. Hlavní varpy však mezi sebou významně korelují a stojí-li samostatně, nedávají smysl. Jejich význam jako deskriptivního nástroje pro kvantifikaci tvaru je smysluplný pouze jako celek (Rohlf 1998).

Ortogonální vlastnosti dílčích varp jsou určeny geometrií hlavních varp a nezávisí na kovarianci význačných bodů studovaného souboru. Podobně jako jsou vlastnosti prostoru tvarových proměnných úzce svázány s průměrnou konfigurací, je metoda tenkých ohebných plátek spojena s volbou referenční konfigurace. Změna referenční konfigurace vede ke změně jak matice deformačních energií, tak hodnot dílčích varp.

Z historického hlediska je zajímavé, že metoda původně neměla jiné ambice než být matematickým vyjádřením myšlenek D'Arcyho Thompsona o transformační mřížce. Ortonormalita metody, odhalená mnohem později, byla pouhým vedlejším produktem geometrie tenkých ohebných plátek (Bookstein 1997).

Nevýhody, které přináší vzájemná korelace hlavních i vedlejších varp, pro aplikaci konvenční vícerozměrné statistiky, jsou řešeny v podobném duchu jako ustavení lineárních vztahů v Kendallově prostoru, tedy projekcí na ortogonální vlastní vektory. Až na některé drobné odchylky odpovídá toto řešení analýze hlavních komponent, zde označované jako analýza relativních varp. Vstupní proměnné jsou kombinovány do nových proměnných tak, aby popsaly co největší podíl celkové variability souboru.

Nové tvarové proměnné, tzv. relativní varpy, jsou vzájemně ortogonální, nezávislé a je možné je postoupit do standardních postupů vícerozměrné statistiky. Rozdíly mezi analýzou relativních varp a analýzou hlavních komponent se týkají podoby vstupní kovarianční matice. Do analýzy může vstupovat matice deformační energie (s afinní komponentou) nebo matice dílčích varp (bez afinní komponenty). Vedle toho lze nastavit, jakým deformacím (pokud nějakým) bude dána vyšší priorita. Váha tvarové komponenty je určena hodnotou koeficientu alfa. Pokud je hodnota koeficientu alfa rovna 1, pak jsou vstupní varpy váženy převrácenou hodnotou odmocniny své vlastní hodnoty a větší důraz je kladen na globální rozdíly mezi tvary. Po-

kud je koeficient alfa nastaven na hodnotu -1, pak jsou preference soustředěny do lokálních rozdílů, které vyžadují vyšší hodnotu deformační energie. Při hodnotě nula se z analýzy relativních varp stává standardní analýza hlavních komponent. V tomto případě jsou vzdálenosti mezi tvary v prostoru relativních varp shodné se vzdálenostmi danými původními souřadnicemi význačných bodů (Rohlf, Marcus 1993). Znamená to, že rozložení tvarů v tomto prostoru přímo odráží vztahy dané euklidovskými vzdálenostmi. Z tohoto důvodu se dává přednost nulové hodnotě. Přesto existují případy, u kterých nastavení hodnoty koeficientu usnadňuje interpretaci výsledků. Například při výzkumu alometrického růstového gradientu se doporučuje nastavit kladné hodnoty koeficientu, protože alometrické vztahy obvykle operují na nižší hladině rozlišení (Pavlinov 2001).

Vedle statistických výhod se TPS používá také jako matematický základ pro grafickou vizualizaci výsledků. Interpoláční funkce, která slouží pro výpočet deformační energie, může být graficky znázorněna jako transformační mřížka. Graficky je tak znázorněn nejen posun ve zvolených význačných bodech, ale na základě interpolace jsou odhadnuty také změny, které probíhají v těch oblastech objektu, které nebyly popsány význačnými body (např. ty části objektu, kde body nelze správně definovat nebo které se nezachovaly).

Analýza hlavních komponent

V převážné většině analýz tvaru je analýza hlavních komponent přímým pokračováním kvantitativního vyjádření tvaru. Analýza hlavních komponent patří do skupiny vícerozměrných metod. Poskytuje informace o parametrických vlastnostech a složení studovaného souboru a současně snižuje vysoký počet dimenzí vstupních dat. Na základě vstupní korelační nebo kovarianční matice hledá analýza nové hypotetické proměnné, jež označujeme jako hlavní komponenty. Hlavní komponenty jsou ortogonálními lineárními kombinacemi vstupních proměnných. Obě tyto vlastnosti jsou plně využívány v analýze tvaru. Počet tvarových proměnných (Fourierovy koeficienty, prokrústovské souřadnice, dílčí varpy atd.) je obvykle nepřiměřeně vysoký a vlastnosti, se kterými do analýzy vstupují (korelace, nelinearita), brání použití parametrických testů.

Původní tvarové proměnné z vícerozměrného prostoru jsou promítnuty na rovinu první a druhé komponenty tak, aby při projekci bylo ztraceno co nejméně prostorových informací o variabilitě studovaných objektů. Každá z komponent je charakterizována vlastním vektorem a vlastním číslem. Vlastní číslo vyjadřuje, jaká procentuální část z celkové variability je danou komponentou vysvětlována. Vlastní čísla klesají se vzrůstajícím pořadovým číslem hlavní komponenty. V ideálních případech je většina pozorované variability (např. 90% a více), jenž je zároveň snadno interpretovatelná, soustředěna do hodnot několika prvních komponent. Často se stává, že hodnoty pro komponenty s vyšším pořadovým číslem se mezi sebou liší nepatrně a vysvětlují spíše metodický šum než smysluplné tvarové rozdíly. Smysluplnost komponenty je určena buď danou hraniční hodnotou, např. Jolliffého hraniční hodnota (Jolliffe 1986) nebo podílem variability, kterou komponenta vysvětluje. Jako smysluplné neboli efektivní považujeme takové hlavní komponenty, které vysvětlují podíl variability vyšší než, jaký na ně proporčně připadá.

Vlastní vektory určují vztahy mezi komponentou a původními vstupními daty. Vedle hodnot vlastních vektorů charakterizují komponenty také hodnoty váh a korelací. Váha je hodnota, jakou daná tvarová proměnná přispívá do hodnoty hlavní komponenty a korelace je vztah mezi hlavní komponentou a tvarovou proměnnou vyjádřený hodnotou Pearsonova korelačního koeficientu.

Ačkoliv je použití analýzy hlavních komponent nebo její modifikace – analýzy relativních varp běžným postupem, při interpretaci bychom si měli uvědomit, že PCA je primárně explorační technikou a ačkoliv redukce dimenzí dat je vítaným řešením u objemných výstupů analýzy tvaru, ale stále se jedná o postup, jehož cílem je maximální popis variability v souboru a není automatickou odpovědí na testované hypotézy.

Kanonická analýza

Kanonická analýza je třetím postupem, kterým tvarové proměnné promítnuty na tangenciální rovinu. Analýza hlavních komponent se podobá v tom, že definuje nové nezávislé ortogonální proměnné. Avšak rotace

objektů není určena směrem maximálních rozdílů v souboru, ale tak, aby první kanonická proměnná vyjadřovala maximální rozdíly mezi *a priori* definovanými skupinami a zároveň minimální rozdíly uvnitř těchto skupin. Počet výstupních os není dán množstvím vstupních proměnných, které do analýzy vstupují, ale počtem definovaných skupin v souboru. Výsledný počet kanonických os vychází ze vztahu $N-1$, kde N je počet definovaných skupin. Prakticky to znamená, že pokud chceme zjistit, jaký je vzájemný vztah tří skupin, analýza nám poskytne hodnoty dvou kanonických proměnných. Hodnoty hlavních komponent i kanonických proměnných se označují jako skóre a podle potřeby je lze dále testovat jednorozměrnými i vícerozměrnými statistickými testy. U Fourierovy analýzy, jejíž výstupy splňují podmínky linearit a odpadá tak potřeba tyto vztahy ustavovat, je kanonická analýza také vhodnou klasifikační metodou (Renaud 1996, Monti *et al.* 2001).

Na rozdíl od analýzy hlavních komponent kanonické osy nejsou ortogonální a podmínkou analýzy je homogenita kovariančních matic skupin, které vstupují do analýzy. Opatrně by se kanonická analýza měla používat v případech, ve kterých se počet tvarových proměnných blíží počtu zkoumaných objektů v souboru. (Mitteroecker, Gunz 2009).

Kanonická korelační analýza a parciální analýza nejmenších čtverců

Kanonickou korelační analýzu (CCA) můžeme *de facto* považovat za nadstavbu analýzy hlavních komponent pro dvě rozdílné skupiny znaků. Metoda snižuje počet dimenzí dat tak, že hledá lineární kombinace jedné skupiny a k ní přiřazuje lineární kombinace druhé skupiny, které s nimi budou maximálně korelovat. Nové kanonické proměnné (opět 2 sady) jsou ortogonální a uvnitř „své“ sady nových proměnných jsou nezávislé.

V geometrické morfometrii se kanonická korelační analýza využívá v případech, kdy jsou jedinci jednoho souboru popsány z hlediska dvou tvarově odlišných struktur, například je dána do souvislosti morfologie obličejů s morfologií ruky nebo morfologie pánve a lebky. Kanonická korelační analýzy předpokládá, že mezi skupinami znaků existují lineární vztahy a ve vstupních maticích jsou zastoupeni stejní jedinci.

Druhá metoda, parciální analýza nejmenších čtverců (anglicky *partial least squares*, PLS), má podobné vlastnosti jako kanonická korelační analýza, s tou výjimkou, že účelem analýzy není nalézt sady proměnných s maximální korelací, ale pouze s pozorovanou korelací. Současně vztahy mezi proměnnými uvnitř skupin nemusí být lineární (Bookstein 1982), což může ztěžovat interpretaci výstupních proměnných.

Další statistické postupy

Metody analýzy tvaru jsou prováděny obvykle s ohledem na dvě základní koncepce. V první je řešena otázka kvantifikace tvaru nebo tvarů objektu, případně kvantifikace změny jednoho tvaru v druhý. Druhá koncepce, častější v biologických vědách, předpokládá kvantifikaci tvaru pouze jako předstupeň řešení složitějších otázek – srovnání morfologie dvou souborů, výzkum faktorů ovlivňujících morfogenezi struktury, vývojové trendy organismů apod. Použitelnost statistickým technik vystavených s ohledem výzkum takových interakcí je omezena vlastnostmi rozložení tvarových proměnných. Pokud nejsou promítnuty na ortogonální rovinu (TPS, PCA, CVA) není možné tvarové proměnné vystavit testování parametrickými postupy. Shrňme závěry z předchozích kapitol a uvedme, že se tato podmínka týká prokrústovské vzdálenosti, rezidua, souřadnice. Platí také pro hlavní a dílčí varpy z důvodů vzájemných vztahů. Matice prokrústovské vzdálenosti je však vhodným vstupním formátem exploatačních technik jako je shlukovací analýza nebo analýza hlavních koordinát (neplést s analýzou hlavních komponent).

Z neparametrických testů se osvědčilo použití Goodalova F-testu (Goodall 1991), jenž slouží jako náhrada parametrického F-testu testujícího rozptyl hodnot prokrústovské vzdálenosti dvou výběrů proti vnitroskupinové variabilitě, za podmínky, že rozptyl hodnot uvnitř výběru není příliš veliký (Rohlf 2000). Také permutační test shody průměrů dvou výběrů prokázal, že je uspokojivou alternativou parametrických testů. Permutační test netestuje skutečné rozdělení hodnot do dvou skupin, ale přiřazuje pravděpodobnost shody průměrů dvou výběrů na základě náhodného rozdělení jedinců do skupin při vysokém počtu permutací.

Tvarové proměnné, u kterých byly prověřeny patřičné předpoklady (PCs, booksteinové tvarové souřadnice, relativní varpy) lze testovat celou řadou vícerozměrných metod založených na lineárních závislostech s ohledem na cíle studie. Shlukovací analýza a diskriminační analýza jsou tradičními postupy pro oddělení, klasifikaci nebo uspořádání studovaného souboru do skupin. Dále vícerozměrná a vícenásobná regresní analýza tvarových proměnných (PWs, RWs, PCs) na nezávislou kvantitativní nebo kvalitativní proměnnou (pohlaví, velikost, věk) nebo na hodnoty tvarové proměnné početně nezávislé nebo morfologicky související struktury. Regresní analýza je také pomocným nástrojem při interpretaci tvarové změny při projekci tvarů na ortogonální rovinu.

Vícerozměrnou analýzu rozptylu (MANOVA) lze použít pro testování rozdílů tvarových proměnných mezi stupni jednoho nebo více faktorů. Analýza kovariance (ANCOVA, MANCOVA) je vhodným nástrojem pro studium kovariance mezi studovaným tvarem a působícím kvantitativním kovariátem (obvykle velikostním parametrem). Ačkoliv analýza tvaru odděluje alespoň ze statistického pohledu tvarovou a velikostní složku, neznamená to, že tvarové proměnné nemohou vykazovat alometrickou závislost na velikosti (Lockwood *et al.* 2002). Právě použití velikosti, např. velikosti centroidu, jako kovariátu je elegantním způsobem popisu alometrických a nealometrických závislostí.

ALTERNATIVNÍ PŘÍSTUPY K ANALÝZE TVARU

Analýza tvaru prodělala dlouhý vývoj, během kterého se zformovala celá řada přístupů řešících kvantitativního vyjádření tvaru. Některé nenašly své následovníky, jiné byly ve své době populární podobně jako dnes prokrústovská superpozice, metoda tenkých ohebných plátek nebo Fourierova analýza. Zde uvedme některé, které našly širší využití v přírodních či humanitních oborech.

Matice euklidovských vzdáleností

V dnešní terminologii můžeme matici euklidovských vzdáleností (anglicky *Euclidean Distance Matrix*, EDM) klasifikovat mezi metody analýzy význačných bodů nebo metody analýzy lineárních vzdáleností (Richtsmeier *et al.* 2002). Princip metody je založen na výpočtu hodnot lineárních vzdáleností mezi všemi kombinacemi význačných bodů v konfiguraci podle rovnice:

$$D = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

, kde x_i, y_i, z_i

jsou souřadnice i -tého bodu konfigurace a x_j, y_j, z_j jsou souřadnice j -tého bodu konfigurace, i a j mohou nabývat hodnot od 1 po k , kde k je počet bodů jedné konfigurace.

Výpočet euklidovské vzdálenosti z prostorových dat vyžaduje základní znalosti geometrie a lze jej provést v libovolném tabulkovém editoru. Při velkém množství dat se postup může stát velice pracný a zdoluhavý. Funkce pro převod mezi prostorovými daty a lineárními rozměry nabízí řada volně přístupných programů jako je PAST (Hammer *et al.* 2001) nebo TmorphGen6b (<http://www3.canisius.edu/~sheets/morphsoft.html>).

Postupem nejsou tedy zkoumány konkrétní pozice bodů v prostoru, ale pouze velikosti vektorů, které body definují. Jak je známo, vzdálenosti mezi body jednoho objektu zůstávají v reálném světě za stejných fyzikálních podmínek konstantní bez ohledu na konkrétní polohu v prostoru. Během popisu tvarové variability tedy odpadá nutnost standardizace, například registrace tvaru do určité soustavy souřadnic ať už na základě biologických nebo geometrických pravidel, nebo vymezení pozice struktury vůči ostatním srovnávaným tvarům.

Studium tvarových rozdílů s využitím matice euklidovských vzdáleností probíhá ve třech krocích. Nejdříve je vypočítána matice lineárních euklidovských vzdáleností mezi všemi kombinacemi význačných bodů, které popisují jeden objekt (tedy význačných bodů jedné konfigurace). Pro každý analyzovaný tvar popsaný maticí x, y, z souřadnic dostaneme symetrickou matici vzdáleností s hodnotou 0 na diagonále. V následující fázi je srovnána morfologie dvou a více skupin. Srovnání lze provést na základě poměrových nebo rozdílových matic. V prvním případě začíná postup výpočtem průměrné matice ze všech jedinců v dané skupině. Poté jsou každé dvě sobě si odpovídající vzdálenosti průměrných matic dány do poměru. Dvě skupiny sdílejí stejný tvar pouze za předpokladu, že poměry jsou v rámci jednoho takového srovnání konstantní. Druhý postup využívající absolutní rozdíly začíná obdobně jako v předchozím případě, to znamená výpočtem matic vzdáleností pro každou ze skupin v analýze. Relevantní vzdálenosti jsou následně odečteny jedna od druhé. Skupiny se stejným tvarem srovnávané struktury opět poskytují konstantní rozdíly pro všechny vzdálenosti.

Podstata metody založená na skalárních proměnných, tj. lineárních vzdálenostech, se s rozvojem jiných metod stala také jednou z nejpálčivějších slabin. Metoda je v podstatě jen vícerozměrnou nadstavbou tradiční morfometrie a jako taková neposkytuje žádný grafický výstup. Na rozdíl od jiných metod založených na analýze vektorů EDMA neudává, jakým směrem změna o dané velikosti směřuje.

Analýza konečných prvků

Tato technika je někdy klasifikována mezi deformační metody (Richtsmeier *et al.* 2002). Začíná rozdělením objektu na polygony, neboli konečné prvky, jež představují tvarovou jednotku objektu. Počet i tvar polygonů

je *a priori* zvolen tak, aby znázorňovaly hlavní tvarové rozdíly mezi dvěma srovnávanými entitami. Tvar je popsán v souvislosti s prostorovými posuny jednotlivých polygonů, respektive posunem vrcholů, uzlových bodů, z počátečního do cílového tvaru (Kohn *et al.* 1993). Čím větší počet polygonů tím přesnější, ale časově a objemově, náročnější je popis tvaru objektu. Na rozdíl od metody tenkých ohebných plátek, která bere v úvahu změny mezi význačnými body (interpolací funkcí), u analýzy konečných prvků je polygon analýzy konečných prvků brán jako konstantní morfologická jednotka, která nepodléhá deformaci nebo je vystavena pouze uniformnímu typu transformace. Interpretace tvarových změn tak závisí na počtu a složení konečných prvků a změna v obou může vést ke zcela rozdílným výsledkům (Bookstein 1987).

Analýza vlastních tvarů

Metoda náleží do skupiny analýz obrysů, a jak název metody napovídá, analýza vlastních tvarů (anglicky *Eigenshape analysis*) je úzce spjata s postupy vícerozměrné statistiky. Teorii vlastních tvarů lze nejlépe pochopit v terminologii analýzy hlavních komponent (PCA). Analogicky k PCA jsou tvary v souboru uspořádány tak, aby byly zastoupeny lineárními kombinacemi vstupních proměnných na základě struktury kovarianční matice. Podobně jako v analýze hlavních komponent je směr osy vlastního tvaru označován jako vlastní vektor (anglicky *Eigenvector*). Význam, který je ose vlastního tvaru přiřazen se odvíjí od grafické vizualizace teoretických tvarů spojených s hodnotami na příslušné ose.

Vstupními daty pro analýzu jsou pravidelně rozmístěné body podél zkoumaného obrysu. Pro každý z obrysů je mezi body určen tečný úhel se začátkem od předem zvoleného bodu (podobně jako počátek popisu a fázový úhel ve Fourierově analýze). Na základě těchto úhlů je vypočítán vícerozměrný vektor, jehož dimenze dosahují počtu bodů na obryse (pro k -bodů dostaneme k -rozměrný vektor). Vektory jsou následně podrobeny analýze hlavních komponent. Modifikace této základní podoby analýzy vlastních tvarů zahrnují rozšíření metody na otevřené obrysy a kombinování s význačnými body (MacLeod 1999).

Podobně jako Fourierova analýza nebo analýza hlavních komponent je analýzou redukován počet proměnných nutných ke kvantitativnímu popisu tvaru. Nevýhody analýzy vlastních tvarů pramení z citlivosti na pozici počátečního bodu a na směr, ve kterém je tvar popisován (Rohlf 1986).

Vlnková analýza

Mimo technické obory, kde se jedná o techniku s širokým využitím v analýze signálů, je vlnková nebo také waveletová analýza relativně přehlíženou metodou. Z pohledu analýzy tvaru ji můžeme označit za sesterský postup k Fourierově analýze. Zatímco Fourierova transformace rozkládá signál do série o nekonečném počtu výrazů s funkcemi sinus a kosinus a v průběhu ztrácí informaci o pozici v prostotu, základem vlnkové analýzy jsou matematicky definované funkce, které si tuto informaci uchovávají. Tvar je rozložen do výrazů na různých úrovních rozlišení. Přizpůsobení velikosti a pozice studované morfologii tak poskytuje konkrétní informaci, jaký tvar je v daném místě popisován. To otevírá vlnkové analýze prostor pro deskripci tvaru při různém měřítku, což je důležité, jestliže popisujeme reálné objekty, u kterých, se tvarová variabilita vyskytuje na různých úrovních rozlišení.

Teorie popisu tvaru vychází z tzv. mateřské vlnky (wavelety). Výběr vhodného templátu je klíčovým prvkem analýzy. Waveleta je následně reprodukována do sady různě velikých a prostorově variabilních vlnek (dilatace a posun vlnky). V opozici k sinusoidě Fourierovy analýza, jež je plně odtržena od časové přímky, wavelety variabilní ve velikosti i poloze jsou lokalizované v čase i frekvenci. Pro popis detailů nebo singularit, nepoužívá vlnková analýza princip navýšení frekvence jako Fourierova analýza, ale princip lokálního nastavení vlnky o vhodné velikosti. Proto k popsání odchylek ve tvaru není zapotřebí stovek koeficientů, ale pouze pár dobře pasujících funkcí. Výstupem vlnkové analýzy jsou koeficienty posunu a měřítka mateřské vlnky označované jako waveletové koeficienty. Velikým průkopníkem využití vlnkové analýzy v biologii je Pete Lestrel (Lestrel *et al.* 2005).

VIZUALIZACE A GRAFICKÉ VÝSTUPY

Schopnost graficky zobrazit výsledky analýzy tvaru je jedním z nejužitečnějších příspěvků geometrické morfometrie do studia tvarových závislostí. V éře, jež předcházela geometrické morfometrii, byly přírodní obory odkázány na doprovodné ilustrace postrádající vztah ke konkrétní numerické podstatě. Konkrétním příkladem jsou zobrazení tvarových změn D'Arcyho Thompsona. Ačkoliv tyto nebo kterékoliv jiné přílohy nesou potřebnou informaci a schopnost vyzdvihnout podstatu tvarové závislosti, jejich reprodukční hodnota je nízká, protože nejsou vystaveny na objektivním všeobecně platném algoritmu, ale na individuální invenci autora.

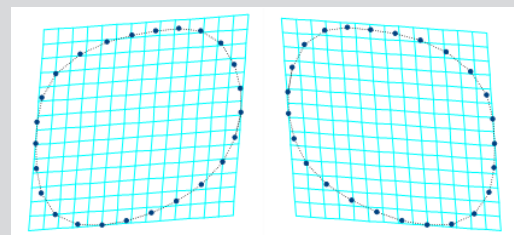
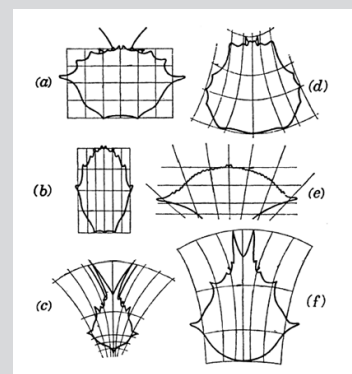
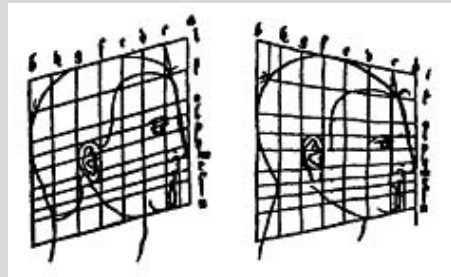
Možnost obrátit směr dekompozice morfologické informace z číselného výstupu zpět do informace vizuální je klad, kterým pokročilé metody analýzy tvaru převyšují tradiční postupy. V tradiční morfometrii jsou numerické výstupy doprovázeny vizuálním zobrazením v podobě grafů. Vizualizace prostorové informace o té či oné tvarové proměnné je však znemožněna již vlastní podstatou metody, která od počátku zanedbává prostorové souvislosti mezi proměnnými (rozměry).

V geometrické morfometrii se grafické výstupy staly základním nástrojem pro interpretaci výsledků. U řady postupů je objem i struktura číselných výstupů nepřehledná a i přes snahu o zjednodušení vhodnými statistickými postupy (např. PCA) je žádoucí vysvětlení procesů skryto v abstraktních číslech. Konkrétní grafický výstup se tak stává nejen nástrojem pro reprodukci výstupů, ale hlavním prostředkem pro kognitivní procesy, které vedou k formulování závěrů.

Nejčastěji teoreticky zobrazovanými tvary jsou průměrné tvary souboru nebo definované skupiny (např. průměrné tvary ženských a mužských lebek) nebo tvary vztahující se k určité teoretické hodnotě velikostní (v případě alometrického vztahu), tvarové nebo jiné žádoucí proměnné, např. skóre zvolené hlavní komponenty, věk, váha aj. Rekonstrukce tvaru do vizuálního zobrazení vyžaduje vedle hodnoty proměnné, kterou chceme rekonstruovat, také vztah, jaký má daný parametr k původním vstupním údajům (např. souřadnicím bodů). Tento vztah může být určen výstupy provedených transformací (TPS, hodnoty vlastního vektoru, váha tvarové proměnné v hlavní komponentě, regresní rovnice závislosti nezávislé proměnné na tvaru) anebo je latentní. V takovém případě musí být odhadnut vhodným predikčním modelem (např. regresní model nových tvarových proměnných na původní prostorová data).

Deformační mřížka je jeden z největších vkladů D'Arcyho Thompsona do studia tvarových rozdílů (ačkoliv původ lze vysledovat až k Albrechtu Dürerovi). Jeho invence deformační mřížky, která popisuje vzájemnou tvarovou souvislost dvou objektů různých tvarů, jakkoli revoluční, ale zapadla na dlouhou dobu v zapomnění. Jedním z důvodů „zamrznutí“ byl čistě ilustrativní charakter mřížky, který postrádal jakýkoliv matematický základ. Toto „zamrznutí“ myšlenky roztálo až s příchodem Freda Booksteina.

V následujícím grafickém srovnání jsou shora uvedeny mřížky podle Dürera, podle Thompsona a podle Booksteina (afinní komponenta tvarové variability očí člověka).



Vztah pro vizualizaci n -tého bodu hypotetické konfigurace asociované s hodnotou X hlavní komponenty PC lze vyjádřit vztahem:

$$\mathbf{x}_n = \bar{\mathbf{x}}_n + c\boldsymbol{\gamma}$$

, kde je poloha n -bodu v konfiguraci konsensu, c je hodnota hlavní komponenty a $\boldsymbol{\gamma}$ je váha bodu ve zvolené hlavní komponentě. Pro vizualizaci hypotetické konfigurace je vždy zapotřebí určit hodnoty všech bodů.

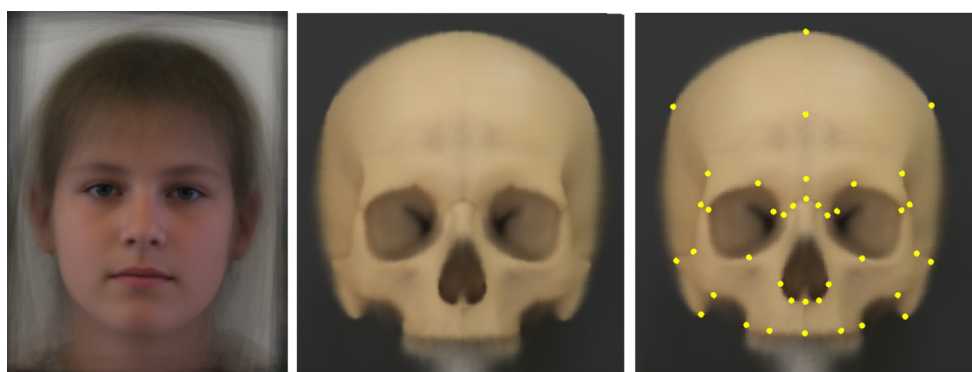
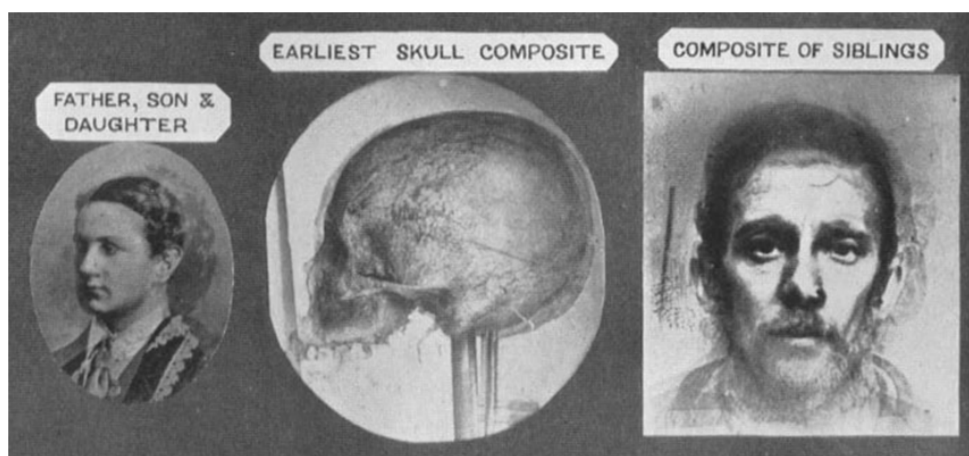
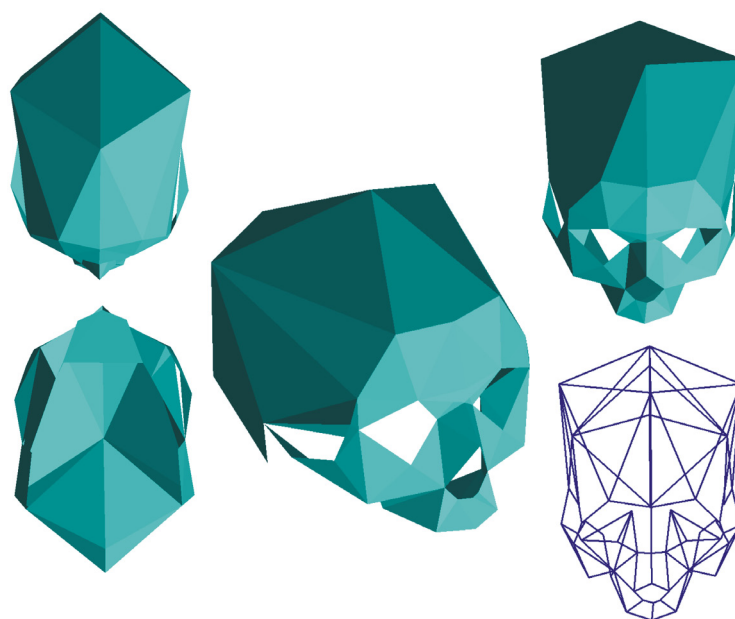
Komplikovanější postup vizualizace dat nastává v případě, že kroky algoritmu popisu tvaru obsahují více než jednu transformaci dat. To je případ Fourierovy analýzy, u které zpětná rekonstrukce prostorových dat musí zahrnovat inverzní Fourierovu transformaci. Například prokrústovská superpozice zahrnuje také více kroků transformace dat: změna velikosti, otočení polohy v prostoru, ale pro účely vizualizace pouze tvaru nejsou zpětné kroky těchto transformací žádoucí.

Nejpoužívanějšími nástroji pro vizualizaci výsledků v geometrické morfometrii jsou drátové modely, stínované modely, vektorové zobrazení a deformační mřížka. Deformační (transformační) mřížka je definována jako systém čtverců o stejné velikosti, který ilustruje změnu jednoho tvaru objektu v tvar jiný. Nezahrnuje-li zobrazení rozdílů mezi dvěma objekty změnu tvaru, zachovávají si čtverce mřížky svoji původní podobu, tj. jsou rovnoběžné i vzájemně kolmé. V případě, že transformace zahrnuje změnu tvaru, vertikální a horizontální linky čtvercové sítě se odpovídajícím způsobem deformují. Matematickým základem pro vizualizaci mřížky jsou transformační funkce (splajny) metody tenkých ohebných plátek. Výhoda tohoto postupu spočívá v možnosti navýšit tvarové rozdíly o libovolný faktor zvětšení. Vedle čtvercové sítě může být TPS funkce aplikována také na pixel digitálního snímku nebo voxel (analogie pixelu pro 3D data, nejmenší jednotka 3D modelů vytvořených s podporou radiodiagnostických zařízení jako je CT nebo MRI) objemových dat. Tímto způsobem lze přizpůsobit digitální snímek na libovolnou konfiguraci a vrátit se v rekonstrukci dat až na úroveň původní digitálních dat. Deformace pixelu nebo voxelu se označuje jako *warping* nebo *image warping* (Glasbey, Mardia 1998). Vedle warpingu jsou běžně používané také zprůměrované snímky, podobné těm, které používal již Francis Galton (1878).

Avšak ani zobrazení v geometrické morfometrii není bez svých problémů. Slabiny se týkají především otázky, jak nejlépe zobrazit trojrozměrné tvary v rovině papíru nebo monitoru počítače. Perspektiva, osvětlení i prvky okolního prostředí jsou faktory, které ovlivňují percepci tvaru. A vizualizace jako interpretační nástroj se tímto dostává na subjektivní půdu.

Kompozitní zobrazení tvaru z několika úhlů pohledu, doplněné o vhodně nastavenou a umístěnou deformační mřížku je nejjednodušším řešením tohoto problému. Vhodným pomocníkem jsou dnes i elektronické publikace, jež poskytují nástroje pro prezentaci trojrozměrných modelů ve formátu PDF, čímž je čtenáři dovolena libovolná manipulace s modelem.

Další z forem, jak prezentovat tvarové změny, nabízí technologie 3D tisku (*prototyping, stereolithografie*). Schopnost převést 3D zobrazení zpět do reálného světa v podobě fyzického modelu v mnohém uzavírá kruh tvarové analýzy, při které je informace o reálném objektu převedena do abstraktního vyjádření a po analýze a interpretaci je informace o tvaru opět navracena do fyzického světa. Univerzálnímu využití 3D tisku obvykle brání finanční a časové nároky. Ty se liší mezi výrobcí 3D tiskáren a závisí na použité technologii a spotřebním materiálu, ze kterého se model rekonstruuje. Například technologie rapid prototyping přístrojů Dimension používá při výrobě modelu FDM (*Fused Deposition Modeling*). Materiál, kterým je akrylonitril-butadien-styrénový kopolymer (ABS), je natavován a postupně nanášen po velmi tenkých vrstvách. Výsledkem je velmi přesný a lehký, ale také finančně relativně nákladný model. Jiný postup používají stroje firmy Z Corporation. Jedná se o metodu spojování prášku (např. sádra) nanášeným pojivem. Na tenkou vrstvu prášku nanese tisková hlava lepidlo do oblastí, které budou tvořit jednu vrstvu modelu. Pracovní plocha poté klesne, čímž vytvoří prostor pro další vrstvu prášku s lepidlem. Tento postup se opakuje až do vytisknutí celého modelu. Výhodou této technologie je její rychlost a menší provozní náklady než je tomu u poměrně finančně náročných plastů.



Obr. 4. Schéma demonstrující drátové a stínové modely lebky člověka (nahore), Galtonovy superponované portréty (Galton 1878) a zprůměrované lidské obličej a lebky pomocí metod geometrické morfometrie (program TPS Super, Rohlf 2001).



Obr. 5. Ukázka technologie 3D tisku použitá na vytvoření fyzického modelu lebky a hlavy lidské mumie. Zcela vlevo je prezentován tisk pomocí technologie Z-Corporation, uprostřed a vpravo se jedná o technologii ABS polymerů.

CITOVANÁ LITERATURA

- Adams, D.C. – Rohlf, F.J. – Slice, D.E. (2004): Geometric Morphometrics: Ten Years of Progress Following the ‘Revolution.’ *Italian Journal of Zoology* 71: 5 – 16.
- Baylac, M. - Frieß, M. (2005): Fourier Descriptors, Procrustes Superimposition, and Data Dimensionality: An Example of Cranial Shape Analysis in Modern Human Populations. In: D. Slice (ed.): *Modern Morphometrics in Physical Anthropology, Volume V: Developments in Primatology: Progress and Prospects*. New York: Kluwer Academic Press: 145 – 166.
- Bookstein, F.L. (1982): Foundations of morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics* 13: 451 – 470.
- Bookstein, F.L. (1987): Describing a Craniofacial Anomaly: Finite Elements and the Biometrics of Landmark Locations. *American Journal of Physical Anthropology* 74: 495 – 509.
- Bookstein, F.L. (1991): *Morphometric Tools for Landmark Data*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bookstein, F.L. (1996): Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of Mathematical Biology* 58/2: 313-365.
- Bookstein, F.L. (1997): Shape and the Information in Medical Images: A Decade of the Morphometric Synthesis. *Computer Vision and Image Understanding* 66/2: 97 – 118.
- Bookstein, F.L., Schaefer, K. Prossinger, H. – Seidler, H. – Fieder, M. – Stringer, C. – Weber, G. – Arsuaga, J. – Slice, D. – Rohlf, F.J. – Recheis, W. – Mariam, A. – Marcus, L. (1999): Comparing frontal cranial profiles in archaic and modern Homo by morphometric analysis. *The Anatomical Record (The New Anatomist)* 257: 217 – 224.
- Bookstein, F.L. – Sampson, P.D. – Streissguth, A.P. – Connor, P.D. (2001): Geometric morphometrics of corpus callosum and subcortical structures in the fetal-alcohol-affected brain. *Teratology* 64: 4 – 32.
- Brande, S. – Saragusti, I. (1996): A Morphometric Model and Landmark Analysis of Acheulian Hand Axes from Northern Israel. In: L.F. Marcus, M. Corti, A. Loy, G.J.P. Naylor, D. Slice. (eds.): *Advances in morphometrics*. NATO ASI Series A vol. 284.
- Plenum, pp. 423-436. Buchanan, B. – Johnson, E. – Strauss, R.E. – Lewis, P.J (2007): A Morphometric Approach to Assessing Late Paleoindian Projectile Point Variability on the Southern High Plains. *Plains Anthropologist* 52/203: 279 – 299.
- Chatfield J.R. (1989): *The analysis of time series: an introduction*. Chapman and Hall; London, UK:
- Cheverud, J. – Lewis, J.L. - Bachrach, W. – Lew, W.D. (1983): The Measurement of Form and Variation in Form: An Application of Three-Dimensional Quantitative Morphology by Finite-Element Methods. *American Journal of Physical Anthropology* 62: 151 – 165.
- Cobb, W.M. (1940): The Cranio-Facial Union in Man. *American Journal of Physical Anthropology* 26/1: 87 – 111.
- Corruccini, R.S. (1987): Shape in morphometrics: Comparative analyses. *American Journal of Physical Anthropology* 73: 289 – 303.
- Corti, M. – Aguilera, M. – Capanna, E. (2001): Size and shape changes in the skull accompanying speciation of South American spiny rats (Rodentia: Proechimys spp.). *Journal of Zoology (London)* 253: 537 – 547.
- Darroch, J.N. – Mosimann, J.E. (1985): Canonical and Principal Components of Shape. *Biometrika* 72/2: 241 – 252.
- Delson, E. – Harvati, K. – Reddy, D. – Marcus, L.F. - Mowbray, K. – Sawyer, G.J. – Jacob, T. – Márquez, S. (2001): The Sambungmacan 3 Homo erectus calvaria: a komparative morphometric and morphological analysis. *Anatomical Record* 262: 360 – 377.

- Dhurjati, P.S. – Debapriya, S. – Parthasarathi, G. (2005): Bilaterally symmetric Fourier approximations of the skull outlines of temnospondyl amphibians and their bearing on shape comparison. *Journal of Biosciences* 30/3: 377 – 390.
- Dryden, I. – Mardia, K. (1998): *Statistical Shape Analysis*. John Wiley and Sons.
- Ferson, S. – Rohlf, F.J. – Koehn, R.K. (1985): Measuring shape variation of twodimensional outlines. *Systematic Zoology* 34: 59 – 68.
- Foote, M. (1997): The evolution of morphological diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28: 129 – 52.
- Foote, M. (1992). Rarefaction analysis of morphological and taxonomic diversity. *Paleobiology* 18: 1 – 16.
- Franklin, D. – Freedman, L. – Milne, N. (2005): Three-dimensional technology for linear morphological studies: a re-examination of cranial variation in four southern African indigenous populations. *HOMO - Journal of Comparative Human Biology* 56: 17 – 34.
- Galton, F.J. (1878): Composite portraits. *Nature* 18: 97 – 100.
- Gero, J. – Mazzullo, J. (1984): Analysis of Artifact Shape Using Fourier Series in Closed Form. *Journal of Field Archaeology* 11/3: 315 – 322.
- Glasbey, C.A. – Mardia, K.V. (1998): A review of image warping methods. *Journal of Applied Statistics* 25: 155 – 171.
- Goodall, C.R. (1991): Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *Journal of Royal Statistical Society B* 53: 285 – 339.
- Grosman, L. – Smikt, O. – Smilansky, U. (2008): On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts. *Journal of Archaeological Science* 35: 3101 – 3110.
- Gould, S.J. (1971): D'Arcy Thompson and the Science of Form. *New Literary History* 2/2: 229 – 258.
- Gunz, P. – Mitteroecker, P. – Bookstein, F.L. (2005): Semilandmarks in Three Dimensions. In: D. Slice (ed.): *Modern Morphometrics in Physical Anthropology, Volume V: Developments in Primatology: Progress and Prospects*. New York: Kluwer Academic Press: 73 – 98.
- Haines, A.J. – Crampton, J.S. (2000): Improvements to the methods of Fourier shape analysis as applied in morphometric studies. *Palaeontology* 43/4: 765 – 783.
- Hammer, Ø. – Harper, D.A.T. (2006): *Paleontological Data Analysis*. Blackwell Publishing.
- Hammer, Ø. – Harper, D.A.T. – Ryan, P.D. (2001): PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4/1: 9 pp. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.
- Jolliffe, I.T. (1986): *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Kaesler, R. L. (1997): Phase Angles, Harmonic Distance and the Analysis of Form. In: P. E. Lestrel (ed.): *Fourier Descriptors and Their Applications in Biology*, pp. 106 – 126.
- Katina, S., Bookstein, F. L., Gunz, P., Schaefer, K., 2007: Was it worth digitizing all those curves? A worked example from craniofacial primatology. *American Journal of Physical Anthropology. Annual Meeting Issue. AAPA Abstract Suppl.* 44: 140 – 140.
- Kendall, D.G. (1984): Shape manifolds, Procrustean metrics, and complex projective spaces. *Bulletin of the London Mathematical Society* 16: 81 – 121.
- Knußmann, R. (1988): *Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen. Band I: Wesen und Methoden der Anthropologie*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-New York.
- Kohn, L.A.P. – Leigh, S.R. – Jacobs, S.C. – Cheverud, J.M. (1993): Effects of Annular Cranial Vault Modification on the Cranial Base and Face. *American Journal of Physical Anthropology* 90: 147 – 168.

- Kovalski O. (1995): Úvod do Riemannovy geometrie, Univerzita Karlova, Praha.
- Kuhl, F.P. – Giardina, C.R. (1982): Elliptic Fourier Features of a Closed Contour. *Computer Graphics and Image Processing* 18: 236 – 258.
- Le Minor, J.M. – Schmittbuhl, M. (1999): Importance of elliptic Fourier methods for morphometry of complex outlines: application to the distal human femur. *Surgical and radiologic anatomy* 21: 387 – 391.
- Lestrel, P.E. – Brown, H.D. (1976): Fourier Analysis of Adolescent Growth of the Cranial Vault: A Longitudinal Study. *Human Biology* 48: 517 – 528.
- Lestrel, P.E. – Huggare, J.A. (1997): Cranial base changes in shunt-treated hydrocephalics: Fourier descriptor. In: P.E. Lestrel (ed.): *Fourier Descriptors and their Applications in Biology*. Cambridge University Press, pp 322 – 339.
- Lestrel, P. E. – Roche. A. F. (1979): The cranial thickness in Down's Syndrome: Fourier analysis. *Proceedings of the 1st International Congress on Auxology* 1:108 – 118.
- Lestrel, P.E. (1989): Method for Analyzing Complex Two-Dimensional Forms: Elliptical Fourier Functions. *American Journal of Human Biology* 1:149-164.
- Lestrel, P.E. – Cesar jr., R.M. – Takahashi, O. – Kanasawa, E. (2005): Sexual dimorphism in the Japanese cranial base: A Fourier-wavelet representation. *American Journal of Physical Anthropology* 128: 608 – 622.
- Little, J. A. – Schluchter, M. D. (1985): Maximum Likelihood Estimation for Mixed Continuous and Categorical Data with Missing Values. *Biometrika* 72/3: 497 – 512.
- Lockwood, C.A. – Lynch, J.M. – Kimbel, W.H. (2002): Quantifying Temporal Bone Morphology of Great Apes and Humans: An Approach Using Geometric Morphometrics. *Journal of Anatomy* 201: 447 – 464.
- Lu, K.H. (1965): Harmonic Analysis of the Human Face. *Biometrics* 21: 491 – 505.
- Lycett, S. J. – von Cramon-Taubadel, N. – Foley, R.A. (2006): A crossbeam co-ordinate caliper for the morphometric analysis of lithic nuclei: a description, test and empiric examples of application. *Journal of Archaeological Science* 33: 847 – 861.
- MacLeod, N. (1999): Generalizing and extending the eigenshape method of shape visualization and analysis. *Paleobiology* 25/1: 107 – 138.
- MacLeod, N. (2001): Landmarks, localizability and the use of morphometrics in phylogenetic analysis. In J. Adrain, G. Edgecombe, B. Lieberman, B. (eds.): *Fossils, Phylogeny and Form*: New York, Kluwer Academic/Plenum Press, New York, pp. 197 – 233.
- Malina, J. et al. (2009): *Antropologický slovník (s přihlédnutím k dějinám literatury a umění) aneb co by mohl o člověku vědět každý člověk*. Vyd. 1. Brno : Akademické nakladatelství CERM v Brně.
- Martin, R. – Saller, K. (1957): *Lehrbuch der Anthropologie*. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart.
- Mitteroecker, P. – Gunz, P. (2009): Advances in Geometric Morphometrics. *Evolutionary Biology* 36: 235 – 247.
- Monteiro, L.R. – Guillermo, L.H. – Rivera, L.A. – Beneditto, A.P.M. Di (2004): Geometric methods combining contour and landmark information in the statistical analysis of biological shape. In: R. Mondaini (org.): *Proceedings of the Third Brazilian Symposium on Mathematical and Computational Biology*. Rio de Janeiro: E-papers 2: 336 – 355., 25.8.2007, <http://morfolab.infobio.net/pdfs/monteiroetal2004-BIOMAT.pdf>.
- Monti, L. – Baylac, M. – Lalanne-Cassou, B. (2001): Elliptical Fourier analysis of the form of genitalia in two *Spodoptera* species and their hybrids (Lepidoptera: Noctuidae). *Biological Journal of the Linnean Society* 72: 391 – 400.

- Navarro, N. – Zatarain, X. – Montuire, S. (2004): Effects of morphometric descriptor changes on statistical classification and morphospaces. *Biological Journal of the Linnean Society* 83: 243 – 260.
- Neubauer, S. – Gunz, P. – Mitteroecker, P. – Weber, G. W. (2004): Three-dimensional digital imaging of the partial *Australopithecus africanus* endocranium MLD 37/38. *Canadian Association of Radiologists Journal* 55: 271 – 278.
- Neustupa, J. – Němcová, Y. (2007): A geometric morphometric study of the variation in scales of *Mallomonas striata* (Synurophyceae, Heterokontophyta). *Phycologia* 46: 123 – 130.
- Neustupa, J. – Škaloud, P. (2007): Geometric morphometrics and qualitative patterns in the morphological variation of five species of *Micrasterias* (Zygnemophyceae, Viridiplantae). *Preslia* 79: 401 – 417.
- Novotni, M. – Klein, R. (2004): Shape retrieval 3D Zernike descriptors. *Computer-Aided Design* 36: 1047 – 1062.
- O'Higgins, P. – Jones, N. (1998): Facial growth in *Cercocebus torquatus*: an application of three-dimensional geometric morphometrics techniques to the study of morphological variation. *Journal of Anatomy* 193: 251 – 272.
- Oxnard, C.E. (1980): Introduction to the symposium: Analysis of form. Some problems underlying most studies of form. *American Zoology* 20: 619 – 626.
- Pavlinov, I.Y. (2001): Geometric morphometrics, a new analytical approach to comparison of digitized images. In: *Information technologies in biodiversity research*, St.Petersburg, 40 – 64.
- Penrose, L.S. (1954): Distance, Size and Shape. *Annals of Eugenics* 18: 337 – 343.
- Perez, S.I. – Bernal, V. – Gonzalez, P.N. (2006): Differences between sliding semilandmarks methods in geometric morphometrics, with an application to human craniofacial and dental variation. *Journal of Anatomy* 208: 769 – 784.
- Pretorius, E. – Steyn, M. – Scholtz, Y. (2006): Investigation into the usability of geometric morphometric analysis in assessment of sexual dimorphism. *American Journal of Physical Anthropology* 129/1: 64 – 70.
- Prossinger, H. (2005): Problems with Landmark-Based Morphometrics for Fractal Outlines: The Case of Frontal Sinus Ontogeny. In: D. Slice (ed.): *Modern Morphometrics in Physical Anthropology, Volume V: Developments in Primatology: Progress and Prospects*. New York: Kluwer Academic Press: 167 – 186.
- Read, D.W. (1990): From multivariate to qualitative measurement: representation of shape. *Human Evolution* 5/5: 417 – 429.
- Reddy, D.P. – Harvati, K. – Kim, J. (2005): An Alternative Approach to Space Curve Analysis Using the Example of the Neanderthal Occipital Bun. In: D. Slice (ed.): *Modern Morphometrics in Physical Anthropology, Volume V: Developments in Primatology: Progress and Prospects*. New York: Kluwer Academic Press: 99 – 116.
- Renaud, S. – Michaux, J. – Jaeger, J.-J. – Auffray, J.-C. (1996): Fourier analysis applied to *Stephanomys* (Rodentia, Muridae) molars: nonprogressive evolutionary pattern in a gradual lineage. *Paleobiology* 22/2: 255 – 265.
- Ritterbush, P.C. (1970): The Shape of Things Seen: The Interpretation of Form in Biology *Leonardo* 3/3: 305 – 317.
- Richtsmeier, J.T. – DeLeon, V.B. – Lele, S.R. (2002): The Promise of Geometric Morphometrics. *Yearbook of Physical Anthropology* 45: 63 – 91.
- Rohlf, F.J. (1986): Relationships Among Eigenshape Analysis, Fourier Analysis, Analysis of Coordinates. *Mathematical Geology* 18/8: 845 – 854.
- Rohlf, F.J. (1990): Morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics* 21: 299 – 316.
- Rohlf, F.J. (1998): On Applications of Geometric Morphometrics to Studies of Ontogeny and Phylogeny. *Systematic Biology* 47/1: 147 – 158.
- Rohlf, F.J. (1999): Shape Statistics: Procrustes Superimpositions and Tangent Spaces. *Journal of Classification* 16: 197 – 223.

- Rohlf, F.J. – Marcus, L.F. (1993): A revolution in morphometrics. *Trends in ecology and evolution* 8/4: 129-132.
- Rohlf, F.J. (2000): Statistical power comparisons among alternative morphometric methods. *American Journal of Physical Anthropology* 111/4: 463 – 478.
- Rosas, A. – Bastir, M. (2002): Thin-plate spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology* 117/3: 236 – 245.
- Roth, V.L. – Mercer, J.M. (2000): Morphometrics in Development and Evolution. *American Zoology* 40: 801 – 810.
- Shen, L. – Farid, H. – McPeck, M.A. (2009): Modeling Three-Dimensional Morphological Structures Using Spherical Harmonics. *Evolution* 63/4: 1003 – 1016.
- Slice, D.E. (2007): Geometric Morphometrics. *Annual Review of Anthropology* 36: 261 – 281.
- Schmittbuhl, M. – Le Minor, J.M. – Allenbach, B. – Schaaf, A. (1999): Shape of the orbital opening: individual characterization and analysis of variability in modern humans, Gorilla gorilla, and Pan troglodytes. *Annals of Anatomy* 181: 299 – 307.
- Schmittbuhl, M. – Le Minor, J.M. – Schaaf, A. – Mangin, P. (2002): The human mandible in lateral view: elliptical Fourier descriptors of the outline and their morphological analysis. *Annals of Anatomy* 184: 199 – 207.
- Schmittbuhl, M. – Le Minor, J.M. – Taroni, F. – Mangin, P. (2001): Sexual Dimorphism of the Human Mandible: demonstration by elliptical Fourier analysis. *International Journal of Legal Medicine* 115: 100 – 101.
- Thompson, D'A.W. (1942): *On Growth and Form*. Cambridge University Press.
- Urbanová, P. (2009): A Study of Human Craniofacial Variation by Using Geometric Morphometrics. Dizertační práce, Masaryk University, Brno. (http://is.muni.cz/th/21708/prif_d/Urbanova_2009.pdf, 12.12.2010).
- Urbanová, P. – Eliášová, H. – Králík, M. (2006). Morphometric Outline-Based Approaches in Forensic Anthropology. XX Congress of International Academy of Legal Medicine. FREE PAPERS PROCEEDINGS. Budapest, Hungary, August 23-26, 2006: MEDIMOND S.r.l. International Proceedings: 207 – 212.
- Valeri, C. – Cole, T.I. – Lele, S. – Richtsmeier, J. (1998): Capturing data from surfaces using fuzzy landmarks. *American Journal of Physical Anthropology* 107: 113 – 124.
- Viguiera, B. – Tort, A. (2000): Morphologie crânienne et mandibulaire des Indrinae. Apports des méthodes Procrustes et des analyses de Fourier. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la vie/Life Sciences* 323: 573 – 582.
- von Cramon-Taubadel, N. – Frazier, B.C. – Lahr, M.M. (2007): The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods and modifications. *American Journal of Physical Anthropology* 134:24 – 35.
- Weber, G.H. – Schäfer, K. – Prossinger, H. – Gunz, P. – Mitteröcker, P. – Seidler, H. (2001): Virtual Anthropology: The Digital Evolution in Anthropological Sciences. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science* 20/2: 69 – 80.
- Wills, M.A. – Briggs, D.E.G. – Fortey, R.A. (1994): Disparity as an evolutionary index: A comparison of Cambrian and Recent arthropods. *Paleobiology* 20: 93–130.
- Wilson, S.R. – Loesch, D.Z. (1989): Principal component analysis of shape variables in adult individuals. *Annals of Human Biology* 16/4: 361 – 368.
- Zelditch, M.L. – Swiderski, D.L. – Sheets, H.D. – Fink, W.L. (2004): *Geometric morphometrics for biologists: a primer*. Elsevier Academic Press, New York.
- Zollikofer C.P.E. (2002): A Computational Approach to Paleoanthropology. *Evolutionary Anthropology Suppl.* 1:64 – 67.
- Zollikofer, C.P.E. – Ponce de León, M.S. – Martin, R.D. (1998): Computer-assisted paleoanthropology. *Evolutionary Anthropology* 6: 41 – 54.

Kapitola 2

Analýza tvaru kostěného okraje očníce

ÚVOD

Okraj očníce patří mezi základní komponenty kostěného podkladu obličeje, který tvoří přechod mezi očníci, kostěnou jámou, ve které jsou uloženy orgány zraku, a kostěným podkladem horní a střední části obličeje. Tvar okraje vnímáme jako jeden z vnějších znaků obličeje a v běžném životě jej denně hodnotíme při rozpoznání obličeje, mezilidské komunikaci nebo identifikaci jedince. Díky svému multifunkčnímu významu přitahuje pozornost v řadě vědeckých oborů jako je medicína, biologie člověka, psychologie nebo forenzní antropologie. Tvar, velikost i prostorové uspořádání okraje patří mezi znaky, kterými popisujeme kosterní pozůstatky člověka (Broca 1875), ale i primátů (Vinyard *et al.* 2008, Ross 1995) nebo jiných živočišných druhů (Noble *et al.* 2000). V kosterní a forenzní antropologii slouží tvar orbit jako důležitá, ale v mnoha ohledech kontroverzní, proměnná zahrnutá do metod pro určení pohlaví a populační afinity na lebce.

I přes dostatečný zájem o morfologii očníce, se však řada aplikací potýká s problémem, jakým způsobem vyjádřit trojrozměrnou podstatu orbity. Tradiční antropometrické nebo typologické postupy, jež byly pro vyjádření tvaru okraje očníce používány od počátku moderní osteologie (Broca 1875), selhávají zachytit trojrozměrnou podstatu orbity i jeho okraje a skutečný tvar a jeho variabilita tak byl zkoumán jen okrajově.

Podobně jako většina organických tvarů není okraj orbity ideálně rovinným objektem, ale nepravidelnou strukturou tvarovanou ve všech třech rozměrech. Tyto vlastnosti lze poměrně těžko zachytit tradičními postupy, např. jednoduchými lineárními nebo úhlovými rozměry, schématickou kresbou nebo projekcí tvaru do roviny fotografie. První pokus o komplexní popis tvaru oční metodami analýzy tvaru byl učiněn v práci Schleyera a kolegů z roku 1971 zabávající se sexuálním dimorfismem okraje očníce člověka na RTG snímcích. Na počátku 80. let minulého století byl zájem o téma obnoven v pracích Jacobshagena (1981, 1982), jenž využil na svou dobu pokrokovou techniku stereofotogrammetrického záznamu 3D dat. V konečné fázi však postrádal dostupné analytické nástroje pro zpracování trojrozměrných dat a studium tvaru omezil na hodnocení 2D polárních souřadnic. Až téměř 20 let poté se tématu chopil Pete Lestrel (1997), jenž se spolu se svým týmem spolupracovníků pokusil popsat trojrozměrné charakteristiky nepravidelných oční králíka ve třech základních anatomických orientacích rozkladem tvaru pomocí 2D Fourierovy analýzy.

Zde prezentovaná studie představuje numerické vyjádření tvaru okraje očnice metodami 3D Fourierovy analýzy. Na rozdíl od předchozích pokusů jsou v této studii analyzována trojrozměrná vstupní data o tvaru a poloze očních, která byla získána s využitím moderních přístrojů pro záznam prostorových dat přímým kontaktem se zkoumaným objektem. Primárním cílem analýzy bylo popsat vnitropopulační a mezipopulační rozdíly ve tvaru okraje očnice, jeho zakřivení a prostorové orientace a prozkoumat roli různých faktorů, u kterých je známo, že se podílejí na morfogenezi orbitální oblasti člověka. Sekundárním cílem pak bylo zjistit, zda by zvolený kvantitativní přístup k popisu tvaru očních mohl díky své objektivnosti a opakovatelnosti najít uplatnění v praxi, například ve forenzní antropologii.

MATERIÁL A METODY

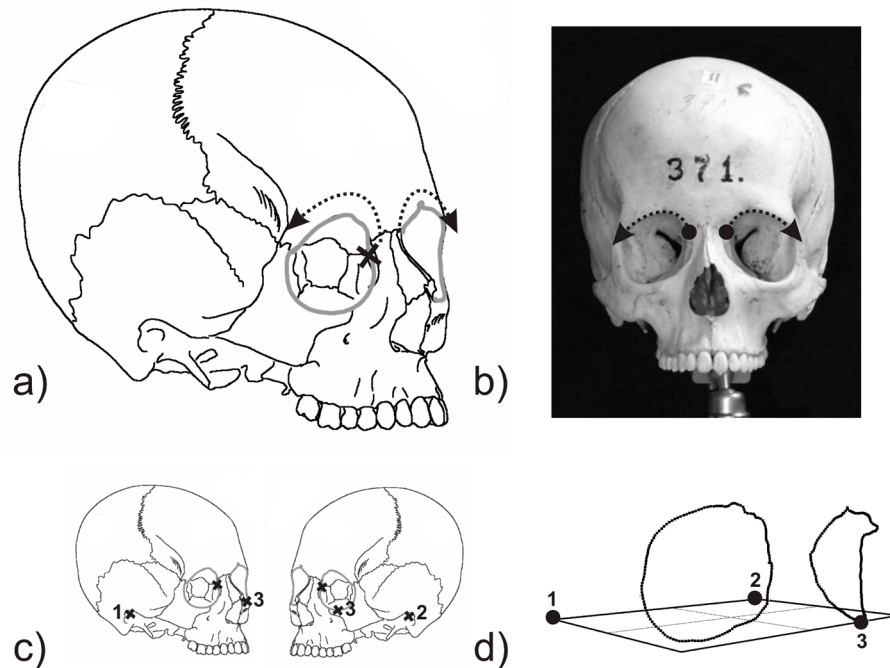
Morfologie obrysu očnice byla studována na souboru 336 lebek, které pocházely ze tří osteologických sbírek dvou evropských regionů (Česká republika a Portugalsko): Pachnerovy sbírky uložené na Katedře antropologie a genetiky člověka Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze (N=114), Nová lisabonská sbírka z Oddělení zoologie a antropologie Národního přírodovědeckého muzea v Lisabonu v Portugalsku (N=132), Osteologická sbírka identifikovaných koster domovem na Katedře antropologie University v Coimbre v Portugalsku (N=90). Jedinci zahrnutí do studie zastupovali moderní evropskou populaci. U každého byl znám také základní biologický a socioekonomický profil: pohlaví, dožitý věk, povolání, příčina úmrtí. Do výzkumu byli zařazeni pouze dospělí jedinci. Ukončení růstu a maturity jedinců bylo ověřeno aspektivním zhodnocením osifikace *synchondrosis sphenoccipitalis*. Průměrný věk v souborech se pohyboval od 43,5 do 54,5 let, s celkovým průměrem 50,4 roku. S ohledem na věkové změny v kraniofaciální oblasti byli jedinci rozděleni do tří věkových skupin: mladší 25 let, 26-49 let a starší než 50 let. Zastoupení jedinců v jednotlivých kategoriích bylo však i přes snahu o konzistenci při výběru vzorku nerovnoměrné. Mírný odklon byl zjištěn také v zastoupení pohlaví. Celkový poměr mezi mužskými a ženskými lebkami byl 177:159 ve prospěch mužů a 63:51, 68:64:46:44 v rámci jednotlivých sbírek.

Záznam vstupních dat

U každého jedince byl tvar vchodu do očnice zaznamenán s pomocí ramenového digitizéru MicroScribe G2X a počítačové aplikace Rhinoceros, NURBS modeling program, Windows, verze 3.0 SR 4. Při digitalizaci byla lebka fixována v kranioforu a orientována tak, aby očnice směřovaly vzhůru a dopředu směrem k hodnotiteli (lebka nebyla ustavena do frankfurtské horizontály). Zaznamenány byly orbity pravé i levé strany těla. Počátek křivky byl standardně umístěn do antropometrického bodu dakryon ležícího na vnitřní stěně orbity (Martin, Saller 1957) (Obr. 1a,b). Po záznamu první křivky byl postup 4krát opakován. Pro každou z lebek byla získána sada 10 křivek (5 pravých, 5 levých). Ve stejné pozici lebky byly pomocí digitizéru zaznamenány kartézské souřadnice bodů *porion dx*, *porion sin* a *orbitale sin*, které definují rovinu frankfurtské horizontály (Obr. 1c). Pro účely kvantitativní analýzy tvaru byla každá ze získaných křivek rozdělena na 150 pravidelně rozmístěných bodů. Rozdělení křivky na body o konstantní vzdálenosti pomocí polygonální aproximace bylo provedeno editačními nástroji programu Rhinoceros verze 4. Souřadnice bodů 5 opakování byly superponovány (odděleně pro pravé a levé orbity) a pro každý bod křivky byl vypočítán aritmetický průměr. Do následujících kroků analýzy tvaru vstupovaly pouze zprůměrované křivky pro pravou a levou očnici.

Analýza tvaru

Prostorová variabilita 3D kartézských souřadnic kontury orbit byla standardizována otočením konfigurací bodů do frankfurtské horizontály (Obr. 2). Proporční rozdíly mezi obrysy byly upraveny extrak-



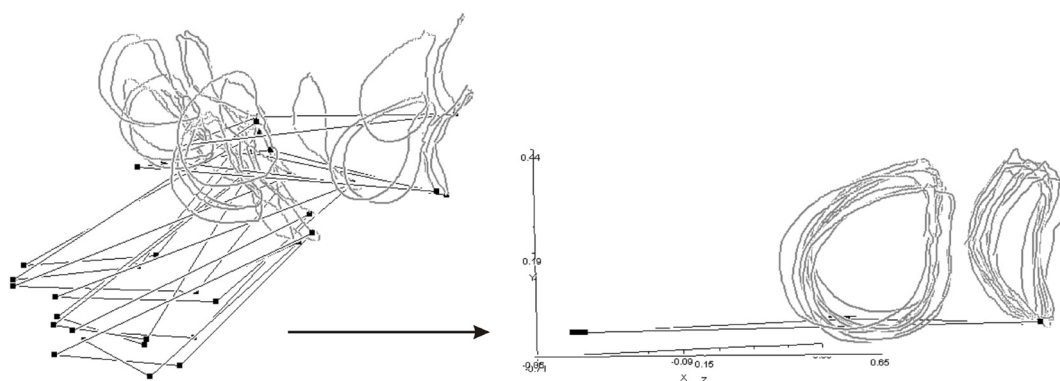
Obr. 1. Schéma zobrazující záznam tvaru okraje očnice, za počáteční bod byl určen dakryon (a, b), spolu s křivkou byly zaznamenány souřadnice bodů pravý a levý porion a levé orbitale (c, d).

cí hodnoty velikosti centroidu z kartézských souřadnic 150 bodů. Standardizovaná data byla následně postoupena 3D modifikaci eliptické Fourierovy analýzy. Počet harmonických proměnných byl nastaven na hodnotu 20. Hodnoty 120 Fourierových koeficientů a 3 konstant byly získány pomocí programu NTSYSpc verze 2.11f. V průběhu výpočtu již data nebyla žádným jiným způsobem standardizována. Vstupní data pro pravé a levé očnice byly postoupeny do společné Fourierovy analýzy.

Statistické zpracování

Sada Fourierových koeficientů všech tří os byla postoupena analýze hlavních komponent počítané na kovarianční matici. Očnice pravé a levé strany těla byly analyzovány samostatně. Hlavní komponenty, které vysvětlovaly efektivní část tvarové variability souboru (efektivnost byla deklarována na základě hodnoty Jolliffeho hraničního čísla, Jolliffe 1986) byly následně testovány metodami jednorozměrné a vícerozměrné statistiky. Cílem těchto analýz bylo prozkoumat vzorce mezipopulační a vnitropopulační variability. Důraz byl kladen na vzorce sexuálního dimorfismu a věkových změn.

U testů založených na lineární regresi byla posouzena normalita dat použitím Shapirova-Wilksova W testu. Předpoklady homogenity rozptylu v případě testů, jež tuto podmínku vyžadovaly (např. MANOVA), byly testovány Levenovým testem. Srovnání skupin definovanými více faktory (vícefaktorová MANOVA, vnořená MANOVA) bylo doplněno o párové srovnání post-hoc testy. Post-hoc testy pomáhají odhalit skryté podobnosti nebo rozdíly mezi srovnávanými skupinami, jež mohou být překryty celkovými rozdíly. Jsou obecně upřednostňovány před opakovaným testováním jednorozměrnými testy (např. t -testem). U opakovaného testování se zvyšuje pravděpodobnost, že nejméně jeden z testů bude náhodně označen jako statisticky významný. Pro určení statisticky významných rozdílů mezi průměry skupin byl vybrán Tukeyho test studentizovaného rozsahu (HSD). Statistické testy byly počítány v programu STATISTICA 8.0 na 5% hladině významnosti.



Obr. 2. Schéma zobrazující způsob standardizace okrajů očních do frankfurtské horizontály.

Vizualizace výsledků

Tvarová variabilita asociovaná s hodnotami hlavních komponent byla rekonstruována na základě vícerozměrné regresní analýzy. Predikční model odhadoval hodnoty 120 Fourierových koeficientů všech tří os. Tvary byly rekonstruovány pro maximální a minimální hodnoty na příslušné hlavní ose ($\pm 3SD$). Získané Fourierovy koeficienty, spolu s hodnotami konstant a počtu harmonických proměnných byly následně postoupeny do inverzní Fourierovy transformace. Získaná prostorová data (kartézské souřadnice 150 bodů), byly dále použity jako základ pro grafické vizualizace. Inverzní Fourierova transformace byla spočítána s pomocí programu NTSYSpc verze 2.11f. Grafické výstupy, superpozice struktur s připojením transformační mřížky byly vytvořeny v programu Morpheus *et al.* (Slice 2002).

Chyba metody

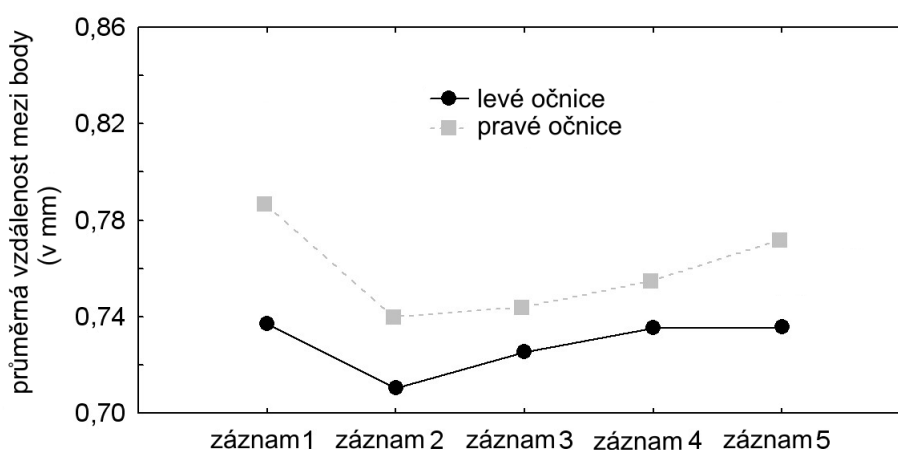
Opakovatelnost záznamu okraje očníce

Záznam okraje očníce pomocí ramenového digitizéru MicroScribe vyžaduje jistou míru zručnosti. Chyba, s jakou byla každá očníce obtažena, byla určena na základě souboru 25 náhodně vybraných lebek (pravé i levé orbity byly zařazeny do analýzy). Chyba záznamu (chyba hodnotitele, *intra-observer error*) byla vyjádřena průměrnými hodnotami euklidovské vzdálenosti, D , a vzdálenosti nejmenších čtverců, D^2 , mezi relevantními body obrysu a průměrnou konturou získanou z 5 opakovaných záznamů. Rozdíly mezi záznamy byly testovány Friedmanovou neparametrickou analýzou rozptylu, společně pro pravou a levou stranu těla ($N=50$) a samostatně ($N=25$). Rozdíly mezi chybou záznamu pravé a levé strany těla byly testovány párovým t-testem. Chyba digitalizace v porovnání se skutečnou variabilitou náhodně vybraného podsouboru je zobrazena v tabulce 1. Rozdíly mezi jedinci byly určeny stejným způsobem jako rozdíly mezi opakovanými digitalizacemi. Před srovnáním byly všechny křivky standardizovány na velikost a ustaveny do frankfurtské horizontály.

Průměrná chyba opakovaného záznamu ($N=5$) okraje nepřekročila u žádné z 50 očních hodnotu 1 mm na bod. Vzájemným srovnáním bylo zjištěno, že průměrná chyba se statisticky významně liší v závislosti na pořadí, v jakém byla křivka získána. Největší odchylka od průměru byla pozorována u první digitalizace. Naopak nejmenší chyba byla zaznamenána hned v následujícím druhém záznamu (Obr. 3). Distribuce chyby je vzhledem k průběhu křivky od počátečního bodu nepravidelná. Riziko výskytu chyby se zvyšuje v horní části okraje očníce a nabývá svého maxima v blízkosti horní vnějšího rohu očníce. Minimální chyba záznamu se vyskytuje v okolí počátečního bodu (*dakryon*) na vnitřní stěně očníce. Párový t-test odhalil statisticky významně vyšší chybu záznamu u obrysů pravých očních. ($z=-2,287$, $p<0,05$).

		počet bodů	sumD			sumD ²		
			/jedinec	/křivka	/bod	/jedinec	/křivka	/bod
dohromady	rozdíly mezi opakováním	150	393,02	75,98	0,503	479,50	92,95	0,616
	rozdíly mezi jedinci (N=50)	7500	157919,23	3158,39	20,916	5481158,89	109623,18	725,981
pravé orbity	rozdíly mezi opakováním	150	420,10	79,94	0,529	493,19	94,17	0,624
	rozdíly mezi jedinci (N=25)	3750	15352,41	614,10	4,067	73408,65	2936,35	19,446
levé orbity	rozdíly mezi opakováním	150	365,95	72,03	0,477	465,80	91,74	0,608
	rozdíly mezi jedinci (N=25)	3750	12685,17	507,41	3,36	54105,04	2164,20	14,332

Tabulka 1. Srovnání rozdílů mezi opakovanou digitalizací okraje očnice a skutečnou variabilitou mezi rozdílnými tvary okraje očnice v souboru. Velikost a prostorové uspořádání obrysů bylo standardizováno na velikost centroidu a poloha byla ustavena do frankfurtské horizontály.

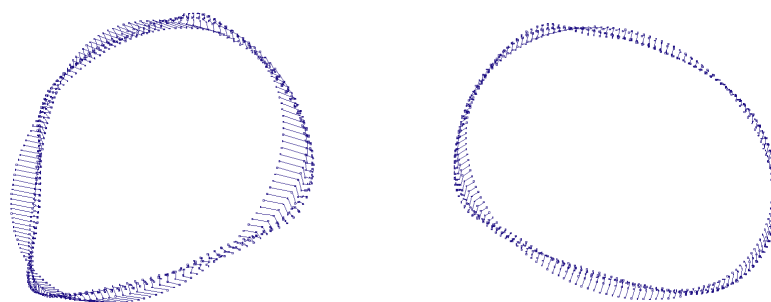


Obr. 3. Distribuce průměrné chyby digitalizace u opakovaného záznamu okraje očnice.

Chyba dekompozice tvaru 3D struktury do hodnot Fourierových koeficientů 20 harmonických proměnných byla určena na základě náhodně zvolené kontury a teoretické křivky rekonstruované se vzrůstajícím počtem harmonických proměnných (1-5, 10, 15, 20). 3D kartézské souřadnice bodů byly získány pomocí inverzní Fourierovy transformace. Analýza byla doplněna o srovnání s maximálním teoretickým počtem harmonických proměnných, který je podmíněn kritériem Nyquistovy frekvence. Pravidlo ustavuje, že celkový počet harmonických proměnných nesmí přesáhnout polovinu bodů na křivce (Lestrel 1997). Je-li křivka zastoupena 150 body, pak maximální počet použitelných harmonických proměnných dosahuje 75. Podobně jako v případě chyby digitalizace byly rozdíly mezi srovnávanými tvary vyjádřeny průměrnými hodnotami euklidovské vzdálenosti a vzdálenosti nejmenších čtverců mezi body srovnávaných křivek.

Vliv počtu harmonických proměnných

Přesnost vyjádření tvaru se podle očekávání zvyšuje s nárůstem harmonických proměnných zahrnutých do rekonstrukce tvaru (Obr. 4). Chyba popisu tvaru koeficienty první harmonické proměnné přesahuje v průměru hodnotu 2,5 mm. S použitím prvních pěti proměnných však chyba padá na 0,56 mm a poté nepatrně klesá až na výslednou 0,45 mm u dvaceti harmonických proměnných (Tab. 2). Použití 20 na místo 15 harmonických proměnných však vede ke zlepšení kvantitativního popisu pouze o 0,003 mm. Pro srovnání použitím 75 harmonických proměnných dostaneme chybu o hodnotě 0,44 mm, což je zlepšení o 3% proti kvantifikaci s 20 harmonickými proměnnými.



Obr. 4. Aditivní efekt harmonických proměnných při rekonstrukci okraje oční se vzrůstajícím počtem harmonických proměnných.

N° harmonických proměnných	Průměrná odchylka (in mm)	Maximum (in mm)	Vzdálenost nejmenších čtverců (in mm ²)
1	2,7326	4,7920	8,6608
2	1,3694	2,1597	2,0420
3	0,8807	1,6191	0,8653
4	0,6383	1,1572	0,4508
5	0,5609	1,1035	0,3847
10	0,4788	0,9051	0,2883
15	0,4592	0,8959	0,2738
20	0,4558	0,9073	0,2714

Tabulka 2. Průměrné hodnoty chyby mezi původní a rekonstruovanou křivkou zastupující tvar okraje očníce.

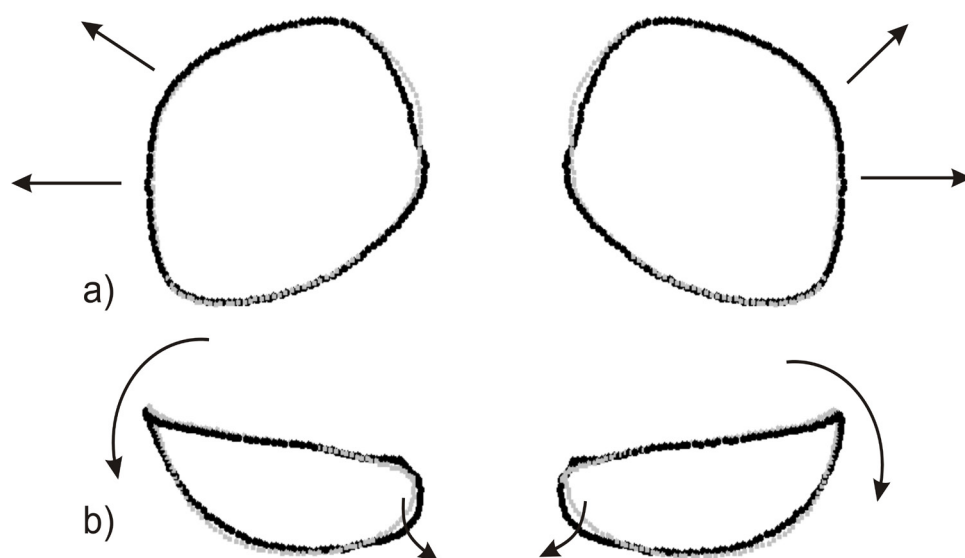
VÝSLEDKY

Složky variability ve tvaru okraje očníce

Sada sedmi hlavních komponent (PC1-7) získané odděleně pro pravou a levou stranu těla (vysvětlující shodně 93% celkové variability souboru) byla dále testována vícerozměrnou analýzou rozptylu hlavních efektů s následujícími faktory: populační afinita (3 úrovně, Praha, Lisabon, Coimbra), pohlaví (2 úrovně, muž, žena) a věková skupina (3 úrovně, ≤25let, 26-49let, ≥50let). Populační afinita byla určena jako nejvýznamnější faktor, který ovlivňuje tvar okraje očníce (Wilksova $\lambda = 0,20$, $p < 0,05$).

Z jednorozměrných testů vyplývá, že největší podíl mezipopulačních rozdílů vysvětlují PC1, PC2 a PC5. U českých jedinců je tvar očníce protažený do stran a hlavní osa očníce je orientována v horizontálním směru. Horní a vnitřní okraj jsou posazeny ventrálně do úrovně, ve které se nachází spodní okraj očníce. Křivka je z laterálního pohledu plochého tvaru a její orientace je umístěna blíže frontální rovině (Obr. 5a,b). Orbity portugalských lebek jsou eliptického tvaru, a hlavní osa očníce je šikmo skloněná. Na rozdíl od českých očníce se horní okraj očníce portugalských lebek ohýbá v mediolaterálním směru tak, že konkavita křivky směřuje dorzálně. Vnější okraj se ohýbá dozadu. Tento trend je patrný u obou portugalských sbírek, u coimberské je pak doplněn o orientaci orbit do stran (tzv. divergence očníce) (Obr. 5b).

Testováním hlavních komponent pravé a levé strany těla mužských a ženských lebek byly zjištěny statisticky významné rozdíly mezi pohlavími v hodnotách PC1 (Obr. 7). Mužská morfologie vchodu do orbity je charakteristická níže položeným horním okrajem očníce. Vnější okraj spolu s dolním vnějším rohem očníce se rozšiřuje dolů a do stran (Obr. 6). Nejdůležitější část pohlavních rozdílů však leží v zakřivení a prostorové orientaci křivky, jež se ztrácí, pokud okraj hodnotíme pouze ve frontálním pohledu.



Obr. 5. Srovnání průměrného tvaru okraje očnice českých (česká linie) a portugalských (šedá linie) lebek.

du. Mužské očnice jsou orientovány shodně dopředu a vykazují tendenci, v níž je horní okraj očnice položen více vpředu. Mužské očnice jsou dále charakteristické ohnutím horního a spodního okraje směrem dopředu, tak, že ohyb směřuje svou konvexitou dorsálně (Obr. 7). Pro ženské očnice je typický kulatější tvar s horním a spodním okrajem očnice zarovnaným shodně do frontální roviny. Kontury očnic nevykazují zalomení ve frontální rovině, jsou ploché a orientovány více do stran, než je tomu u mužských tvarů.

Mezi věkovými kategoriemi byly zjištěny statisticky významné rozdíly v hodnotách PC5 (Fig. 8). Párové srovnání post-hoc testy ukázalo, že v hodnotách PC5 se nejmladší věková skupina liší od obou starších věkových kategorií a tyto výsledky platí pro pravé i levé orbity. S věkem dochází k rozšíření dolního spodního rohu a ke snížení horního vnitřního rohu a okraje očnice.

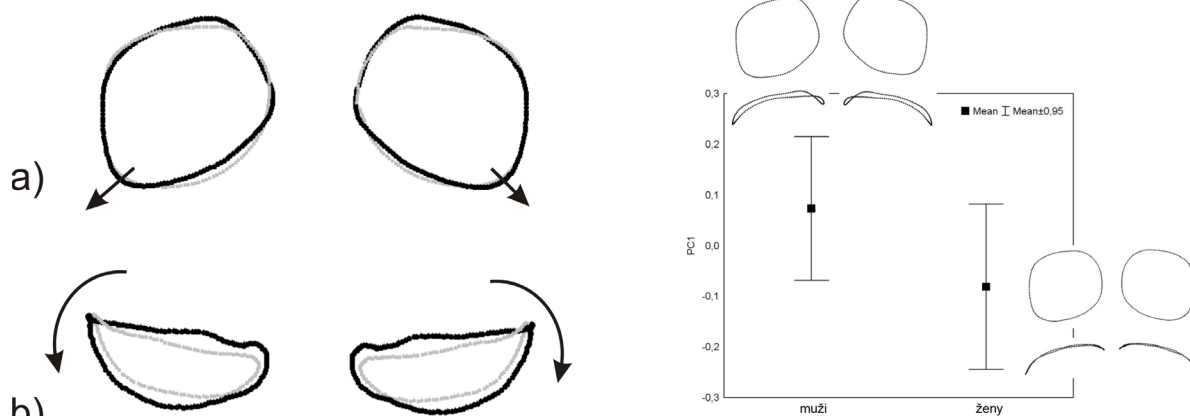
Statisticky významné výsledky interakce populace a pohlaví u vnořené analýzy rozptylu (vnořená MANOVA) naznačují, že české a portugalské lebky vykazují mírně odlišný vzorec sexuálního dimorfismu ve tvaru očnic. Tyto rozdíly jsou nejvíce zřetelné v hodnotách první hlavní komponenty. Zatímco očnice portugalských lebek vykazují v hodnotách PC1 shodně výraznější mezipohlavní rozdíly, očnice českých lebek tyto pohlavní rozdíly nesdílejí (Obr. 6).

Věkové závislosti ve tvaru okraje očnice, na rozdíl od pohlaví, nevykazují populačně specifické varianty. Jsou však závislé na pohlaví jedince. Změny, které jsou asociovány s ústupem dolního vnějšího rohu očnice směrem dolů, jsou v případě ženského pohlaví výraznější (Obr. 8).

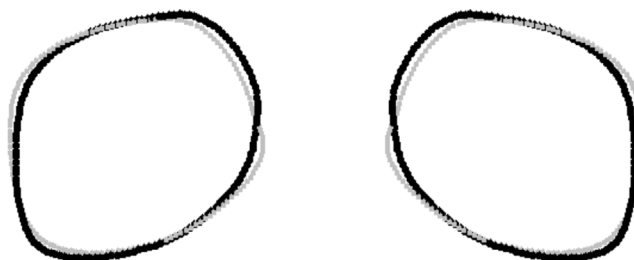
Alometrie

Závislost tvaru očnice na její velikosti byla vyjádřena hodnotou Pearsonova korelačního koeficientu mezi hodnotami určeného vztahem efektivních hlavních komponent a logaritmovanými hodnotami velikosti centroidu (log-CS) a dále na základě modelu vícerozměrné lineární regresní analýzy 120 Fourierovými koeficienty (závislé proměnné) a nezávislé velikostní proměnné (log-CS).

Ze sady 7 hlavních komponent korelovaly s hodnotou velikosti centroidu na 5% hladině významnosti pouze PC1 a PC5. Tvary očnic byly graficky znázorněny na základě regresního modelu (Wilksova $\lambda =$



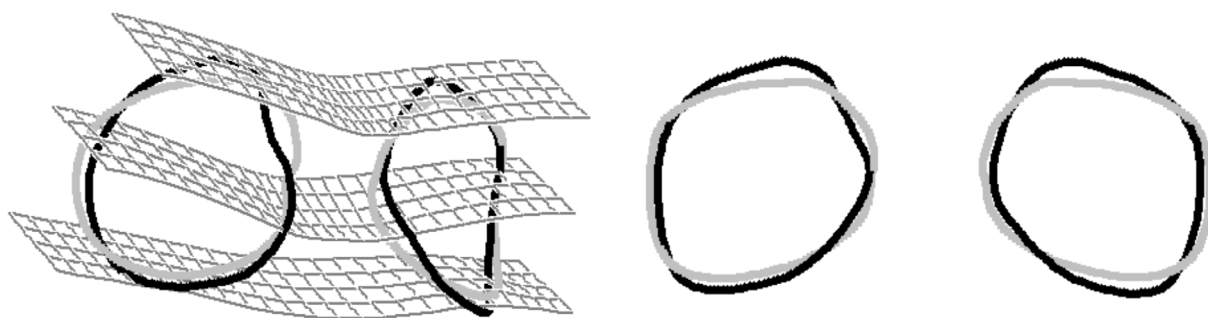
Obr. 6 a 7. Tvary okraje očnice zobrazující extrémní hodnoty první hlavní komponenty a hodnoty stejné proměnné kategorizované pro mužské a ženské lebky.



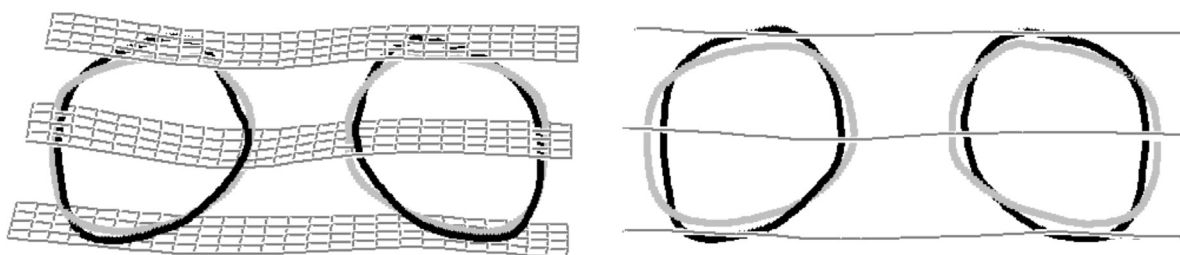
Obr. 8. Tvary okraje očnice zobrazující extrémní hodnoty páté hlavní komponenty.

0,81 a 0,84 pro pravé a levé očnice, $p < 0,05$), ve kterém jako nezávislá proměnná působily logaritmované hodnoty velikosti centroidu. Z vizualizace alometrických změn je patrné, menší orbity jsou obvykle širší a nabývají obdélníkového tvaru. Dále vykazují tendenci ohýbat se dopředu, podobně jako v případě tvarů mužských orbit. Větší očnice jsou naopak okrouhlé nebo elipsovité a jejich tvar ve frontální rovině je plochý bez většího prohnutí (Obr. 9). Tyto tvarové změny byly pozorovány i poté, co byl do analýzy zahrnut faktor pohlaví a jeho vliv byl kontrolován pomocí parciální korelace. Nicméně, nezávislé regresní modely pro mužské a ženské pohlaví poskytly rozdílné výsledky. U ženských orbit si se změnou velikosti kontura zachovává konstantní zakřivení, zůstává tak relativně rovná bez toho, aby se výrazně měnil průběh ve frontální rovině (v ose z). U mužských orbit je změna velikosti orbity vždy spojená se změnami v zakřivení. Tento výsledek naznačuje, že alometrické vzorce, jež se uplatňují během morfogeneze orbitální oblasti, jsou ovlivněny pohlavně specifickými činiteli (Obr. 10).

Zkoumány dále byly alometrické vztahy mezi tvarem orbity a hodnotami velikosti centroidu konfigurace 34 významných bodů obličejové části lebky a hloubkou orbity vyjádřenou vzdáleností spodního okraje *canalis opticus* od centroidu kontury očnice (data nejsou uvedena, více viz Urbanová 2009). Pozitivní statisticky významná korelace s velikostí obličeje byla zjištěna pro hodnoty PC1 ($R=0,19$, $p < 0,05$). Menší obličeje nabývají kulatějšího tvaru očí. Naopak větší obličeje jsou spojeny s očnicemi, jejichž tvar je protažený dolů a do strany. Tato závislost statisticky významná na 5% hladině významnosti se vytrácí, pokud parciální korelací kontrolujeme pohlaví lebky. S hloubkou očnice pozitivně korelovaly proměnné PC1 ($R=0,13$, $p < 0,05$), PC4 ($R=0,28$, $p < 0,05$) a PC5 ($R=0,11$, $p < 0,05$). Hlubší očnice jsou kulatější, laterální a mediální okraj je rovný, bez tendence se ohýbat. Naopak mělké orbity jsou ve frontální rovině prohnuté, tvar je protažený dolů a do strany. Na rozdíl od celkové velikosti statistická významnost není ovlivněna, pokud je pohlaví kontrolováno parciální korelací.



Obr. 9. Alometrie ve tvaru okraje očníce, šedá línie zobrazuje tvar při malých hodnotách velikosti centroidu, černá línie zobrazuje tvar při velkých hodnotách velikosti centroidu.



Obr. 10. Pohlavně specifický vzorec v alometrii okraje očníce, mužské očníce se se vzrůstající velikostí ohývají dolů a dopředu (vlevo), zatímco ženské zůstávají rovné ve frontální rovině (vlevo).

DISKUZE A ZÁVĚRY

Úskalí analýzy tvaru okraje očníce

Navzdory významnému postavení, které má očníce v morfologii lebky člověka i jiných obratlovců (Schleyer *et al.* 1971, Jacobshagen 1981, Schultz 1940, Seiffert, Kappelman 2001), byl tvar okraje očníce v minulosti trivializován do podoby dvourozměrné projekce nebo skalárních rozměrů. Důvodem byla absence dostupného technického vybavení a analytického nástroje, které by dokázaly zachytit trojrozměrnou podstatu okraje na jedné straně a spolehlivě ji číselně vyjádřit na straně druhé.

Technický pokrok, který byl učiněn v oblasti záznamu trojrozměrných dat, způsobil, že řada dříve nedostupných technických novinek se stala finančně i uživatelsky dostupnými na úroveň, která dovoluje každodenní použití v základním i aplikovaném výzkumu. Jedním z těchto přístrojů je také ramenový digitizér MicroScribe, jehož univerzální aplikovatelnost v biologii byla demonstrována v předchozích studiích (Blanco, Godfrey 2006, Rosas, Bastir 2003, Corner, Richtsmeier 1991, Kimmerle *et al.* 2007) a nachází uplatnění také v humanitních oborech (Clarkson 2010). MicroScribe reprezentuje komfortní, rychlý a snadný prostředek jak získat prostorová data – body nebo křivky. Protože se jedná o relativně novou metodu záznamu dat, její přesnost a spolehlivost při použití na osteologický materiál byla diskutována jen zřídka.

V této studii byla chyba záznamu dat vyjádřena vzdáleností mezi body dvou různých křivek při opakované digitalizaci. V porovnání s kranio-metrickými postupy, kde je hranice přesnosti měření očníce určena hodnotou 0,5 mm (Broca 1875), je chyba záznamu okraje orbity pomocí digitizéru srovnatelná nebo nepatrně vyšší. Abychom snížili vliv této nechtěné variability na studium morfologie, byl každý studovaný okraj očníce obtažen opakovaně a do vlastní analýzy tvaru vstupovaly aritmetické průměry z pěti trasování. Největší chyba záznamu dat byla zjištěna u křivek, které byly u vyšetřované očníce zaznamenané jako první. Nejmenší odchylky naopak poskytlo následující, druhé, obtažení. S každým dal-

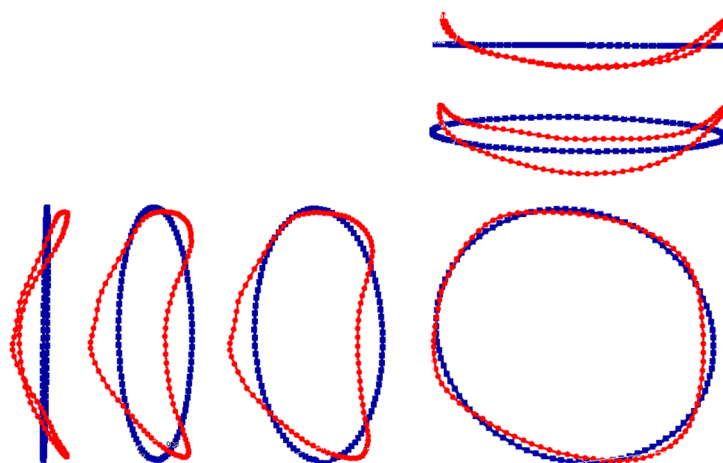
ším opakováním narůstá průměrná chyba digitalizace téměř rovnoměrně a dosahuje druhého maxima u poslední páté křivky. Opakováním stále stejného cyklu pohybů, které badatel při digitalizaci vykonává, se snižuje soustředění a ve výsledku to vede k narušení kvality záznamu a přesnosti dat. Tento výsledek naznačuje, že optimální počet opakování zaručující nejvyšší přesnost digitalizace představují tři křivky s tím, že první křivka je následně odstraněna.

Jak se ukázalo, chyba digitalizace úzce souvisí s umístěním stojanu s lebkou a jeho orientací. V případě záznamu tvaru okraje očnic se to projevilo vyšší chybou u struktur umístěných na pravé straně zkoumaných lebek. Důvody této diskrepance můžeme nalézt v roli, kterou hraje stranová dominance horních končetin, v tomto případě pravorukost hodnotitele. Digitalizace křivky začínala shodně na pravé i levé straně v bodě dakryon na vnitřní straně orbity. Na pravé straně však poté pokračovala vzhůru proti směru hodinových ručiček. Pohyb pravé ruky s hrotem tímto směrem vyžaduje větší soustředění než na straně levé. Současné hřbet ruky částečně brání přesnému umístění hrotu nebo kontrole jeho pozice. Na levé straně je pohyb ruky s hrotem přirozenější a pozice hrotu je ve všech polohách pod kontrolou hodnotitele. Další možná vysvětlení pro zjištěnou diskrepanci mohou pramenit ze stranové dominance očí, odlišného úhel lomu světla u obou očí apod. (Mansour *et al.* 2003, Chia *et al.* 2007). Ovšem podíl těchto chyb je vzhledem ke ztrátě informací a míře aproximace tvaru v následných krocích analýzy tvaru snadno zanedbatelný.

Počet 20 harmonických proměnných je číslo, které se tradičně objevuje při použití 2D Fourierovy analýzy v biologických studiích (Ferson *et al.* 1985, Lestrel 1989, Viguiera, Tort 2000) a lze jej považovat za optimální hodnotu i v případě 3D modifikace Fourierovy analýzy tvaru okraje očnice člověka. Není žádným překvapením, že přesnost číselného vyjádření tvaru okraje roste úměrně k počtu harmonických proměnných. Přesnost, s jakou lze popsat tvar orbit s použitím 20 harmonických proměnných, je srovnatelná s průměrnou chybou, kterou uvádí Lestrel a Brown (1976) pro popis báze lebky v laterálním pohledu (0,36 mm). Chen *et al.* (2000) naopak apelovali na dodržování hranice chyby 0,1-0,2 mm, protože pouze tímto způsobem může být zajištěna homologie mezi původní zaznamenaným obrysem a jeho číselným vyjádřením. Pro účely kvantifikace trojrozměrných vlastností okraje očnice je však zajištění této podmínky nedosažitelným úkolem. Navýšení počtu harmonických proměnných nemá na chybu vyjádření požadovaný vliv. Výrazné zlepšení kvality číselné aproximace platí pouze u prvních pěti harmonických proměnných. U desáté a každé následující harmonické proměnné byla podchycena většina z globálních vlastností tvaru očnice a každé další zlepšení je pouze nepatrné. Harmonické proměnné s vyšším pořadovým číslem (>10) zachytí jemnější tvarové charakteristiky a nepravidelnosti, ale zároveň s nimi se do záznamu dostane nechtěný šum, který nemá biologické opodstatnění.

Z podstaty Fourierovy analýzy vyplývá, že hlavní zaměření metody spočívá v popisu globálních rozdílů ve tvaru. Lokální odchylky a nepravidelnosti jsou harmonickými proměnnými s nižším pořadovým číslem poměrně obtížně popsitelné. Náhlá a ojedinělá nepravidelnost se nezbytně projeví jako Pinocchio efekt. Přítomnost anatomické struktury jakou je *incisura frontalis* nebo *incisura supraorbitalis*, je jednou z takových nepravidelností, které narušující kvantitativní popis tvaru. Přestože 20 harmonických lze považovat za optimální počet pro popis variability okraje očnice, chyba vznikající v důsledku Pinocchiova efektu je stále zřetelná. Navzdory očekávání se však nejvyšší chyba neobjevuje v blízkosti výskytu zářezu (ů) horního okraje očnice (*incisura frontalis*, *incisura supraorbitalis*), ale v oblastech, které evidentně kompenzují výskyt tohoto jevu. Tento příklad názorně ilustruje jedno z největších úskalí analýzy tvaru pomocí Fourierovy transformace. Jiné metodické postupy, ať již z oblasti analýzy signálů nebo jinde, by mohly poskytnout účinnější řešení tohoto nedostatku. Například vlnková neboli waveletová analýza byla navržena jako vhodné východisko (Lestrel *et al.* 2005).

Není velkým překvapením, že chyba kvantifikace tvaru, tedy dekompozice do hodnot Fourierových koeficientů, pro 3D křivky je vyšší než když popisujeme rovinné obrysy. Odchylky od skutečného tvaru se projevují především v první harmonické proměnné. To je důsledek prostorové složitosti tvaru okraje očnice. U 2D analýzy se první elipsa i kontura očnice nacházejí v jedné rovině. V 3D analýze je však kontura popisována ve všech třech rovinách (osách), zatímco tvar první elipsy zůstává rovinný (Obr.



Obr. 11. Srovnání tvaru elipsy první harmonické proměnné a tvaru křivky okraje očnice z různých úhlů pohledu (vpravo nahoře - shora, vpravo dole - zepředu, vlevo dole - z boku).

11). Elipsa je pouze orientována do postavení, které odpovídá maximálnímu průměru obrysu. V důsledku toho jsou do celkové chyby započítávány prostorové rozdíly zahrnující všechny tři rozměry. Jak bylo zjištěno použitím 20 harmonických proměnných je optimální pro oba typy analýzy a chyba dekompozice 2D i 3D obrysů očnic poskytuje velmi podobné výsledky (Urbanová 2009).

Výběr správného postupu standardizace, který vyhovuje biologické interpretaci i metodologickým nárokům, je klíčovým krokem analýzy tvaru. Kvantifikace tvaru okraje očnice postupy 3D Fourierovy analýzy se vyznačuje komplexností, ale zároveň naráží na úskalí, kterým je absence vhodného standardizačního postupu podobnému tomu pro 2D eliptickou Fourierovu analýzu. Jelikož poloha lebky při trasování kontur nebyla žádným způsobem normalizována, vynechání postupu standardizace dat nepřicházelo v úvahu. Lze argumentovat, že volba standardizovat kontury očnic do frankfurtské horizontály, je řešením arbitrárním a nelze ji aplikovat univerzálně na všechny studie podobného typu. Ustavení lebek do frankfurtské horizontály je však standardně používaným postupem v tradiční kranioometrii a úzký vztah očnice k její definici snižuje arbitrární charakter této volby. Za další, použití frankfurtské horizontály jako referenční roviny pro standardizaci přináší výhody důležité pro interpretaci zjištěných biologických rozdílů. Při vzpřímeném postoji se poloha hlavy dospělých jedinců přirozeně ustavuje do této polohy. Registrací do frankfurtské horizontály tak mohly být do analýzy zahrnuty aspekty morfologie, které by se při volbě jiné standardizace ztratily, tj. konverge/divergence orbit, míra s jakou obě orbity směřují stejným směrem a frontalita/inklinace je míra s jakou je horní a spodní okraj orbity zarovnan do stejné frontální roviny.

Mezipopulační rozdíly

Populační afinita vzorku byla určena jako základní kritérium určující rozdíly ve tvaru okraje očnice. Analýza tvaru ukázala, že morfogeneze orbitální oblasti lebky člověka úzce souvisí s populačně a geograficky podmíněnými rozdíly ve tvaru kraniofaciálního komplexu. Studované soubory pocházely ze dvou odlišných evropských regionů – střední Evropy a jihozápadní Evropy. Tyto oblasti se liší zeměpisnou polohou, podnebím, genetickou strukturou populace, potravními návyky aj. Všechny tato faktory jsou známé svým vlivem na tvar kostěného podkladu obličeje (Crogner 1981, Roseman, Weaver 2004). Nejvýraznější rozdíly, které byly mezi oběma oblastmi zaznamenány ve tvaru očnic, se vztahují k zakřivení okraje v mediolaterálním směru. Podle Enlowa a Hanse (1996) existují dva základní mechanismy, jakými se ustavují tvarové rozdíly v orbitální oblasti. Za prvé, stavebním základem veškerých kostěných komponent obličeje je báze lebky (Lieberman *et al.* 2000). Lebky české populace jsou typické relativ-

ně krátkou, ale širokou bází (Urbanová 2009). Tyto vlastnosti se odráží v šířkových rozměrech obličeje i jeho komponent. Naopak portugalské populace se vyznačují dolichocefalními tendencemi (Fetter 1967) s úzkou dozadu protáhlou bází a úzkým vysokým obličejem (Urbanová 2009). V průběhu ontogeneze poskytuje široká báze českých lebek dostatečný prostor pro růst do šířky, především v oblasti lícních kostí a horní čelisti. Očnice českých lebek, především jejich vnější okraje, mají dostatek prostoru pro expanzi a nejsou nuceny postupovat strukturální přestavbu. U portugalských lebek však užší báze vytváří kostěnou hranici, kterou lze stěží překonat. Kostěný podklad obličeje se tak formuje v prostorově omezeném morfogenetickém poli a nedostatek prostoru je kompenzován ohnutím vnějšího okraje dorzálním směrem. Tento mechanismus podmiňující vznik odlišné morfologie se označuje jako „prostorové sbalení“ (anglicky *spatial packing*) a je spojován se vznikem typického zalomení báze u anatomicky moderního člověka (Ross, Ravosa 1993).

Mezipohlavní rozdíly

Tvar okraje očnice je tradičně uváděn jako jeden ze spolehlivých ukazatelů pohlaví jedince na lebce člověka (např. Ferembach *et al.* 1980, Rösing *et al.* 2007). 3D tvarová analýza ukázala, že síla tohoto znaku by neměla být přeceňována. Na rozdíl od předchozích studií bylo zde ukázáno, že hlavní podíl sexuálního dimorfismu není určen tvarem okraje očnice ve frontálním pohledu, ale rozdíly v zakřivení okraje a vzájemné prostorové orientaci očních uvnitř kostěného podkladu obličeje. Zatímco mužské očnice jsou charakteristicky prohnuté a umístěné ve frontální rovině, ženské orbity postrádají výraznější prohnutí a směřují do strany.

Expanze mozku byla již dříve identifikována jako jeden z mechanismů, který se účastní ustavení prostorové orientace očních, tj. konvergence a divergence (Enlow, Hans 1996). Vznik mezipohlavních rozdílů je totožný s procesy, které pozorujeme během růstu a vývoje morfologie lebky nedospělého jedince. V průběhu ontogeneze klenba lebky zvětšuje svůj objem. Tlak, který vyvíjí zvětšující se čelní a spánkový lalok neokortexu na laterální stěny lebky mění prostorovou orientaci okraje očnice. U žen je absolutní velikost mozku v průměru menší o 9-11%. Tlak čelního a spánkového laloku na boční stěny klenby lebky je menší, a ženské očnice uchovávají infantilní divergentní postavení očních. Vyšší tlak mozku na laterální stěny mužské lebky ustavuje očnice do konvergentního postavení.

Projevy stárnutí ve tvaru očních

Orbity podléhají v dospělosti pouze nepatrným změnám, které jsou postupné a patrné až v pozdějším věku. Analýza tvaru ukázala, že věkové změny jsou spojené s rozpínáním okraje očnice ve spodní vnější části, podobně jako je tomu u měkkých tkání (Sforza *et al.* 2009). Tyto závěry se shodují s věkovými změnami, které popisují Pessa a Chen (2002). Podle závěrů analýzy tvaru existují mezi pohlavími rozdíly v rozsahu projevů stárnutí. Rozsah těchto změn se zdá být větší u žen než u mužů, což by naznačovalo, že „stárnutí“ okraje očnice je buď podmíněno odlišnými mechanismy, nebo odlišnou intenzitou a nástupem působících faktorů. Mezi tyto faktory můžeme zařadit neotenií či pohlavní výběr jako projev atraktivity obličeje nebo pokles atraktivity u starších žen po menopauze spojený s ukončením reprodukčního cyklu.

Alometrie

Tvar okraje očnice úzce souvisí s celkovou velikostí očnice. Pro menší očnice je charakteristický obdélníkový tvar a tendence k ohybu křivky ve frontální rovině. Větší očnice jsou naopak kulaté až elipsovité a typicky ploché bez výraznějšího prohnutí. Ačkoliv se v podstatě jedná o tvary, které vedou k daným hodnotám velikostního parametru, výsledek morfogeneze pod vlivem velikosti je spojen s pohlavím jedince. Přítomnost pohlavně specifických vzorců alometrických změn naznačuje, že žena určité velikosti těla bude vykazovat jiný tvar okraje očnice než muž stejných tělesných proporcí a naopak.

Předchozí práce ukázaly, že alometrie okupuje přední místo mezi faktory, které se podílejí na formování mezipohlavních rozdílů ve tvaru kraniofaciální oblasti (Rosas, Bastir 2002, Urbanová 2009). V hor-

ní části obličeje se obecně uvažuje o dvou základních změnách podmíněných velikostí těla. První z nich souvisí se vztahem mezi velikostí těla s objemem čelní dutiny (*sinus frontalis*) a v druhém případě má velikost těla vliv na modulaci nadočnicové a glabelární oblasti čela. S velikostí těla se rozšiřuje glabelární a nadočnicová oblast směrem dolů a dopředu. Vedle těchto oblastí se s velikostí těla modifikuje také nosní dutina, jejíž zvětšení koreluje s velikostí plic a s tlakem vzduchového sloupce. Díky topografickému umístění je očníce s těmito alometricky podmíněnými změnami strukturálně svázána a to se také odráží ve tvaru jejího okraje. Viditelné alometrické změny lze pozorovat v posunu horního okraje a horního vnitřního rohu očníce směrem dolů a nárůstu konvergence u jedinců s větší velikostí těla. Vedle vlivu čelní oblasti tyto změny souvisí také s velikostí mozku (Enlow, Hans 1996), především pak s velikostí čelního a spánkového laloku. Expanze většího mozku vyvolává tlak na boční a horní oblast očníce, což ve svém důsledku vede ke snížení výšky očníce a změně polohy vůči frontální rovině, tj. změny ke konvergentnímu postavení očníce.

Jako nejvýznamnější byly zjištěny rozdíly v zakřivení okraje očníce, který si u žen s větší velikostí těla zachovává relativní plochý rovinný charakter, zatímco u mužů se ohýbá dopředu tak, že svou konvexitou směřuje dozadu. Tento znak souvisí s prodlouženou maturací mužů v pubertě. Zatímco u žen je vývoj obličejové části ukončen brzy po dosažení pohlavní zralosti, u mužů pokračuje strukturální přestavba až do pozdějšího období adolescence. V průběhu této tzv. prodloužené maturace (Burke, Beard 1979) dochází k remodelaci glabelární a nadočnicové oblasti. Vlastní mechanismus této změny je určen apozicí vnější vrstvy kompaktní kostní tkáně (*lamina externa*) čelní kosti.

Závěr, který naznačuje rozdílný průběh alometrických změn na lebce a ve svém důsledku se projevuje v orbitální oblasti rozdíly mezi pohlavími, je pravděpodobně určen jak primárními (geny na pohlavních chromozomech, pohlavní hormony, růstové trajektorie) tak sekundárními (biomechanika pohybu, lokomoční návyky a postoj těla aj.) faktory a vývojem od rozdílného prenatalně nastaveného základu.

Kvantitativní analýza tvaru dokázala zachytit multifaktoriální podstatu tvaru okraje očníce a současně ukázala nové souvislosti v morfogenezi lebky člověka. Nízká úroveň mezipohlavních rozdílů, jež je překryta mezipopulačními rozdíly, naznačuje, že tvar kraje očníce by neměl být neuváženě používán v metodách pro určení pohlaví na lebce. Ze stejného původu nelze doporučit ani využití Fourierovy analýzy tvaru okraje očníce ve forenzní praxi.

CITOVANÁ LITERATURA

- Blanco M.B. – Godfrey L.R. (2006): Craniofacial sexual dimorphism in *Alouatta palliata*, the mantled howling monkey. *Journal of Zoology* 270: 268 – 276.
- Broca, P. (1875) Instructions craniologiques et craniométriques. *Bulletin et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* (2nd Series) 2: 1–203.
- Clarkson, C. (2010): Regional Diversity Within the Core Technology of the Howiesons Poort Techno-Complex. In: S. J. Lycett, P.R. Chauhan (eds.): *New Perspectives on Old Stones. Analytical Approaches to Paleolithic Technologies*, Springer Science+Business Media, LLC, pp. 43 – 60.
- Corner B.D. – Richtsmeier, J.T. (1991): Morphometric analysis of craniofacial growth in *Cebus apella*. *American Journal of Physical Anthropology* 84: 323–342.
- Crognier E. (1981) Climate and Anthropometric Variation in Europe and the Mediterranean Area. *Annals of Human Biology* 8: 99–107.
- Enlow D.H. – Hans, M.G. (1996): *Essentials of Facial Growth*. W.B. Saunders Company.
- Ferembach, D. – Schwidetzky, L. – Stloukal, M. (1980): Recommendations for age and sex diagnoses of skeleton. *Journal of Human Evolution* 9: 517 – 549.
- Ferson, S. – Rohlf, F.J. – Koehn, R.K. (1985): Measuring shape variation of two-dimensional outlines. *Systematic Zoology* 34: 59–68.
- Fetter, V. et al. (1967): *Antropologie*. Academia, Praha.
- Chen, S.Y.Y. – Lestrel, P.E. – Kerr, W.J.S. – McColl, J.H. (2000): Describing shape changes in the human mandible using elliptical Fourier functions. *European Journal of Orthodontics* 22: 205–216.
- Chia, A. – Jaurigue, A. – Gazzard, G. – Wang, Y. – Tan, D. – Stone, R.A. – Saw, S.M. (2007): Ocular Dominance, Laterality, and Refraction in Singaporean Children. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 48: 3533–3536.
- Jacobshagen, B. (1981): Comparison of morphological factors in the cranial variation of the great apes and man. In: A.B. Chiarelli, R.S. Corruccini (eds.): *Primate Evolutionary Biology*, pp. 98–108. Springer, Berlin.
- Jacobshagen, B. (1982): Variations in size and shape of the orbital contour. A comparison between man and the greater apes using Fourier analysis. *Man and his Origin. Anthropos (Brno)* 21: 113–130.
- Jolliffe, I.T. (1986): *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Kimmerle, E.H. – Ross, A. – Slice, D. (2008): Sexual Dimorphism in America: Geometric morphometric Analysis of the Craniofacial Region. *Journal of Forensic Sciences* 53: 54–57.
- Lestrel, P.E. (1989): Method for Analyzing Complex Two-Dimensional Forms: Elliptical Fourier Functions. *American Journal of Human Biology* 1:149–164.
- Lestrel, P.E. – Brown, H.D. (1976): Fourier Analysis of Adolescent Growth of the Cranial Vault: A Longitudinal Study. *Human Biology* 48: 517–528.
- Lestrel, P.E. – Cesar jr., R.M. – Takahashi, O. – Kanasawa, E. (2005): Sexual dimorphism in the Japanese cranial base: A Fourier-wavelet representation. *American Journal of Physical Anthropology* 128: 608 – 622.
- Lestrel, P.E. – Read, D.W. – Wolfe, C. (1997): Size and shape of the rabbit orbit: 3-D Fourier descriptors. In: P.E. Lestrel (ed): *Fourier Descriptors and Their Applications in Biology*, pp. 359–378. Cambridge University Press.
- Lestrel, P.E. – Huggare, J.A. (1997): Cranial base changes in shunt-treated hydrocephalics: Fourier descriptor. In: P.E. Lestrel (ed): *Fourier Descriptors and their Applications in Biology*, pp 322–339. Cambridge University Press.

- Lieberman, D.E. – Pearson, O.M. – Mowbray, K.M. (2000): Basicranial influence on overall cranial Shape. *Journal of Human Evolution* 38: 291–315
- Mansour, A.M. – Sbeity, Z.M. – Kassak, K.M. (2003): Hand dominance, eye laterality and refraction. *Acta Ophthalmologica Scandinavica* 81: 82–83.
- Martin, R. – Saller, K. (1957): *Lehrbuch der Anthropologie*. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart.
- Noble, V.E. – Kowalski, E.M. – Ravosa, M.J. (2000): Orbit orientation and the function of the mammalian postorbital bar. *Journal of Zoology London* 250: 405 – 418.
- Pessa, J.E. – Chen, Y. (2002): Curve Analysis of the Aging Orbital Aperture. *Plastic & Reconstructive Surgery* 109: 756–757.
- Rosas, A. – Bastir, M. (2002): Thin-plate spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology* 117: 236–245.
- Roseman, C.C. – Weaver, T.D. (2004): Multivariate Apportionment of Global Human Craniometric Diversity. *American Journal of Physical Anthropology* 125: 257–263.
- Ross, C.F. – Ravosa, M. (1993): Basicranial flexion, relative brain size and facial kyphosis in nonhuman primates. *American Journal of Physical Anthropology* 91: 305–324.
- Ross, C.F. (1995): Allometric and functional influences on primate orbit orientation and the origins of the Anthropoidea. *Journal of Human Evolution* 29: 201 – 227.
- Rösing, F.W. – Graw, M. – Marré, B. – Ritz-Timme, S. – Rothschild, M.A. – Röttscher, K. – Schmeling, A. – Schröder, I. – Geserick, G. (2007): Recommendations for the forensic diagnosis of sex and age from skeletons. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology* 58: 75 – 89.
- Seiffert, E.R. – Kappelman, J. (2001): Morphometric variation in the hominoid orbital aperture: a case study with implications for the use of variable characters in Miocene cararrhine systematics. *Journal of Human Evolution* 40: 301–318.
- Slice, D. (2002): Morphueus et al., beta version morphometric analysis software.
- Sforza, C. – Grandi, G. – Catti, F. – Tommasi, D.G. – Ugolini, A. – Ferrario, V.F. (2009): Age- and sex-related changes in the soft tissues of the orbital region. *Forensic Science International* 185: 115 – 123.
- Schleyer, F. – Ihm, P. – Bensch, W. (1971): Über die Geschlechtsverschiedenheit des Umrisses der knöchernen Orbita. *Zeitschrift für Rechtsmedizin* 69: 168–172.
- Schultz, A.H. (1940): The size of the orbit and of the eye in primates. *American Journal of Physical Anthropology* 26: 389–408.
- Urbanová, P. (2009): A Study of Human Craniofacial Variation by Using Geometric Morphometrics. Dizertační práce, Masaryk University, Brno. (http://is.muni.cz/th/21708/prif_d/Urbanova_2009.pdf, 12.12.2010)
- Viguiera, B. – Tort, A. (2000): Morphologie crânienne et mandibulaire des Indrinae. Apports des méthodes Procrustes et des analyses de Fourier. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la vie/Life Sciences* 323: 573–582.
- Vinyard, C. – Ravosa, M.J. – Wall, C.E. (2008): *Primate Craniofacial Function and Biology*. Springer Science.

Kapitola 3

Analýza tvaru mozkovny jihoamerických mumii z Náprstkova muzea Praha

ÚVOD

Nálezy mumifikovaných lidských těl vnášejí do antropologického výzkumu prvek, který obohacuje zdroje poznání a poskytuje detailnější informace o vzhledu a životě jednotlivců i celých populací. Přítomnost kůže, vnitřních orgánů nebo jiných tkání těla, jež se u lidských pozůstatků při standardním průběhu tafonomických procesů nezachovávají, umožňují antropologovi přejít od výhradně osteologicky zaměřené analýzy k deskriptivním a analytickým postupům zahrnujícím měkké tkáně, které mohou odkrýt hlubší souvislosti týkající se biologie člověka i jeho kultury.

Mumifikovaná těla mají celosvětové rozšíření a setkáváme se s nimi v různých časoprostorových kontextech. Přirozeně mumifikovaná těla se koncentrují v oblastech příznivých pro rozvoj mumifikačních procesů, jako jsou aridní oblasti severní Afriky (Sahara), západního pobřeží Jižní Ameriky (Atacama), vysokohorské oblasti Alp nebo And. Souhrou vhodných působících faktorů může mumifikace nastat také v méně extrémních podmínkách, jako jsou uzavřené prostory krypt, sklepy, půdy, stodoly nebo hrobová jáma s porózním půdním zásypem (Galloway 1997, Anderson, Cervenka 2002, Haglund 2002).

Mumifikaci obecně označujeme takové změny, při kterých dochází ke zpomalení nebo úplnému zastavení rozkladných procesů tělních tkání a k jejich uchování po dobu výrazně přesahující časový interval po smrtelných změnách. Uchování měkkých tkání těla může nastat přirozeně působením příznivých faktorů endogenní nebo exogenní povahy, nebo uměle vlivem chemických nebo fyzikálních činidel. U přirozeně mumifikovaných těl je proces navozen rychlou dehydratací tkání po smrti. Nejčastějším faktorem bývá cirkulace suchého teplého nebo studeného vzduchu (pouště, ledovce). Stejný princip, to znamená rychlé odčerpání vody z rozkládajícího se těla, se uplatňuje u mumifikace v solném prostředí (například nález „muže v soli“ v solných dolech v Hallstattu, Rom 1999) nebo v prostředí bohatém na těžké kovy, např. arsen. Spekuluje se také o tom, že v pouštních oblastech Jižní Ameriky (Atacama, Chile) byl vedle teplého suchého podnebí důležitým působícím faktorem mumifikace vysoký obsah dusíku v půdě. Dusičnany v roztoku vytvářejí prostředí o osmoticky vyšší koncentraci, která je vyrovnávána odčerpáním vody z pohřbeného těla. Podobně i postupy uměle navozené konzervace byly v minulosti založeny na principu rychlé dehydratace tkání. Z Herodotových zápisků máme doloženo, že těla mrtvých v Egyptě určená k mumifikaci byla dehydra-

tována natronem, tedy směsí sodných, vápenitých a sirných soli. Naopak z nálezů mumie ve Venezuele, Kolumbii nebo ekvádorské kultury Jivaro či peruánské kultury Nasca je známo, že těla byla vysušována kouřem (Aufderheide 2003).

Průběh a rozsah mumifikace se odvíjí nejen od prostředí, ve kterém proces probíhá, ale závisí také na typu tělní tkáně, kde se procesy rozvíjí. Rozklad těla nastupuje jako první v tkáních s vysokou enzymatickou aktivitou. Nejdříve jsou zasažena játra, trávicí trakt, plíce a mozková tkáň. Uchování těchto částí těla bývá výjimečné, a pokud dojde k jejich mumifikaci, výsledkem je zmenšená amorfní tuhá masa (Zimmerman 1978). Velmi příznivé podmínky pro uchování mozkových tkání naopak vytváří anaerobní kyselé prostředí, což dokládají těla uchovaná v rašeliništích v Dánsku a Velké Británii (Brothwell, Gill-Robinson 2002). U umělých mumifikačních postupů se před procedurou vnitřní orgány vyjímaly a poté se buď vkládaly do nádob (kanopy ve starověkém Egyptě) nebo zpět do hrudní a břišní dutiny (kultura Chinchorro v Chile). Díky Herodotovi je nám dobře znám způsob extrakce mozkové tkáně přes *lamina cribrosa* čelní kosti. U nascazkých mumifikovaných hlav z Peru bylo vyjmutí prováděno přes zvětšený *foramen magnum* na týlní kosti (Verano *et al.* 1999). Uchování tkání bylo obvykle dále podpořeno impregnací konzervačními činidly, jako je pryskyřice (Inkové, Peru) nebo klíh.

Jihoamerické mumie

S mumifikovanými lidskými těly se můžeme setkat v téměř každé z předkolumbovských kultur severní a západní části kontinentu. Jedná se z větší části o přirozeně mumifikovaná těla, která se uchovala působením příznivého teplého a suchého klimatu. Přesto nebo právě proto máme z Jižní Ameriky také nejstarší doklady o praktikování mumifikačních postupů. Nejstarší mumie datované do období 8000-7000 let př. n. l. jsou spojovány s chilskou kulturou Chinchorro (9000-1500 př.n.l.). Těla byla připravována velmi originálním způsobem zahrnující preparaci skeletu zemřelého a zpětné modelování tvaru těla včetně obličeje z hlíny. Tradice zanikla ve 2. tisíciletí př. n. l. a v pozdějších kulturách již nenašla následníka.

Konzervace těl mrtvých z pozdějších jihoamerických kultur probíhala především vlivem příznivého aridního klimatu a upravována byla pouze výjimečně. Praktikování určitých postupů umělé mumifikace dokládají nálezy mumii v oblastech méně optimálních pro přirozené uchování těl (pobřeží, nížiny). V obou případech však byly vnitřní orgány obvykle z těla vyjmuty. Eviscerace byla opět vázána na přírodní podmínky, ve kterých byla těla uchována. Typická byla zejména v nížinách tropických oblastech s rychlejším stupněm dekompozice měkkých tkání.

Jihoamerické kultury jsou charakteristické unifikovaným pohřebním ritem (s výjimkou již zmíněné kultury Chinchorro), při kterém je tělo, později mumifikované, uloženo v typické skrčené tzv. fetální poloze s nohama skrčenými a přitaženými k trupu, hlavou položenou na kolenou a s rukama složenými u kotníků nebo mezi bradou a koleny. Těla byla do okrouhlé hrobové pokládána individuálně v sedící poloze a obalená tkanými nebo vlněnými látkami, rohožemi a omotána provazy z rostlinného pletiva. U některých inckých mumii byla okolo těla postavena konstrukce z proutí (Aufderheide 2003). Hrobový inventář obsahující lastury mlže rodu *Spondylus* a nástroje k jejich otvírání, miska nebo naběračka z tykve, váčky s kořením, lano z pruhu tulení kůže, košík k nošení břemen, svazek rybářské šňůry s kovovými háčky, šňupka z ptačí kosti určená k vdechování halucinogenního prášku, hřebínek z kaktusových ostnů, byl ukládán nad nebo pod tělo, v některých případech také do záhybů obalové tkaniny. Obecně se uvádí, že tento pohřební ritus vymizel s příchodem Evropanů, úpadkem a zánikem kultur i pod vlivem křesťanství. Přesto jsou známy doklady mumii s křesťanskými milodary (Aufderheide 2003).

Jihoamerické mumie ve sbírkách Náprstkova muzea

Ve sbírkách Náprstkova muzea Praha (NMP) se nacházejí 4 jihoamerické mumie původem z provincie Tarapacá v severní Chile datované do období mezi lety od 1000 do 1500 n.l., doby mezi pádem říše Tiwanaku a před nástupem Inků. Mumie jsou k dispozici v různém stavu zachování. Kompletní je pouze tělo dospělé-

ho jedince (mumie č. 1), které pro Náprstkovo muzeum získal výměnou s Universidad de Chile bývalý ředitel muzea, amerikanista dr. Václav Šolc při svém pobytu v Chile koncem 60. let 20. století (Monika Baďurová, osobní sdělení). Nález původem z rybářské lokality Patillos je datován do období mezi lety 1250-1500 n. l. Mumifikované tělo se nachází ve skrčené poloze, typické pro ostatní jihoamerické mumie. Větší část trupu a dolní končetiny jsou obalené pláštěnkou. K tělu mumie jsou přibaleny trubičky a lastura mlže. Dále se ve sbírkách nachází nekompletní mumifikované tělo nedospělého jedince (mumie č. 2), k němuž chybí bližší dokumentace. Torzo bez hlavy, u kterého schází levá polovina hrudníku, levá horní končetiny a distální části pravé horní končetiny (část předloktí a ruky), se stejně jako v předchozím případě nachází ve skrčené poloze. Hlava byla oddělena od těla *postmortem*. Třetí položkou ve sbírkách NMP je mumifikovaná hlava ženy (mumie č. 3), která pochází z údolí Azapa poblíž města Arica v severním Chile a je datovaná do období zhruba mezi lety 1000-1450 n. l. Hlava je relativně v dobrém stavu zachování. Zachovány jsou jak měkké části obličeje, tak vlasy mumie s upraveným účesem. Ze stejné oblasti jako mumie ženy je ve sbírkách k dispozici také vak s ostatky dítěte (mumie č. 4).

Výzkum umělých deformací

Praktiky umělých deformací lebek jsou podobně jako mumifikace u předkolumbovských populací Jižní Ameriky doložené z mnoha archeologických i historických pramenů (Malý 1926, Antón 1989). Deformace klenby lebky, ať už záměrná, vyvolaná cíleně vyvíjeným tlakem na mozkovnu dítě v raných fázích postnatálního vývoje nebo neúmyslná v důsledku dlouhodobé opakované zátěže na organismus v jednom směru, jsou fenoménem, který pozorujeme napříč kontinenty i kulturami v různých časových horizontech. Také na jihoamerickém kontinentě jsou nálezy konzistentní v geografickém rozšíření s nebyvalou kontinuitou z pohledu časového vývoje osídlení i archeologických kultur.

Výzkum kraniálních deformací se těšil vědeckému zájmu již od raných dob moderní antropologie (Malý 1926). Tradiční typologický přístup rozeznává 2 základní typy deformací: tabulární (anteroposteriorní, frontooccipitární) a obvazový (cirkulární, aymarský, bandážování) (Blom 2005). Tyto formy odpovídají dvěma rozdílným způsobům, jakým k deformaci docházelo. Ve skupině tubulárních deformací se k čelní a týlní oblasti dítěte přikládaly destičky, jejichž tlak působil tak, že docházelo k jejich oploštění. Současně s tím temenní kosti vystupovaly do výšky. Při použití obvazového typu deformace byly okolo hlavy dítěte utahovány dva pásy obinadel, jeden v oblasti čela a druhý v oblasti temene. Oba pásy se sbíhaly na týlu, kde byly uzavřeny (Malý 1926). Výsledkem je lebka protáhlá nahoru a dozadu. Oba typy byly popsány u nálezů ze západního pobřeží jihoamerického kontinentu, často i v rámci jedné populace (Blom 2005). Přesto Burger a Salazar (2003) uvádí, že pro oblast západního pobřeží jihoamerického kontinentu byl obvazový typ častější ve vysokohorských oblastech And než v nížinných oblastech na pobřeží.

Předchozí studie nicméně demonstrovaly, že aspektivní typologický přístup předpokládající bipolaritu dvou extrémních tvarů není schopen plně zachytit celou škálu přechodných variant mezi oběma póly i mezi morfologicky normálními a deformovanými lebkami (Perez 2007). V posledních dvou dekádách můžeme pozorovat snahu tento přístup doplnit o metody kvantitativního popisu tvaru. Z postupů geometrické morfometrie byla při popisu deformací použita analýza konečných prvků (Kohn *et al.* 1993) a především metody analýzy obrysů, hlavně eliptická Fourierova analýza i metody pomocných klouzavých bodů (Frieß, Baylac 2003, Perez 2007, Del Papa, Perez 2007). Výsledky naznačily, že umělé deformace lze velmi efektivně demonstrovat na tvaru 2D obrysů neurokrania v laterálním pohledu. Vyšší citlivost kvantitativních metod k rozpoznání tvarových nuancí prokázala přítomnost přechodných forem a poskytla nástroj, který objektivním způsobem zhodnotí, zda lebka neznámého původu byla vystavena deformačnímu tlaku.

Pokročilé zobrazovací metody

Výzkum mumifikovaných lidských pozůstatků byl v posledních 20 letech obohacen o pokročilé neinvazivní bezkontaktní radiodiagnostické metody (Chhem *et al.* 2004, Chhem, Brothwell 2008, Beckett,

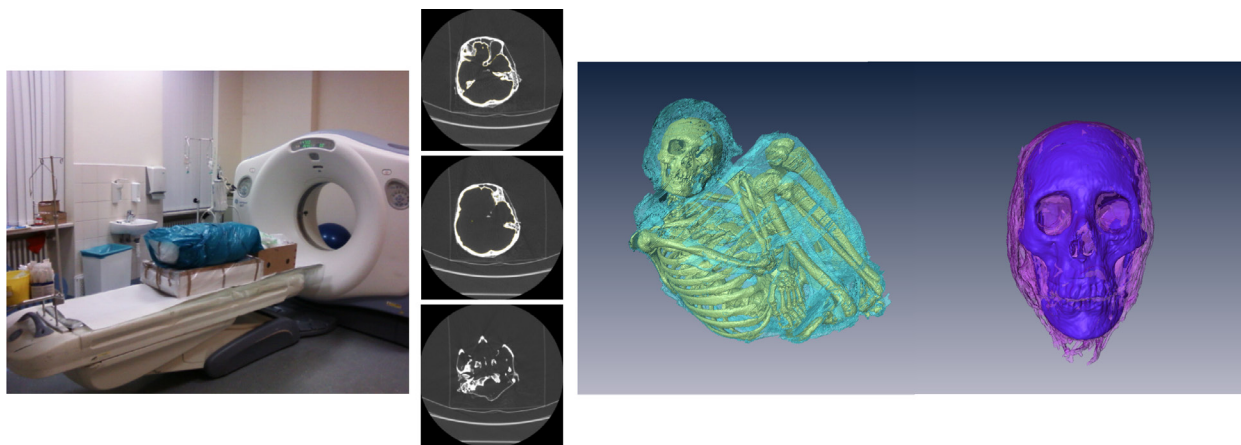
Conlogue 2010). Především implementace počítačové tomografie a s ní spojená 3D virtuální rekonstrukce se staly velmi populární (Boldock *et al.* 1994, Cesarani *et al.* 2004). Počítačová tomografie má na rozdíl od klasického RTG snímku schopnosti zobrazit vnitřní strukturu a zároveň zachytit prostorové souvislosti uvnitř studovaného objektu bez nutnosti zasahovat do integrity měkkých tkání nebo obalových materiálů. Ze zdroje záření (rentgenka) opisujícího okolo vyšetřovaného objektu kružnici jsou vysílány RTG paprsky, které prostupují vyšetřovaným tělem a jsou zachycovány detektorem (analogově-digitální převaděč), kde v závislosti na složení, struktuře, hustotě a tloušťce vyšetřovaného objektu vytváří různě intenzivní šedobílé stíny. Vzájemnou kombinací snímků z různých úhlů je odstraněna superpozice tělních vrstev a na CT skenu jsou ve výsledku zobrazeny konkrétní prostorové souvislosti v daném místě vyšetření. Posun těla vůči zdroji záření a detektoru a opakování celého postupu ve výsledku poskytuje sérii černobílých řezů protínajících objekt v pravidelně vzdálených intervalech. Velikost tohoto intervalu, tzv. tloušťka skenu, spolu s rozlišením snímku (velikost 1 pixelu) určuje kvalitu záznamu.

Seriace obrazového výstupu vyšetření na počítačovém tomografu dala vzniknout 3D vizualizacím a virtuálnímu modelování. Vytváření virtuálních modelů z CT řezů je v podstatě vrstvení vybraných vzájemně si odpovídajících částí snímků do trojrozměrné struktury. Označení oblastí na dvourozměrných CT skenech se nazývá segmentace. Vrstvení segmentovaných částí do trojrozměrného modelu je renderování. Segmentovat lze jakoukoliv část objektu, která je na skenu zobrazena jako stín a která se hodnotou stupně šedi liší od okolních struktur, nebo dutinu (projasnění), kterou daný stín ohraničuje. Virtuální 3D modely mumifikovaných lidských těl umožňují virtuálně oddělit měkké a tvrdé tkáně a obě složky nejen zobrazit, ale také kvantitativně vyhodnotit.

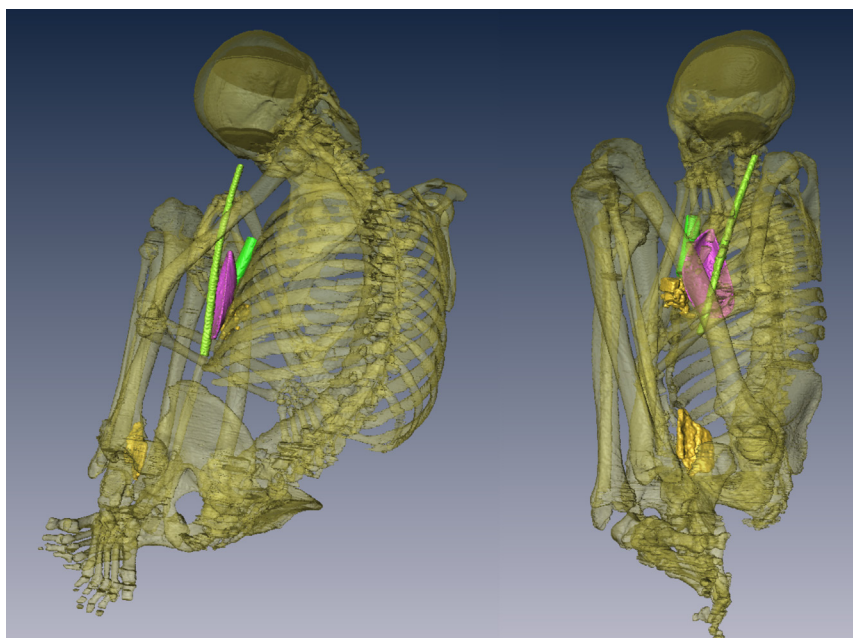
METODY A MATERIÁL

V průběhu roku 2009 byla zahájena spolupráce mezi Náprstkovým muzeem Praha a Laboratoří morfologie a forenzní antropologie Ústavu antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity (ÚA PŘF MU) na antropologickém vyšetření jihoamerických mumií ze sbírek NMP. Cílem této spolupráce byla virtuální rekonstrukce exponátů s použitím vyšetření na počítačovém tomografu a také antropologické zhodnocení na základě vytvořených trojrozměrných modelů. Vyšetřeny byly všechny čtyři mumie ze sbírek jihoamerického oddělení Náprstkovy muzea Praha. Těla byla vyšetřena na počítačovém tomografu ve spolupráci s Radiodiagnostickým oddělením Fakultní nemocnici u sv. Anny v Brně pod vedením doc. MUDr. Petra Krupy, CSc. a následujícím nastavením tomografu: 120kV, 202mA, 16bit, velikost pixelu 0,977 mm, expozice – 500 s. Z ochranných i hygienických důvodů byla těla snímána v původním obalu, ve kterém proběhl transport z depozitářů na místo vyšetření. CT skeny o tloušťce 0,625 mm a počtu 600-1000 skenu na jedince byly archivovány ve formátu DICOM a následně segmentovány v programu AMIRA verze 5.0.1. v Laboratoři morfologie a forenzní antropologie na Ústavu antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Ze segmentovaných částí byly vytvořeny trojrozměrné modely lebky i postkraniálního skeletu, vnějších textilních obalů mumie (pokud byly přítomny), měkkých tkání zevního pokryvu těla a vnitřních dutin lebky – mozkovny a paranasálních dutin (*sinus frontalis*, *sinus maxillaris*, *sinus sphenoidalis*).

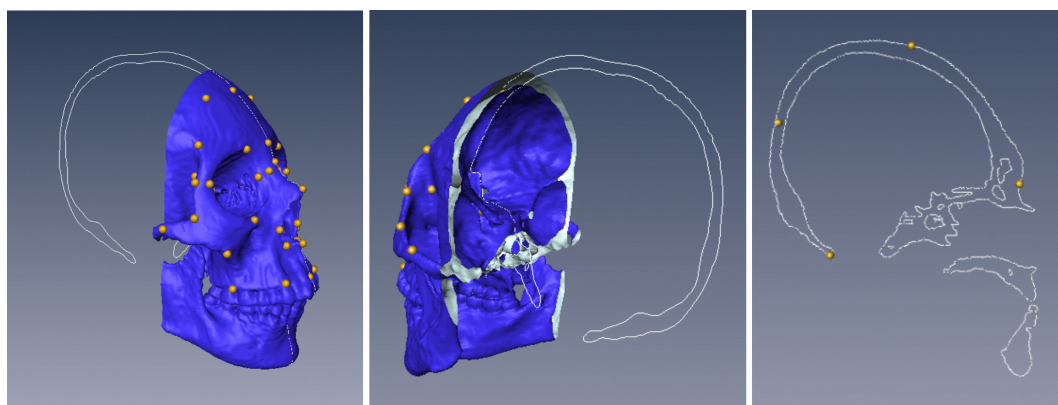
Výsledky aspektivního a metrického hodnocení modelů mumií naznačily, že morfologie lebek dvou ze zkoumaných mumií (mumie č. 1 a č. 3) vykazuje tvarové zvláštnosti, jež by mohly být podmíněny praktikováním umělé deformace. Cílem kvantitativní analýzy tvaru bylo objektivním způsobem srovnat tvar trojrozměrných modelů neurokrania mumií s obdobným způsobem získanými modely lebek s fyziologicky normální morfologií a s modely lebek, které byly vystaveny umělé deformaci.



Obr. 1. Postup tvorby 3D virtuálních modelů s pomocí počítačové tomografie. Vlevo vyšetření studovaného materiálu na vícedetektorovém helikálním tomografu, uprostřed CT skeny, vpravo virtuální modely měkkých a tvrdých tkání mumifikovaného těla dospělého jedince (mumie č. 1) a mumifikované hlavy ženy z NMP (mumie č. 3).



Obr. 2. Virtuální model kostry mumie č. 1 s doprovodnými předměty v zadním (vlevo) a bočním (vpravo) pohledu.



Obr. 3. Extrakce bodů a kontur z virtuálních modelů lebky mumie v programu AMIRA 5.0.1.

Záznam vstupních dat

Morfologie mozkovny virtuálních modelů mumii byla zkoumána na řezech mediasagitální rovinou a srovnána s databází virtuálních modelů lebek dospělých jedinců s prokázanými umělými deformacemi, které jsou deponovány na Ústavu antropologie PřF MU (N=5), a s modely lebek bez záměrné modifikace. Deformované lebky pocházely z českých lokalit, jedna byla z Peru. Podobně jedna z nedeformovaných lebek náležela podle dokumentace peruánské populaci, zatímco ostatní patřily moderní české populaci. Celkem do analýzy vstupovalo 19 virtuálních modelů lebek.

Tvar řezu modelem byl zastoupen dvěma různými křivkami. První se táhla v rozsahu od bodu nasion po bod inion. Druhá měla totožný počátek, ale končila v bodě opisthion na bázi lebky. Křivky byly pro potřeby analýzy rozděleny na 14 (nasion-inion) a 75 (nasion-opisthion) pravidelně rozmístěných bodů. Spolu s konturami neurokrania byla zaznamenána také poloha 4 kranio-metrických bodů: nasion, bregma, lambda a opisthion (Obr. 3). Extrakce křivek a jejich rozdělení a digitalizace kranio-metrických bodů byla provedena v programu AMIRA 5.0.1.

3D kartézské souřadnice získaných bodů byly matematickými operacemi převedeny na dvou-ozměrná data. Matice souřadnic byla nejdříve transformována tak, aby všechny body byly souhlasně otočeny do roviny rovnoběžné s rovinou určenou osami X a Y. Úhly otočení mezi osami byly určeny podle vztahů:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}\right)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}\right)$$

Kde n_x, n_y, n_z jsou souřadnice normálového vektoru roviny (NBL nebo NBO) určené body nasion (N), bregma (B) a lambda (L), případně opisthion (O)

Normálový vektor roviny NBL (NBO) je určen vztahem:

$$NB \times BL \text{ (nebo } NB \times BO) = (a_y b_z - a_z b_y, a_z b_x - a_x b_z, a_x b_y - a_y b_x), \text{ kde } NB (a_x, a_y, a_z) \text{ a } BL (BO)$$

(b_x, b_y, b_z) jsou vektory definující rovinu NBL (nebo NBO)

$$x' = x$$

$$y' = x \cos \alpha + y \sin \alpha$$

$$z' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha$$

$$x'' = x' \cos \beta - z' \sin \beta$$

$$y'' = y'$$

$$z'' = x' \sin \beta + z' \cos \beta$$

Po otočení do požadované roviny byly souřadnice Z-osy odstraněny, čímž byla získána sada 2D kartézských souřadnic bodů.

Vedle vstupních dat popisující obrys neurokrania byla na modelech zaznamenána poloha 23 antropometrických bodů (glabella, nasion, nasospinale, prosthion, apertion dx, apertion sin, dakryon dx, dakryon sin,

jugale dx, jugale sin, zygion dx, zygion sin, zygomaxillare dx, zygomaxillare sin, ektomolare dx, ektomolare sin, bregma, lambda, opisthokranion, basion, asterion dx, asterion sin). Hodnoty kartézských souřadnic byly získány podobně jako v případě bodů u křivek, tj. umístěním bodu na virtuální model v programu AMIRA 5.0.1. a exportem x, y, z souřadnic.

Na základě hodnot kartézských souřadnic těchto bodů bylo podle vzorce

$$D = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$
 určeno následujících 15 lebečních rozměrů (největší délka lebky, délka báze lebky, basiobregmatická výška lebky, šířka obličejové části, délka asterion-asterion, délka obličejové části lebky, výška obličejové části lebky, výška nosu, bijugální šířka, šířka nosu, maximální šířka alveolárního oblouku, dakryální meziočnicová vzdálenost, bimaxilární šířka, mediánní tětiva čela, mediánní parietální tětiva). Definice rozměrů byly převzaty z Martin, Saller (1957).

Analýza tvaru

Pro účely kvantitativní analýzy tvaru byla první sada bodů (N=14) standardizována obecnou prokrústovskou analýzou s použitím konfigurace 3 antropometrických bodů – nasion, bregma, inion. Poloha 14 bodů křivky označených pro účely analýzy jako klouzavé pomocné body byla poté určena na základě minimální hodnoty deformační energie.

Druhá sada křivek rozdělených na 75 bodů byla popsána postupy eliptické Fourierovy analýzy. Analýze předcházela standardizace polohy v prostoru na základě polohy bodů nasion, bregma a opisthion obecnou prokrústovskou analýzou (otočení o optimální úhel θ a nastavení minimální prokrústovské vzdálenosti D^2 , viz vzorce níže) a velikosti extrakcí hodnot velikosti centroidu z celé sady 75 bodů.

Během výpočtu eliptické Fourierovy analýzy nebyla nastavena žádná další standardizace. Rozdíly mezi tvary byly vyjádřeny hodnotami Fourierových koeficientů harmonických proměnných. Celkem bylo pro popis každé křivky použito 20 harmonických proměnných. Dohromady bylo pro každou křivku získáno 80 Fourierových koeficientů a 2 konstanty.

Statistické zpracování

Rozdíly mezi tvary neurokrania vyjádřené hodnotami prokrústovské vzdálenosti byly dále studovány shlukovací analýzou pravidlem nevážených skupinových průměrů. Současně byly tvary popsané prokrústovskými souřadnicemi postoupeny analýze hlavních komponent počítané na kovarianční matici. Stejný postup byl zvolen i pro tvary popsané Fourierovými koeficienty.

Analýza byla doplněna o srovnání s lebkami peruánské populace z Howellsovy databáze (Howells 1996, <http://konig.la.utk.edu/howells.htm>, N=110) metodami tradiční morfometrie. Variabilita mezi skupinami dat byla zhodnocena na základě 15 a 6 lebečních rozměrů analýzou hlavních komponent, kanonickou analýzou a neparametrickou analýzou rozptylu s 10000 permutacemi (NPMANOVA, Anderson 2001). Efektivnost odčerpávání variability u hlavních komponent byla deklarována na základě hodnoty Jolliffeho hraničního čísla (Jolliffe 1986). Statistická významnost párového srovnání byla deklarována po Bonferroniho korekci na 5% hladině významnosti. Hodnoty metrických proměnných byly před vlastní analýzou tvaru logaritmovány.

Obecná prokrústovská analýza, eliptická Fourierova analýza a vícerozměrné statistické testy byly vypočítány v programech NTSYSpc 2.11 a PAST 2.04.

Vizualizace výsledků

Grafické výstupy byly vytvořeny nástroji v programech Morpheus *et al.* beta verze (Slice 2002) a PAST 2.04 (Hammer *et al.* 2001).

VÝSLEDKY

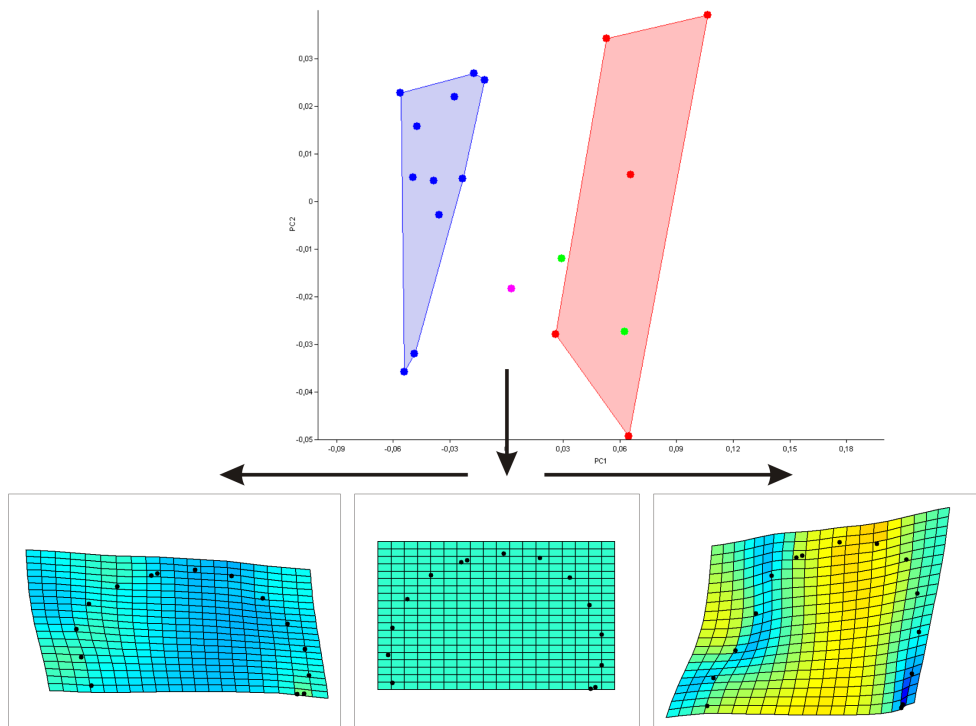
Srovnání tvarových proměnných ukázalo statisticky významné rozdíly ve tvaru deformovaných a nedeformovaných mozkoven (NPMANOVA, $F=4,321$, $p<0,05$). Výsledky dále naznačily, že mumie č. 1 i mumie č. 3 se odlišují od variability pozorované ve tvaru neurokrania, a naopak plně spadají do oblasti, ve které se nacházejí jedinci s uměle pozměněnou morfologií mozkovny (Obr. 4). K podobným výsledkům dospějeme také studiem dendrogramu shlukovací analýzy (Obr. 5). U sady 14 bodů vysvětlovaly první dvě hlavní komponenty společně 85% (65% a 20%) z celkové variability dat. V případě hodnot Fourierových koeficientů se jednalo o 88,9% (63,6% a 25,3%).

U obou lebek mumii je v porovnání s nedeformovanými lebkami nápadné oploštění v čelní a týlní oblasti a prodloužení temenní oblasti směrem vzhůru a dozadu (Obr. 6). Postup deformace je mnohem výraznější u mumifikované hlavy ženy (mumie č. 3).

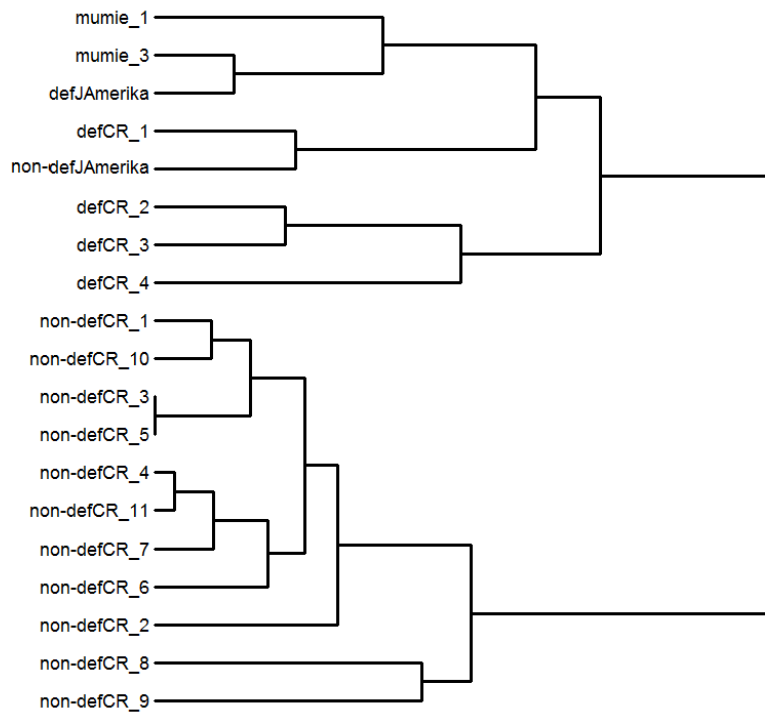
Analýza hlavních komponent 15 lebečních rozměrů poskytla 4 efektivní hlavní komponenty vysvětlující 77,6% z celkové variability. Jak je patrné na grafickém znázornění prostoru první a druhé hlavní komponenty (52,6% a 11,1% variability) rozsah hodnot u lebek peruánské populace se překrývá z větší části s hodnotami pro referenční populaci deformovaných i nedeformovaných lebek (Obr. 7 vpravo). První komponenta je určena rovnoměrně všemi studovanými rozměry s mírnou převahou maximální délky lebky. Oddělení deformovaných lebek od morfologicky normálních můžeme pozorovat v prostoru druhé a třetí komponenty (Obr. 7 vlevo). Zatímco druhá komponenta je určena hodnotami rozměru parietální tětivy klenby lebky, třetí je spojeny převážně s hodnotami tětivy čela. Deformované lebky se nachází v oblasti, kterou charakterizuje morfologie s krátkou parietální a dlouhou frontální tětivou. Lebky obou studovaných mumii spadají svými hodnotami první a druhé komponenty do oblasti, jež je vymezena hraničními hodnotami jihoamerické populace. Odlišnou pozici vůči varibialitě srovnávaných vzorků pozorujeme v třetí komponentě. Zatímco mumie č. 1 nevykazuje odlišnosti od peruánské referenční populace, mumie č. 3 se nachází v extrémních hodnotách pro všechny tři zahrnuté soubory, tj. peruánské, české a deformované lebky.

Pokud se podíváme na výsledky odděleně pro pohlaví, pak mumie muže (mumie č. 1) patří v porovnání s Howellsovými daty k lebkám s kratší mozkovnou (172 mm versus $177\pm 0,7$ mm), zatímco mumie ženy (mumie č. 3) svou délkou lebky odpovídá průměrné ženské peruánské lebce (168 mm versus $169\pm 0,7$ mm), ale délka čelní tětivy přesahuje variabilitu pozorovanou v Howellsových datech (114 versus 113). Neparametrická analýza rozptylu logaritmovaných hodnot poskytla statisticky významné rozdíly mezi skupinami ($F=2,55$, $p<0,05$). Nicméně párové srovnání odhalilo, že na 5% hladině významnosti jsou statisticky významné pouze rozdíly mezi skupinou českých a peruánských lebek. Všechna ostatní párová srovnání (peruánské vs. deformované lebky, české vs. deformované lebky, mumie vs. české/peruánské/deformované) byla určena jako statisticky nevýznamná.

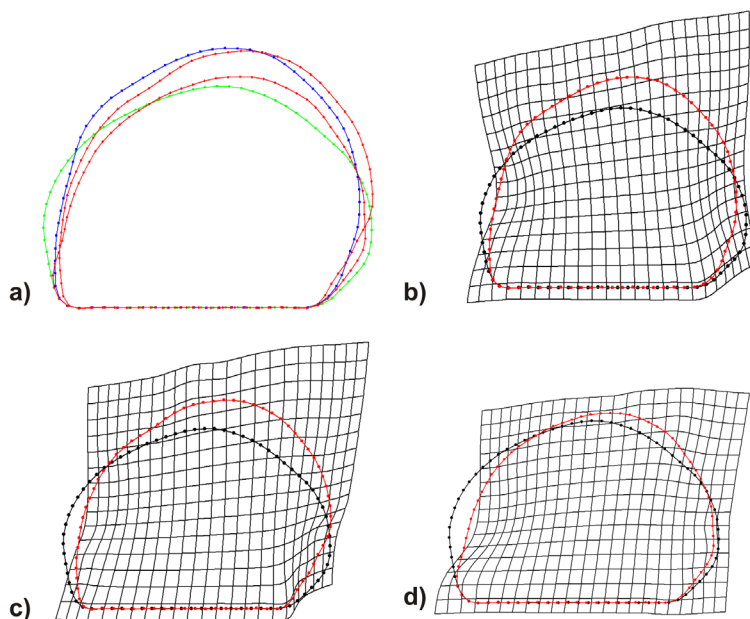
Podíváme-li se na výsledky kanonické analýzy 6 rozměrů neurokrania (největší délka lebky, délka báze lebky, basiobregmatická výška lebky, délka asterion-asterion, mediánní tětiva čela, mediánní parietální tětiva) zjistíme, že v prvních dvou kanonických proměnných (60,5% a 36% celkové variability) se lebka mumie 3 nachází vně variability vymezené zkoumanými skupinami, nicméně s viditelnou afinitou k uměle deformovaným lebkám, zatímco lebka mumie 1 zapadá do variability vytýčené peruánskými lebkami (Obr. 8). Neparametrická analýza rozptylu poskytla statisticky významné rozdíly mezi skupinami ($F=5,26$, $p<0,05$). Párové post-hoc testy odkryly rozdíly mezi vzájemnými kombinacemi českých, peruánských i deformovaných lebek.



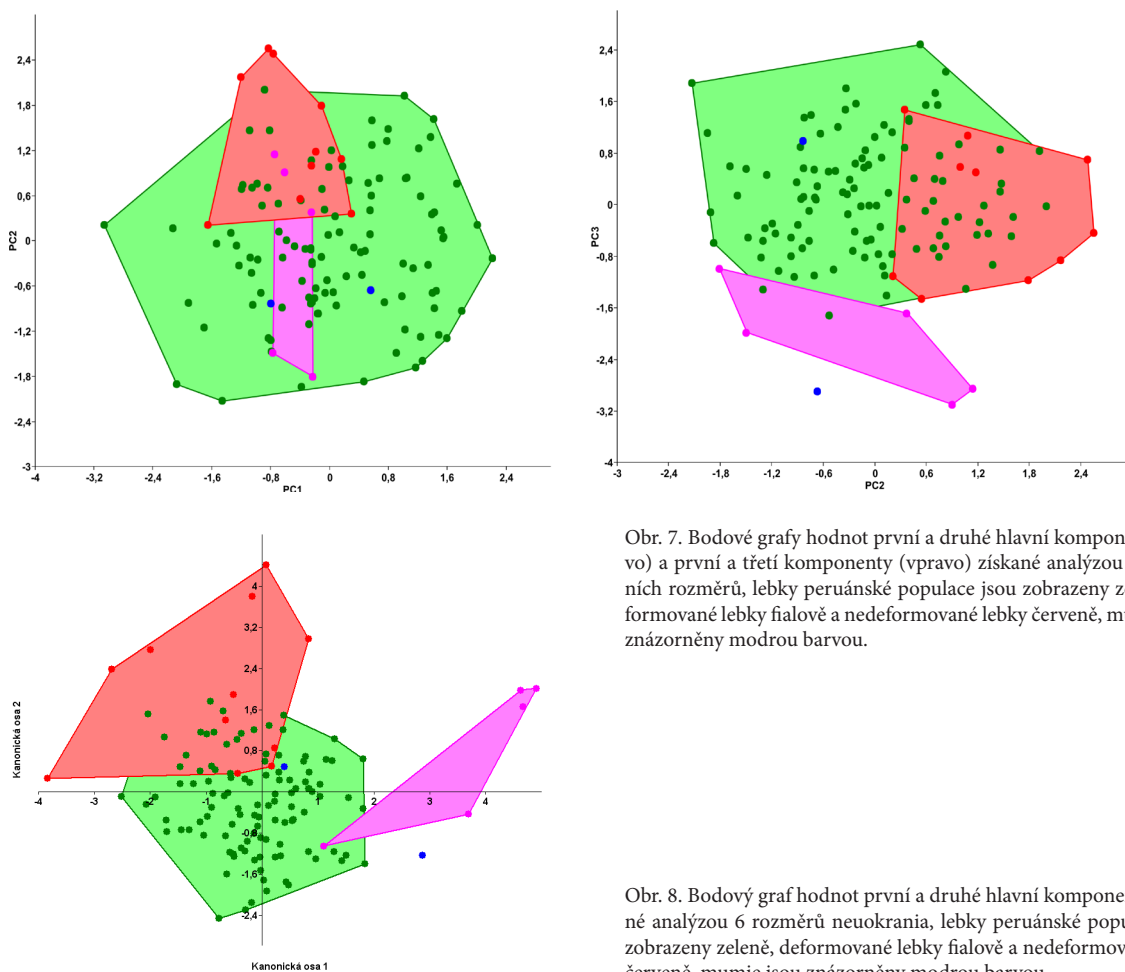
Obr. 4. Poloha tvarů mozkovny nedeformovaných (modře) a deformovaných (červeně) lebek v prostoru 1. a 2. hlavní osy a tvary, které jsou spojené s nulovou hodnotou PC skóre a s kladnými a zápornými hodnotami první hlavní komponenty. Mumie jsou znázorněny zelenou barvou, fialově je označena peruánská lebka bez deformace.



Obr. 5. Výsledek shlukování tvarů mozkovny souboru deformovaných (def) a nedeformovaných (non-def) lebek, CZ označuje lebky českého původu.



Obr. 6. (a) Srovnání průměrných tvarů deformovaných (modrá barva) a nedeformovaných (zelená barva) lebek se tvary lebek mumii z NMP (červená barva). (b) Srovnání průměrné nedeformované lebky (černá) s průměrnou uměle deformovanou lebkou (červená). (c) Srovnání průměrné nedeformované lebky (černá) s lebkou mumie č. 3 (červená). (d) Srovnání průměrné nedeformované lebky (černá) s lebkou mumie č. 1 (červená). Pro dokreslení rozdílů byly tvary doplněny o deformační mřížky.



Obr. 7. Bodové grafy hodnot první a druhé hlavní komponenty (vlevo) a první a třetí komponenty (vpravo) získané analýzou 15 lebečních rozměrů, lebky peruánské populace jsou zobrazeny zeleně, deformované lebky fialově a nedeformované lebky červeně, mumie jsou znázorněny modrou barvou.

Obr. 8. Bodový graf hodnot první a druhé hlavní komponenty získané analýzou 6 rozměrů neuokrania, lebky peruánské populace jsou zobrazeny zeleně, deformované lebky fialově a nedeformované lebky červeně, mumie jsou znázorněny modrou barvou.

DISKUZE A ZÁVĚRY

Identifikace umělé deformace lebky u mumifikovaných těl

Výzkum mumifikovaných těl byl dříve omezen na aspektivní hodnocení nebo klasické RTG vyšetření. Implementace pokročilých radiodiagnostických postupů otevřela dveře pro zcela nové využití, jež jde ruku v ruce s rozvojem 3D modelování a počítačové podpory v biologických i humanitních oborech (Králík *et al.* 2007). Modely mumii vytvořené postupy adekvátními k těm, jež byly použity při výzkumu mumii z Náprstkova muzea Praha, lze prezentovat jako výstavní exponáty nebo zahrnout jako položky do virtuálních knihoven či databází (Godil, Ressler 2008). Zde je prezentováno využití modelů jako zdroje dat pro moderní deskriptivní a analytické postupy. Efektivita spojení virtuálního modelování s CT podporou a geometrickou morfometrií byla demonstrována v celé řadě morfologických studií různého zaměření, od paleoantropologie, přes neuroanatomii až po forenzní vědy (Bookstein 1996, Zollikofer 2002, Martini, Ripani 2009). V této studii pomohlo virtuální modelování s aplikací metod kvantitativního popisu tvaru odhalit souvislosti, které vrhají světlo na biologické charakteristiky dvou muzejních exponátů, ale také poskytují detailnější sociokulturní pozadí pro studium jihoamerických populací před příchodem Evropanů.

Mumifikace i umělé deformace lebek jsou celosvětově rozšířené zvyky, které byly v mnoha případech prováděny velmi sofistikovanými postupy a doprovázeny komplexním rituálním chováním. Jejich praktikování je často připisováno snaze o odlišení, zviditelnění nebo vymezení příslušnosti k biologické nebo sociální skupině, např. panovníkům, nobilitě nebo duchovenstvu. Není pochyb o tom, že praktikování umělé deformace pozmění vnější vzhled jedince a vytváří specifický znak patrný *a prima vista*. S ohledem na způsob modifikace se mění nejen tvar neurokrania, ale jsou postiženy i další somatické znaky. Dlouhodobým tlakem na kosti klenby lebky v raných fázích vývoje člověka dochází k přestavbě nejen tvaru kostí v místě vyvíjeného tlaku, ale díky strukturální provázanosti s ostatními částmi lebky se mění také lebeční báze, kostěný podklad obličejů i samotný obličej (Frieß, Baylac 2003). Z dalších průvodních změn, například, narůstá tělesná výška jedince, znak, který je citlivým indikátorem působení vnějších podmínek na organismus, odráží socioekonomického postavení i reprodukční fitness (Lebl, Krásničanová 1996, Pawlovski *et al.* 2000) a deformace může působit jako „mimikry“ těchto podmínek.

Analýza tvaru obou studovaných mumii naznačuje, že jedinci byli v dětství vystaveni tlaku, který modifikoval průběh morfogeneze lebky. Nicméně, deformace ani v jednom případě nedosahuje tvaru, který by po typologické stránce s jistotou spadal do obvykle definovaných kategorií, a ani není na první pohled jasně zřetelná. Již dříve bylo poukázáno na skutečnost, že tradiční typologicky zaměřený přístup ke studiu kraniálních deformací trivializuje tvarovou variabilitu do dvou hraničních forem a selhává v případech, u kterých je forma a míra deformace nejednoznačná. Tvary deformovaných lebek tvoří plynulé spektrum a hranice oddělující jeden typ od druhého, stejně jako oddělující případy deformovaných a nedeformovaných lebek jsou z velké části arbitrární (Blom 2005).

Z pohledu vlastní analýzy tvaru nedovoloval málo početný referenční soubor vytvořit vhodný klasifikační model pro determinaci neznámých tvarů, např. kanonickou analýzou. Zanedbáno bylo pohlaví i dožitý věk jedinců zahrnutých do analýzy. Ačkoliv oba faktory hrají důležitou roli při formování tvaru lebky, u lebek dospělých jedinců jsou pohlavní a věkové rozdíly soustředěny především v oblasti splachnokrania (Urbanová 2009). Zanedbání pohlaví a věku u lebek, které se liší uměle vyvolanými rozdíly ve tvaru neurokrania, které výrazně převyšují fyziologickou pohlavně nebo věkově specifickou variabilitu, by proto nemělo bránit v interpretaci výsledků.

Nicméně jiný důležitý faktor by mohl ovlivnit identifikaci deformovaných lebek a tím je populační afinita. Je dobře známo, že tvar lebky a neurokrania především klenby je úzce svázán s faktory exogenní povahy, které působí v průběhu ontogeneze, ale i později a spolu s geneticky podmíněným základem se podílejí na utváření výsledné morfologie. Faktory specifické obvykle pro danou geograficky nebo sociálně vymezenou skupinu (klimatické podmínky, strava, socioekonomické podmínky) vytváří populačně specifické vzorce, na kterých jsou postaveny metody pro odhad populační afinity v kosterní a forenzní antropologii (Crognier 1981, Roseman, Weaver 2004). Srovnání morfologie lebek mumii s jihoamerickými populace-

mi bylo možné pouze metodami tradiční morfometrie. K tomuto srovnání byla použita kraniometrická data od peruánských Indiánů z oblasti Yauyos provincie Lima v Peru, která jsou obsažena v Howellsově databázi kraniometrických rozměrů (Howells 1996). V souboru se nacházejí pouze lebky s fyziologicky normální morfologií neukrania. Srovnání ukázalo, že oba referenční soubory (česká populace a deformované lebky) se liší tvarem neurokrania od peruánské populace a je nutné proto při interpretaci výsledků tvarové analýzy započítat také možné mezipopulační rozdíly.

U obou lebek mumii tvarová analýza ukázala, že morfologie neurokrania se podobá tvaru, který pozorujeme u uměle deformovaných lebek. V porovnání s nedeformovanými lebkami vykazují lebky mumii nápadné oploštění v čelní a týlní oblasti a prodloužení temenní oblastí směrem vzhůru a dozadu. Postup deformace je mnohem výraznější u mumifikované hlavy ženy (mumie č. 3), jež v oblasti za bregmou vykazuje nápadnou prohlubeň tzv. *impressio postbregmatica*. Také srovnání metodami tradiční morfometrie ukázalo, že lebka mumie č. 3 vykazuje vysokou afinitu k deformovaným lebkám. Vzhledem k pozměněné morfologii sexuálně dimorfních znaků u deformovaných lebek znesnadňující odhad pohlaví na lebce (Giles, Elliot 1963), studie obvykle neuvádí, zda se v praktikování deformací objevovaly pohlavní preference. Nicméně, Boas (1913-1914) uvádí, že u severoamerických indiánů to byly právě dívky, u kterých byl deformační tlak obinadel ponechán delší dobu. Přechodné formy nebo lebky se slabým rozvojem deformace bez nutných pohlavních preferencí jsou také známé.

Na druhé straně lebka mumie č. 1 zapadá u tradiční morfometrické analýzy mezi lebky peruánské populace. Vysvětlení nekonzistence těchto výsledků můžeme hledat v nízké schopnosti tradiční morfometrie dostatečně rozlišit mezi lebkami fyziologicky normálními a lebkami s nízkým stupněm rozvoje deformace. Jedna z hlavních kritik tradiční morfometrie poukazuje na skutečnost, že lineární kraniometrické rozměry nejsou schopny dostatečně odlišit komplexní tvarové zvláštnosti (Zelditch *et al.* 2004). Svou roli může hrát i časoprostorové rozdíly mezi mumii a daty z Howellsovy databáze.

Prodloužení klenby lebky vzhůru a dozadu, které pozorujeme u mumii, je typické pro obvazový typ deformace, která vede ke kónickému tvaru mozkovny a je doprovázená postbregmatickou prohlubní, ale také tzv. *tuberculum prebregmaticum*, jež se projevuje jako vyvýšenina v dorzální části kosti čelní (Kustár 1999). Naopak oploštění v čelní a týlní oblasti je typické pro tabulární typ deformace a je doprovázeno vznikem charakteristických boulí v místech největší šířky lebky (Antón 1989). Podle Newmana (1962) se u konkrétních populací nebo kultur rozvinul právě ten typ deformace, který produkoval tvar hlavy opačný, než byla morfologie typická pro danou skupinu. Dokládá to příkladem umělé brachykranie u jinak dolichokranních amerických indiánů. Pro oblasti Peru a Chile je popisována mesokranní až dolichokranní morfologie lebek (Newman 1962), což by mohlo koincidovat s výskytem tabulárního typu. Na druhé straně právě pro oblasti Jižní Ameriky existuje řada dokladů o praktikování obou typů deformace u jedné skupiny (Antón 1989, Rhode, Arriza 2006). Ani u jedné u mumii nepozorujeme abnormální morfologii v oblasti maximální šířky lebky.

Na základě výsledků můžeme usuzovat, že se v obou případech jedná o tzv. aymarský (obvazový, cirkulární) typ deformace lebky, typický právě pro oblast Bolívie, Peru a Chile (Antón 1989, Rhode, Arriza 2006).

O funkčním nebo klinickém dopadu deformace na organismus zkoumaných mumii můžeme pouze spekulovat. Dětský organismus je velmi plastický a vývojové procesy jsou schopny dobře kompenzovat působení vnějších faktorů. Přesto jsou v souvislosti s umělými deformacemi popisovány patologické změny jako je zúžení zvukovodu, vyšší četnost vsunutých kůstek v kraniálních švech, zvýšená zátěž na šíjové svaly, změny v rozsahu zorného pole jako důsledek přestavby očních, zvýšený progratismus, zvýšená abraze zubů (Frieß, Baylac 2003, Haun, Glantz 2001, Ossenberg 1970, Del Papa, Perez 2007). Neurologické problémy pro jedince mohou pramenit z předčasného srůstu lebečních švů (Malý 1926, Antón 1989, Kohn *et al.* 1993) nebo zvýšeného intrakraniálního tlaku (Kustár 1999). Na druhé straně o tzv. toulouské deformaci, která byla praktikována v jižní Francii ještě na konci 19. století, se traduje, že tlakem na mozkovnu se mění cévní zásobování mozku, v důsledku čehož se rozvíjí umělecké schopnosti postiženého (Soto-Heim 2004).

Podobně důvody pro praktikování umělé deformace byly předmětem rozsáhlých debat (Moss 1958). Vedle Jižní Ameriky byl tento fenomén pozorován na všech kontinentech – mezi severoamerickými indiány (Kohn

et al. 1993), u australských domorodců (Antón, Weinstein 1999), u pastevců Předního východu (Duckworth 1899), středoevropských Germánů (Kustár 1999), u filipínských a havajských rybářů (Clark *et al.* 2007, Schendel *et al.* 1980). Pro praktikování deformací u populací předkolumbovské Ameriky převažuje názor, že deformace byla spojena s určitou formou stratifikace společnosti a sociálním postavením samotného nositele (Malý 1926). Po příchodu Evropanů byly tradice umělých deformací podobně jako praktikování mumifikace prohlášeny za pohanské a vymizely s rozšířením křesťanství (Soto-Heim 2004).

Účinnost analýzy tvaru při popisu umělých deformací lebky

Objektivnost popisu tvaru ovlivňuje chyba záznamu dat. Na rozdíl od předchozích studií zahrnujících digitální fotografie nebo překreslení kontury použitím dioptografu (Frieß, Baylac 2003, Perez 2007) byla v této studii poloha konfigurací bodů získána z trojrozměrných virtuálních modelů lebek získaných s podporou počítačové tomografie. Při automatické extrakci prostorových dat postupy, které nevyžadují přímý kontakt mezi hodnotitelem a hodnoceným objektem, je kvalita digitálního záznamu studovaného objektu určující determinantou přesnosti a spolehlivosti vstupních dat. Rozlišení virtuálních modelů z objemových dat vychází z nastavení tomografu (intenzita záření, tloušťka a rozlišení skenů), ale také segmentačních a renderovacích nástrojů, které jsou při vytváření virtuálního modelu zvoleny (Beckett, Conlogue 2010). Nevhodně zvolený práh segmentace CT řezů může výrazně pozměnit objem rekonstruovaných struktur. V případě automatické segmentace, která byla použita v těchto případech, by odlišné nastavení prahu vyvolalo nárůst objemových dat (voxelů) a proporční zvětšení nebo zmenšení kontury. Tato lineární transformace však nemá žádný vliv na popis tvaru, protože je odstraněna v procesu standardizace tvarů. Skutečný dopad by nekonzistence prahu segmentace měla, pokud by předmětem zájmu byla tloušťka segmentovaných struktur, například tvar vnější a vnitřní kontury (endokrania) klenby lebky. Ačkoliv tvary ve srovnávaném souboru pocházejí z databáze, která byla doplňována v rozsahu několika let, modely byly vytvořeny na jednom pracovišti shodným segmentačním protokolem.

Výběr dvou odlišných deskriptivních postupů kvantitativní analýzy tvaru měl své zásadní opodstatnění. Za prvé, analýza byla omezena počtem studovaných tvarů, které by v případě některých statistických postupů (kanonická analýza, regresní analýza) nesplňovaly předpoklady výpočtu. Z tohoto důvodu byl zvolen postup zahrnující 3 význačné a 14 pomocných bodů reprezentující tvar v mediosagitální rovině. Na neurokranium v mediosagitální rovině je definováno omezené množství kraniometrických bodů, z nichž pouze některé (např. bregma nebo lambda) jsou klasifikovány jako typ I, který je podle Booksteina (1990) nebo nověji podle Katiny *et al.* (2007) doporučován pro použití v metodách geometrické morfometrie. Křivky a pomocné body jsou vítanou alternativou, pokud zkoumáme jemnější tvarové rozdíly u tvaru, kde by malé množství význačných bodů zabránilo dostatečně popsat tvarové rozdíly.

Za druhé, na rozdíl od metody klouzavých pomocných bodů je popis tvaru Fourierovými koeficienty nezávislý na složení souboru a do jisté míry také na počtu bodů a počtu harmonických proměnných (tento bod neplatí, v případech, kdy jsou vstupní data uspořádána v matici, ve které na všechny jedince je aplikován shodný algoritmus výpočtu). V praxi to znamená, že do výpočtu Fourierových koeficientů lze zahrnout obrysy lišící stranovou orientací (např. pravé a levé očné) nebo tvary, které v dalších krocích nebudou zahrnuty do statistické analýzy. Tvar popsáný Fourierovými koeficienty je možné kdykoliv srovnat s jiným tvarem popsáným stejným způsobem bez nutnosti opakovat všechny kroky analýzy nebo bez nutnosti zahrnout do analýzy již jednou popsaná data.

Standardizační postup eliptické Fourierovy analýzy tak, jak jej navrhli Kuhl a Giardina (1982) nemusí být vždy kompatibilní s popisem struktur nebo částí, které mají stabilní topografickou pozici a odlišují se v natočení své maximální osy. Jedna z hlavních tvarových změn z uměle deformovaných lebek je nárůst výšky neurokrania. Registrace obrysů lebky do konstantní polohy hlavní osy první elipsy s výrazně odlišnou orientací hlavní osy by v případě této variability narušila homologii struktur a bodů, které mají být srovnávány. V této studii byl obrys neurokrania standardizován obecnou prokrústovskou analýzou na základě dvou konfigurací zahrnující 3 význačné body – nasion, bregma, lambda a nasion, bregma, opisthion. S výjimkou

bodů opithion se jedná o význačné body typu I podle Booksteina (1991), což zaručuje požadovanou míru biologické homologie. Přidáním dalších bodů (např. inion viz Frieß, Baylac 2003) se snižuje míra relevance mezi body a současně s tím vystavujeme standardizaci riziku Pinocchiova efektu.

Tradiční antropometrické srovnání bylo doplněno z důvodu absence prostorových dat pro srovnání morfologie lebek s peruánskou populací metodami geometrické morfometrie, např. prokrústovskou analýzou s trojrozměrnými vstupními daty. Ačkoliv existují počítačové aplikace, které dokážou z dostatečného množství metrických a úhlových rozměrů odhadnout prostorové souvislosti koncových bodů vzdáleností (např. Morpheus et al.), redundance dat pro zpětnou rekonstrukci musí být vysoká a výsledek nemusí vždy splnit očekávání. Rozdíly v klasifikaci lebky mumie č. 1 naznačují odlišnou citlivost metod tradiční a geometrické morfometrie při výzkumu umělých deformací lebek.

Pro studium kraniálních deformací představují metody analýzy obrysů a pomocných bodů velmi efektivní nástroj. Podobně i 3D modely nálezů mohou přinést nové souvislosti do studia biologie člověka, například v kombinaci s modely endokraniálních dutin lebky.

CITOVANÁ LITERATURA

- Anderson, M.J. (2001): A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Australian Ecology* 26: 32 – 46.
- Anderson, G.S. – Cervenka, V.J. (2002): Insects Associated with the Body: Their Use and Analyses. In: W.D. Haglund, M. H. Sorg (eds): *Advances in Forensic Taphonomy: Method, Theory, and Archaeological Perspectives*, pp. 173 – 200, CRC Press, Florida, USA.
- Antón, S.C. (1989): Intentional Cranial Vault Deformation and Induced Changes of the Cranial Base and Face. *American Journal of Physical Anthropology* 79: 253-267.
- Antón, S.C. – Weinstein, K.J. (1999): Artificial cranial deformation and fossil Australians revisited. *Journal of Human Evolution* 36: 195-209.
- Aufderheide, A.C. (2003): *The Scientific Study of Mummies*, Cambridge University Press.
- Baldock, C. – Hughes, S. (1994): 3-D reconstruction of an ancient Egyptian mummy using X-ray computer tomography. *Journal of the Royal Society of Medicine* 87/12: 806 – 808.
- Beckett, R. – Conlogue, G. (2010): Paleoimaging the Internal Context. In: R. Beckett, G. Conlogue, *Paleoimaging. Field Applications for Cultural Remains and Artifacts*. CRC Press, pp 265 – 291.
- Blom, D.E. (2005): Embodying borders: human body modification and diversity in Tiwanaku society. *Journal of Anthropological Archaeology* 24 1 – 24.
- Boas, F. (1913-14): Ethnology of the Kwakiutl. 35th Annual report of the Bureau of American Ethnology: 39 – 794
- Bookstein, F.L. (1991). *Morphometric Tools for Landmark Data*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bookstein, F.L. (1996): Endophrenology: new statistical techniques for studies of brain form. *Neuroimage* 4/3: 36 – 38.
- Brothwell, D. – Gill-Robinson, H. (2002): Taphonomic and Forensic Aspects of Bog Bodies. In: W.D. Haglund, M.H. Sorg (eds): *Advances in Forensic Taphonomy: Method, Theory, and Archaeological Perspectives*, pp. 119-132, CRC Press, Florida, USA.
- Burger, R.L. – Salazar, L.C. (2003): Preface. In: Burger RL, Salazar LC, (eds): *The 1912 Yale Peruvian scientific expedition collections from Machu Picchu: human and animal remains*. Yale University publications in anthropology 85. New Haven: Department of Anthropology, Yale University, and Division of Anthropology, Peabody Museum of Natural History. xiii–xv.
- Cesarani, F. – Martina, M.C. – Grilletto, R. – Boano, R. – Donadoni Roveri, A.M. – Capussotto, V. – Giuliano, A. – Celia, M. – Gandini, G. (2004): Facial Reconstruction of a Wrapped Egyptian Mummy Using MDCT. *American Journal of Roentgenology* 183: 755 – 758.
- Chhem, R.K. – Rühli, F.J. (2004): Paleoradiology: current status and future challenges. *Journal of Canadian Association of Radiology* 55: 198 – 199.
- Chhem, R.K. – Brothwell, D.R. (2008): *PaleoRadiology. Imaging Mummies and Fossils*. Springer-Verlag Berlin, pp. 164.
- Clark, J.L. – Dobson, S.D. – Antón, S.C. – Hawks, J. – Hunley, K.L. – Wolpoff, M.H. (2007): Identifying Artificially Deformed Crania. *International Journal of Osteoarcheology* 17: 596 – 607.
- Crognier, E. (1981): Climate and Anthropometric Variation in Europe and the Mediterranean Area. *Annals of Human Biology* 8: 99 – 107.

- Del Papa, M.C. – Perez, S.I. (2007): The Influence of Artificial Cranial Vault Deformation on the Expression of Cranial Nonmetric Traits: Its Importance in the Study of Evolutionary Relationships. *American Journal of Physical Anthropology* 134: 251 – 262.
- Duckworth, W.L.H. (1899): Note on a Skull from Syria. *The Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland* 29/1-2: 145 – 151.
- Frieß, M. – Baylac, M. (2003): Exploring Artificial Cranial Deformation Using Elliptic Fourier Analysis of Procrustes Aligned Outlines. *American Journal of Physical Anthropology* 122: 11 – 22.
- Galloway, A. (1997): The Process of Decomposition. A Model from the Arizona-Sonoran Desert, In: W.D. Haglund, M.H. Sorg (eds): *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains*, pp. 139 – 149, CRC Press, Florida, USA.
- Giles, E. – Elliot, O. (1963): Sex determination by discriminant analysis of crania. *American Journal of Physical Anthropology* 21: 53 – 68.
- Godil, A. – Ressler, S. (2008): Shape and Size Analysis and Standards. In: V.G. Duffy (ed.): *Handbook of Digital Human Modeling: Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering (Human Factors and Ergonomics)*. CRC Press, pp. 14-1 – 14-15.
- Haglund, W.D. (2002): Recent Mass Graves, An Introduction. In: W.D. Haglund, M. H. Sorg (eds): *Advances in Forensic Taphonomy: Method, Theory, and Archaeological Perspectives*, pp. 243-262, CRC Press, Florida, USA.
- Hammer, R. – Harper, D.A.T. – Ryan, P.D. (2001): PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4/1: 9 pp. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.
- Haun, S.J. – Glantz, M. (2001): Diet, dental wear, and artificial cranial deformation: the significance of cranial shape in determination of dental wear patterns. Seventieth Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropologists, Kansas City, Missouri March 28 to March 31, 2001.
- Howells, W.W. (1996): Howells' craniometric data on the internet. *American Journal of Physical Anthropology* 101: 441-442.
- Jolliffe, I.T. (1986): *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Kohn, L.A.P. – Leigh, S.R. – Jacobs, S.C. – Cheverud, J.M. (1993): Effects of Annular Cranial Vault Modification on the Cranial Base and Face. *American Journal of Physical Anthropology* 90: 147 – 168.
- Králík, M. – Urbanová, P. – Mořkovský, T. – Hložek, M. (2007): Neinvazivní rekonstrukční postupy v antropologii. Sborník z konference konzervátorů a restaurátorů 2007, Technické muzeum v Brně, Brno, 68-71 a XI-XIII.
- Kuhl, F.P. – Giardina, C.R. (1982): Elliptic Fourier Features of a Closed Contour. *Computer Graphics and Image Processing* 18: 236-258.
- Kustár, A. (1999): Facial Reconstruction of an Artificially Distorted Skull of the 4th to the 5th Century from the Site of Mőzs. *International Journal of Osteoarchaeology* 9: 325-332.
- Lebl, J. - Krásničanová, H. (1996): *Růst dětí a jeho poruchy*, Galén Praha.
- Malý, J. (1926): Umělé deformované lebky z Tiahuanaco v Bolívii. *Anthropologie* 4: 251-348.
- Mantini, S. – Ripani, M. (2009): Modern morphometry: new perspectives in physical anthropology. *New Biotechnology*: 25/5: 325 – 330.
- Moss, M.L. (1958): The Pathogenesis of Artificial Cranial Deformation. *American Journal of Physical Anthropology* 16/3: 269-286.

- Newman, M.T. (1962): Evolutionary changes in body size and head form in American Indians. *American Anthropologist* 64/2: 237 – 257.
- Ossenberg, N.S. (1970): The influence of artificial cranial deformation on discontinuous morphological traits. *American Journal of Physical Anthropology* 33: 357 – 372.
- Pawłowski, B. – Dunbar, R.I.M. – Lipowicz, A. (2000): Tall men have more reproductive success. *Nature* 403, 156.
- Perez, S.I. (2007): Artificial cranial deformation in South America: a geometric morphometrics approximation. *Journal of Archaeological Science* 34: 1649 – 1658.
- Rhode, M.P. – Arriaza, B.T. (2006): Influence of Cranial Deformation on Facial Morphology Among Prehistoric South Central Andean Populations. *American Journal of Physical Anthropology* 130: 462 – 470.
- Rom, W. (1999): AMS 14C Dating of Equipment from the Iceman and of Spruce Logs from the Prehistoric Salt Mines of Hallstatt. *Radiocarbon* 41: 183-199.
- Roseman, C.C. – Weaver, T.D. (2004): Multivariate Apportionment of Global Human Craniometric Diversity. *American Journal of Physical Anthropology* 125: 257 – 263.
- Slice, D. (2002): Morphus et al., beta version morphometric analysis software.
- Soto-Heim, P. (2004): Une marque d'identité imprimée sur l'os: la déformation crânienne intentionnelle. *Biometrie humaine et anthropologie* 22/1-2: 81 – 98.
- Urbanová, P. (2009): A Study of Human Craniofacial Variation by Using Geometric Morphometrics. Dizertační práce, Masaryk University, Brno. (http://is.muni.cz/th/21708/prif_d/Urbanova_2009.pdf, 12.12.2010).
- Urbanová, P. – Eliášová, H. (2009): Applications of 3D Virtual Models in the Process of Identification of Human Mummified Remains. Case Report. EAFS 2009 - 5th European Academy of Forensic Science Conference, Glasgow, UK, September 8 - 11, 2009 (poster).
- Verano, J. – Uceda, S. – Chapdelaine, C. – Tello, R. – Paredes, M. – Pimentel, V. (1999): Modified human skulls from the urban sector of the Pyramids of Moche, Northern Peru. *Latin American Antiquity* 10:59–70.
- Zelditch, M.L. – Swiderski, D.L. – Sheets, H.D. – Fink, W.L. (2004): *Geometric morphometrics for biologists: a primer*. Elsevier Academic Press, New York.
- Zimmerman, M.R. (1978): The Mummified Heart: A Problem in Medicolegal Diagnosis. *Journal of Forensic Sciences* 23/4: 750 – 753.
- Zollikofer C.P.E. (2002): A Computational Approach to Paleoanthropology. *Evolutionary Anthropology Suppl.* 1:64 – 67.

Kapitola 4

Určení populační afinity metodami geometrické a tradiční morfometrie v kriminalistice

Případ nálezu mumifikované lidské hlavy

ÚVOD

Jedním z hlavních cílů forenzně antropologické analýzy je na základě studia zachovaných biologických znaků jednoznačně identifikovat lidské pozůstatky neznámého původu. Forenzní antropolog současně svým odborným vyjádřením přispívá k objasnění kontextu a souvislostí nálezu nebo vyšetřovaného trestného činu. Vyskytují se však případy, ve kterých jsou okolnosti nálezu neznámé, nebo neposkytují dostatečné podklady pro určení totožnosti jedince. V takových situacích je úkolem odborníka poskytnout při nejmenším rámcovému určení biologického profilu neboli skupinovou identifikaci kosterního nálezu.

Lidské pozůstatky, se kterými se setkáváme v kriminalistické praxi, se nalézají v různém stupni dekompozice měkkých tkání, od nálezu mrtvol v raných fázích rozkladu až po plně skeletonizované a rozvolněné ostatky, jež postrádají jakýkoliv náznak předchozího spojení s jinými tělesnými tkáněmi. Dekompozice tkání lidského těla nastupuje v okamžiku smrti jedince a její průběh a stupeň v době nálezu je ovlivněn řadou exogenních i endogenních faktorů. Vlhké teplé prostředí s dostatečným přístupem kyslíku umocněné otevřeným traumatem a rychlou ztrátou krve urychluje degradační procesy oběti. Suché teplé nebo studené prostředí bez přístupu kyslíku degradaci zpomaluje (Haglund, Sorg 1997). Přítomnost měkkých tkání, jež přesahuje standardní dobu posmrtného rozkladu a jež může být způsobena vhodnou kombinací vnějších podmínek nebo uměle navozena chemickými nebo fyzikálními činidly se označuje jako mumifikace (Micozzi 1991). Z pohledu forenzní praxe se mumifikovaná těla nalézají v místech, ve kterých je přítomna stálá cirkulace vzduchu o vyšší teplotě, jako jsou seníky, půdy, krypty, mělké hroby, koruny stromů nebo obytné budovy s unikajícím plynem (Tibbett, Carter 2008).

Nález mumie nebo mumifikovaných částí těla vnáší problém do jinak jasného rozdělení kompetencí u nálezů mrtvol. Obecně platí pravidlo, podle kterého jsou nálezy těl vykazující přítomnost měkkých tkání odváženy k vyšetření na ústavy soudního lékařství. Odborné vyjádření ke kosterním nálezům je naopak v kompetenci forenzně antropologického pracoviště. U mumifikovaných tkání je jasné rozdělení pravomocí narušeno. Ačkoliv se jedná o tělesné pozůstatky s měkkými tkáněmi, ztráta tělních tekutin, absence vnitřních orgánů a stupeň vysušení je natolik vysoký, že ústavy soudního lékařství jsou schopny mumie vyšetřit pouze aspektivně, případně radiologicky anebo přistoupí přímo k preparaci skeletu pro forenzně antropologickou exportízu. To je ovšem proces finančně a časově náročný. Nález se stává nekompletním, je ochuzen o cenné informace a získaný skelet je nakonec v každém případě předán foreznímu antropologovi ke zkoumání. Převoz mumifikovaného těla přímo na antropologické pracoviště také není vhodné řešení, neboť technické a hygienické důvody nedovolují antropologům zkoumat těla se zachovanými měkkými tkáněmi.

Alternativní způsob vyšetření mumifikovaných těl nabízí pokročilé zobrazovací metody, z nichž nejvhodnější se ukazuje být počítačová tomografie. Počítačová tomografie umožňuje zobrazit vnitřní strukturu snímaného předmětu na 2D CT řezech a nezávislou segmentací zobrazených vrstev lze oddělit měkké a tvrdé tkáně neinvazivně a bezkontaktně. Virtuální preparace i následná kvantitativní analýza probíhají výhradně v prostředí počítače a jsou vhodným ekvivalentem přímého ohledání nálezu na pitevním stole nebo v antropologické laboratoři.

Antropologická analýza objemových dat zobrazující lidské pozůstatky je jedním z progresivně se rozvíjejících oblastí fyzické antropologie (Zollikofer, Ponce de León 2005). Spojení virtuálního modelování s prvky pokročilého metrického a morfometrického hodnocení dnes označujeme jako virtuální antropologie (Weber *et al.* 2001). V oblasti forezní antropologie jsou tyto aplikace přijímány s jistou rezervou. Podobně také metody geometrické morfometrie nejsou, až na některé výjimky (Pretorius *et al.* 2006, Kieser *et al.* 2007, Wilson *et al.* 2008, Kimmerle *et al.* 2008), běžně používanou nebo rozvíjenou metodikou. Důvodem je důraz forezních věd na spolehlivost a přesnost metod, které v případech postupů virtuálního modelování a geometrické morfometrie stále čekají na prověření (Sholts *et al.* 2010). Z těchto důvodů je implementace technologických novinek postupná a podléhá přísné kontrole. Tradiční postup při určení biologického profilu kosterního nálezu neznámého původu ve forezní expertíze zahrnuje použití vybraných osteometrických a morfoskopických metod pro odhad populační afinity, určení pohlaví, odhad dožitého věku a rekonstrukci tělesné výšky (Giles, Elliot 1963, Novotný *et al.* 1993, Ferembach *et al.* 1980). Každé expertní forezní pracoviště má obvykle svůj protokol standardně používaných postupů, jejichž volba je přizpůsobena technickému vybavení pracoviště, zkušenostem odborníků i biologickým vlastnostem populace, na které se odborná činnost vztahuje. Obecným znakem tradičně používaných a prověřených metodik pro určení populace a pohlaví na kostře člověka je přímé pozorování nebo měření zkoumaného kosterního nálezu. U virtuálních modelů je tento postup nahrazen interakcí s počítačovou replikou v prostředí specializovaného počítačového programu. Numerická podstata virtuálních modelů usnadňuje získání kvantitativních dat o velikosti a tvaru antropologicky relevantních oblastí (znaků), které jsou u reálných kostí získávána antropometrickým instrumentářem (posuvná nebo dotyková měřidla, úhlooměry) nebo s použitím záznamových zařízení jako jsou mechanické nebo optické digitizéry či skenery.

K usnadnění odhadu biologického profilu kosterního nálezu, především hodnocení pohlaví a populační afinity byly pro účely kosterní a forezní antropologie vyvinuty pomocné počítačové aplikace. Tato počítačová podpora kombinuje tradiční osteometrická data s prvky vícerozměrné statistiky a poskytuje numerické výstupy i zpětnou vazbu o spolehlivosti aplikovaných metod. Nejrozšířenějším z těchto aplikací je program FORDISC 3.0 (Jantz, Ousley 2005) založený na tradiční osteometrii v kombinaci s predikčními modely kanonické analýzy. Program je vhodným pomocníkem pro určení pohlaví na lebce i postkranialním skeletu, pro odhad populační afinity na základě rozměrů lebky i pro rekonstrukci tělesné výšky. Dalším programem je COLIPR – *Coordinate-based Legal Investigation Program* (Urbanová, Králík 2008), zaměřený na určení pohlaví na lebce, který je schopen vyhodnocovat trojrozměrné kartézské souřadnice antropometrických bodů a z nich určit hodnoty potřebných vzdáleností nebo oba vstupní formáty kombinovat. Výhodou tohoto programu je jeho přímá vazba na českou populaci. Nejnovějším přírůstkem do této kategorie je pro-

gram 3D-ID (Slice, Ross 2009), který využívá poznatky geometrické morfometrie. Na základě hodnot kartézských souřadnic vytvoří program s tvarovými proměnnými obecné prokrústovské analýzy patřičná klasifikační pravidla, která jsou poté použita pro zařazení neznámého případu do populační nebo pohlavní kategorie. Ačkoliv program pokrývá všechny hlavní „velké“ populace (Evropané, Afro-Američané, Asiaté), jeho aplikovatelnost v prostředí střední Evropy nebyla prozatím prověřena. Numerická podstata, objektivnost, opakovatelnost postupů ve spojení s jednoduchým uživatelským rozhraním z těchto programů vytvářejí vhodné nástroje pro analýzu virtuálních modelů kosterních či jiných nálezů ve forenzní antropologii. V této studii je prezentován ukázkový příklad antropologické analýzy mumifikované lidské hlavy neznámého původu zapůjčené ze studijních sbírek Kriminalistického ústavu Praha Policie ČR (KÚP). Hlava s krkem dospělého jedince byla zabavena v průběhu policejního vyšetřování a před zajištěním sloužila jako dekorace na zdi. Žádné bližší informace odkazující na původ nebo historickou či jinou hodnotu nebyly k dispozici. Podobné nálezy sloužící jako trofeje nebo dekorace byly ve forenzní praxi již dříve dokumentované (Steadman 2009). Obvykle se jednalo o nálezy ze zdravotně bezpečnostního hlediska irelevantní. Ale protože irelevantnost mumie ze sbírek KÚP nebyla nikdy plně vyloučenou, stejně jako nebyl nikdy odhadnut populační původ nálezu, bylo rozhodnuto, že nález bude revidován s použitím pokročilých zobrazovacích a analytických nástrojů, kterými moderní forenzní antropologie disponuje. Konkrétním cílem antropologického vyšetření bylo doplnit biologický profil jedince, jeho původ a případně odhadnout hodnotu exponátu z pohledu historie či kriminalistiky. Podmínkou antropologické analýzy bylo použití minimálně invazivních vyšetřovacích metod. Odebrání nebo nenávratné poškození zachovaných měkkých částí bylo vyloučeno. Také z tohoto důvodu byla standardní kraniofaciální analýza, která předpokládá preparaci lebky, *a priori* zamítnuta.



Obr. 1. Fotografie zkoumané mumifikované hlavy ve frontálním a laterálním pohledu.

METODY A MATERIÁL

Předmětem antropologické analýzy byla lidská mumifikovaná hlava muže ze studijních sbírek Kriminalistického ústavu Praha Policie ČR. Při vnějším ohledání bylo zjištěno, že hlava byla od zbytku těla odtržena krouživým pohybem v místě pod sedmým krčním obratlem. Zbytky měkkých tkání krku ani zachované krční obratle nevykazovaly stopy po použití řezného či jiného nástroje, který by mohl být použitý při dekapitaci. Povrchové měkké tkáně hlavy byly zachovány v celém rozsahu s výjimkou prázdných očních a oblasti nosního hrotu a křídel. Tmavě hnědě zbarvená, suchá a ztvrdlá kůže nasedala jako tenká vrstva přímo na kostěný podklad. V horní části hlavy byly místy zachovány svazky lidských vlasů hnědo-rezavého odstínu. V oblasti dolní čelisti pak byly patrné zbytky vousů stejného zbarvení. Vedle vnitřních částí očních byl obličej poškozen také v oblasti obou ušních boltců a obou tváří. Přední část chrupavčitého oddílu nosu byla vmáčknutá směrem dovnitř nosní dutiny. Lesklý povrch mumifikovaných částí naznačoval, že měkké tkáně mohly být chemicky ošetřeny.

Mumifikovaná hlava byla nejdříve vyšetřena na spirálním počítačovém tomografu ve spolupráci s Radio-diagnostickým oddělením Fakultní nemocnici u sv. Anny v Brně pod vedením doc. MUDr. Petra Krupy, CSc. Výstup vyšetření o celkovém počtu 320 CT skenů byl následně segmentován v programu AMIRA verze 5.0.1. v Laboratoři morfologie a forenzní antropologie na Ústavu antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Ze segmentovaných částí byly vytvořeny trojrozměrné modely lebky a měkkých tkání.

Po „virtuální preparaci“ lebky mumie bylo možné aplikovat metody kosterní antropologie za účelem určení biologického profilu jedince, tj. potvrzení mužského pohlaví jedince a odhad populační afinity nálezu. V první fázi byl metodami geometrické morfometrie srovnán tvar lebky mumie s lebkami jedinců z 6 evropských populací (3 české, 2 portugalské a 1 řecká populace). Celkem bylo do analýzy zahrnuto 625 lebek, z toho 342 náleželo mužům a 283 ženám. Cílem analýzy tvaru bylo zjistit, zda a jakým způsobem zapadá lebka mumie do variability evropských populací a případně zda by tyto výsledky mohly osvětlit její geografický původ. Výsledky byly následně konfrontovány s výstupy, jež poskytují programy FORDISC 3.0, COLIPR a ID-3D.

Záznam vstupních dat

Hodnoty trojrozměrných kartézských souřadnic 28 význačných bodů (Tab. 1) byly určeny umístěním pomocných editačních značek do příslušného místa na virtuální model lebky v programu AMIRA 5.0.1. Postup byl opakován s odstupem několika dnů. Referenční soubor lebek, se kterými byla data srovnána, byla získána digitalizací pomocí ramenového digitizéru MicroScribe G2 a G2X. Soubor pochází z databáze prostorových dat lebek Ústavu antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity pro účely mezipopulačního srovnání (více viz Urbanová 2009).

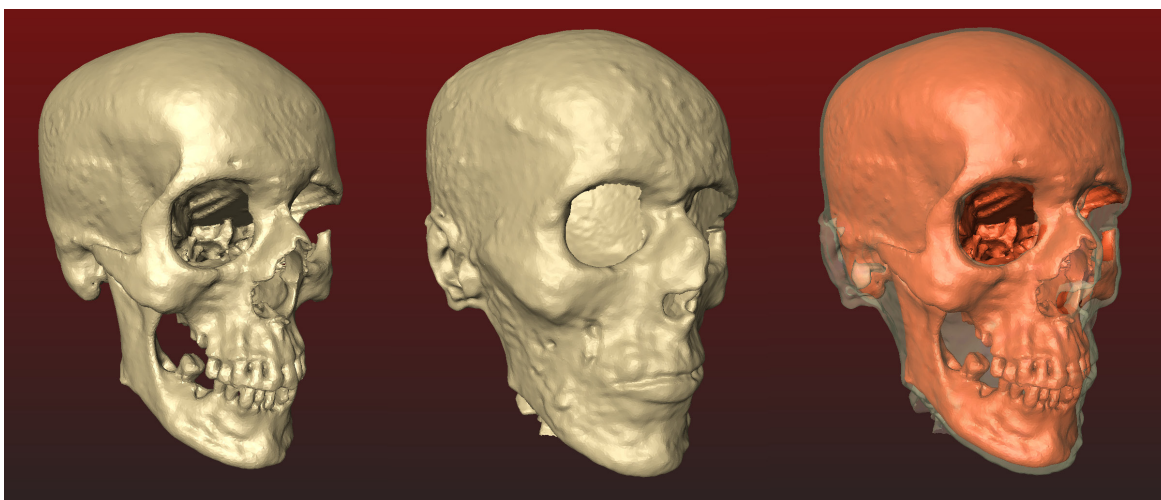
Na základě hodnot kartézských souřadnic význačných bodů byly podle vzorce

$$D = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

určeno následujících 15 kraniálních rozměrů (Tab. 2).

Analýza tvaru

Do analýzy tvaru vstupovaly konfigurace 24 význačných bodů. Z důvodu výskytu chybějících dat byly 4 body z analýzy vyloučeny (L, FTdx, FTsin a OPT). Konfigurace náležící lebce mumie i lebkám srovnávaných populací byly standardizovány současně obecnou prokrústovskou analýzou. Nechtěná asymetrie v poloze bilaterálních bodů na lebce byla odstraněna následujícím způsobem. Pro každou konfiguraci byl nejdříve získán odpovídající zrcadlový obraz bodů symetrický podle osy Y. Po vzájemné superpozici konfigurací byly původní a převrácené hodnoty X-souřadnic bilaterálních bodů zprůměrovány. Prokrústovská analýza



Obr. 2. Virtuální modely lebky, zevního pokryvu hlavy a oba modely v superpozici.

pořadí	význačný bod	zkratka	pořadí	rozměr	koncové body
1	glabela	G	1	největší délka lebky	G-OP
2	nasion	N	2	největší šířka lebky	EUdx-EUsin
3	rhinion	RH	3	šířka obličeje	ZYGdx-ZYGsin
4	nasospinale	NS	4	basiobregmatická výška lebky	B-BA
5	prosthion	P	5	délka báze lebky	N-BA
6/7	aperthion dx/sin	APTdx/APTsín	6	délka obličeje	BA-P
8/9	zygion dx/sin	ZYGdx/ZYGsin	7	výška horního obličeje	N-P
10/11	ektomolare dx/sin	EKTdx/EKTsín	8	nejmenší šířka čela	FTdx-FTsín
12/16	dacryon dx/sin	Ddx/Dsín	9	výška nosu	N-NS
13/17	supraorbitální bod dx/sin	SORdx/SORsín	10	šířka nosu	APTdx-APTsín
14/18	frontomalare orbitale dx/sin	FMOdx/FMOsín	11	dakryální meziočnicová vzdálenost	Ddx-Dsín
15/19	zygoorbitale dx/sin	ZORdx/ZORsín	12	bimaxilární šířka	EKTdx-EKTsín
20	bregma	B	13	délka foramen magnum	BA-OPT
21	opisthocranion	OP	14	mediánní tětíva čela	N-B
22	basion	BA	15	mediánní parietální tětíva	B-L
23/24	euryon dx/sin	EUdx/EUsín			
25*	lanbda	L			
26/27*	frontotemporale dx/sin	FTdx/FTsín			
28*	opithion	OPT			

Tabulka 1. Přehled digitalizovaných bodů, * označuje body, které nebyly součástí konfigurace pro analýzu tvaru.

Tabulka 2. Přehled antropometrických rozměrů určených pro srovnání metodami tradiční morfometrie, definice rozměrů jsou převzaty z Martin, Saller (1957).

za 626 (625 referenčních lebek a 1 lebka mumie) konfigurací poskytla hodnoty konsensů pro každou z referenčních skupin a hodnoty prokrústovských souřadnic. Vedle tvarových proměnných byly získány proměnné popisující polohu objektů v prostoru tvarových a velikostních proměnných. Tyto proměnné byly získány vynásobením hodnot prokrústovských souřadnic logaritmovanými hodnotami velikosti centroidu. Obě sady dat byly dále postoupeny statistické analýze.

Statistické zpracování

Sady prokrústovských souřadnic a prokrústovských souřadnic s upravenou velikostní složkou byly postoupeny analýze hlavních komponent. Cílem analýzy bylo prozkoumat postavení tvaru lebky mumie v kontextu tvarové variability referenčních populací. Pro každou hlavní komponentu byly určeny hodnoty vlastního čísla a vlastních vektorů. Efektivnost hlavních komponent byla deklarována na základě hodnoty Jolliffeho hraničního čísla (Jolliffe 1986). Prokrústovské souřadnice byly dále postoupeny do kanonické analýzy. 12 skupin definovaných s ohledem a populační afinitu a pohlaví poskytlo predikční model, na základě kterého bylo možné přiřadit pohlaví a afinitu tvaru lebky mumie. Pohlaví a afinita k populacím ve studii byla určena na základě hodnoty Mahalanobisovy vzdálenosti D^2 .

Obecná prokrústovská analýza a analýza hlavních komponent byly vypočítány v programu Morphologica² (O'Higgins, Jones 2006). Tento program je uceleným průvodcem pro analýzu dvourozměrných i trojrozměrných význačných bodů, který obsahuje nástroje pro všechny kroky analýzy tvaru, tj. standardizaci, statistické zpracování i grafické znázornění výsledků. Kanonická analýza byla vypočítána v programu NTSYSpC 2.21h.

Vizualizace výsledků

Grafické výstupy analýzy byly vytvořeny pomocí programů Morphologica², NTSYSpC 2.21h a Morpheus *et al.* (Slice 2002). Při vizualizaci trojrozměrných konfigurací byly použity drátové modely a vektory posunutí význačných bodů v prostoru.

Chyba metody

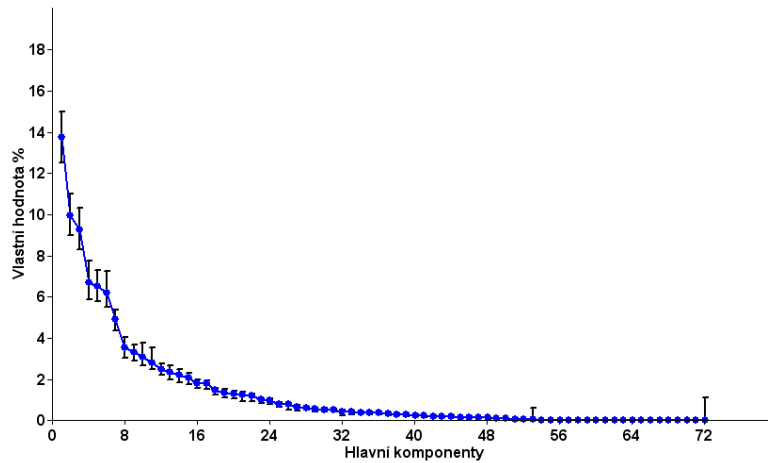
Chyba digitalizace vstupních dat byla určena na základě dvou sad trojrozměrných kartézských souřadnic 24 význačných bodů. Obě konfigurace byly nejprve superponovány obyčejnou prokrústovskou analýzou (tj. superpozicí jedné konfigurace na druhou), aniž by byly standardizovány velikostní rozdíly. Chyba při umístění bodu byla vyčíslena euklidovskou vzdáleností mezi relevantními body. Po odstranění velikostních rozdílů byla vypočítána také hodnota prokrústovské vzdálenosti mezi oběma konfiguracemi. Vliv variability v umístění bodů na velikost kranio-metrických rozměrů byl vyjádřen rozdíly mezi rozměry z první a druhé digitalizace.

Průměrná chyba digitalizace dosáhla hodnoty 0,68 mm pro původní data a 0,61 mm pro data, u kterých byla standardizovaná symetrie bilaterálních bodů. Největší rozdíly byly zaznamenány v poloze bodů zygion a euryon, u kterých chyba přesahovala 1 mm (1,8 mm a 1,24 mm v daném pořadí). Nejmenší chyba byla získána u bodů prosthion, basion a apertion, u kterých nepřesáhla hodnoty 0,2 mm. Nepřesnost v digitalizaci bodů se v lineárních vzdálenostech projevila jako průměrná chyba 0,45 mm. Svého maxima dosáhla logicky u rozměrů, které zahrnují body zygion nebo euryon, to znamená pro rozměry: největší šířka lebky a šířka obličeje. Rozměry získané z druhé sady dat byly nižší než u rozměrů z první sady dat. Pouze v případě dakryální meziočnicové vzdálenosti poskytla opakovaná digitalizace větší hodnotu rozměru. Tyto výsledky jsou srovnatelné s těmi, které jsou udávány pro digitalizace ramenovými digitizéry (von Cramon-Taubadel *et al.* 2007)

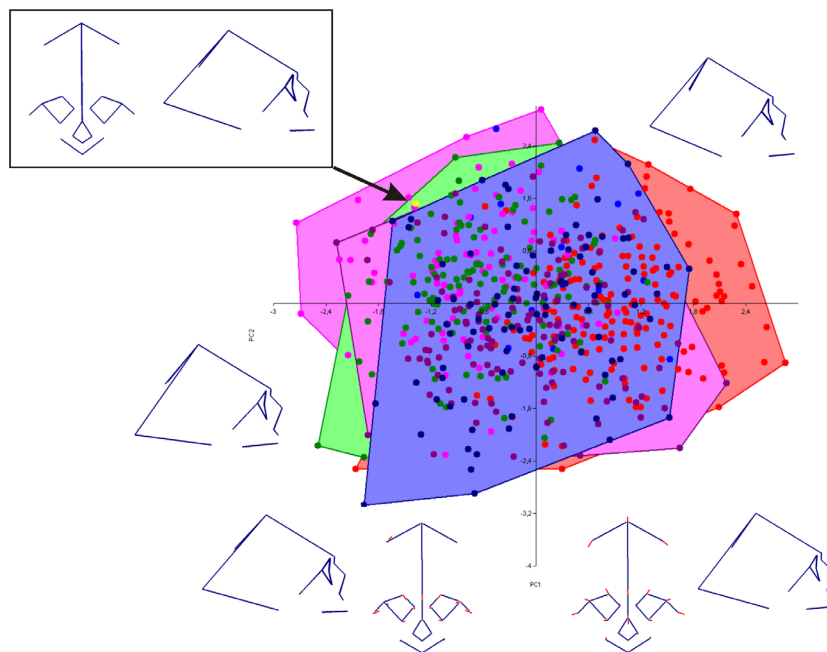
VÝSLEDKY

Analýza hlavních komponent prokrústovských souřadnic poskytla 24 efektivních komponent. Odčerpávání variability komponentami je pozvolné. První hlavní komponenta vysvětluje pouze 13% variability souboru, druhá pak necelých 10% variability. (Obr. 3). Tvar lebky mumie je vyjádřen zápornými hodnotami první a kladnými hodnotami druhé hlavní komponenty. Tyto hodnoty ji v prostoru obou proměnných staví na okraj variability referenčních populací. První hlavní komponenta je spojena se změnami šířky obličeje, délkou a

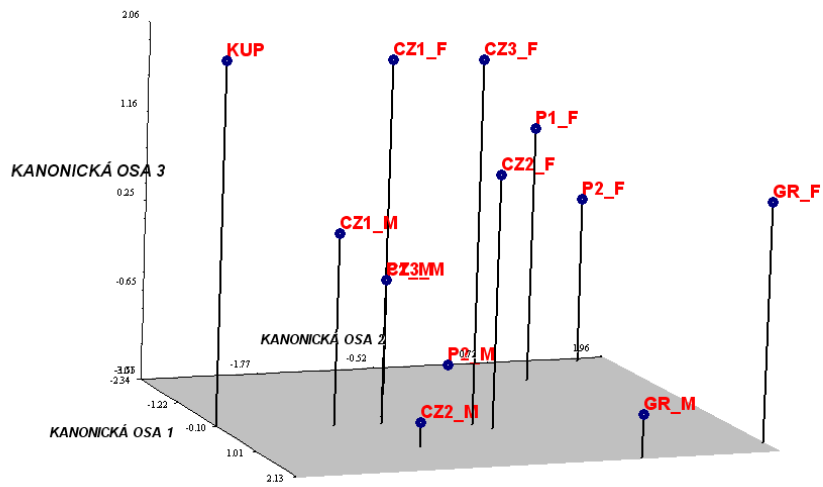
šířkou mozkovny. Směrem ke kladným hodnotám se obličej i mozkovna rozšiřují a lebka se zkracuje. Směrem k maximu záporných hodnot se lebka protahuje, poloha euryíi posunuje dozadu a spolu s ní couvá i poloha, ve které se nachází největší šířka lebky. Druhá hlavní komponenta popisuje změny v prognatismu horní čelisti (kladné hodnoty) a zvětšování maximální délky lebky (záporné hodnoty) (Obr. 4). Analýza hlavních komponent tvarových proměnných s korekcí velikosti poskytla shodné výsledky. 24 efektivních komponent odčerpává 91% variability v souboru. Pozice tvaru lebky mumie se shoduje s předchozími výsledky.



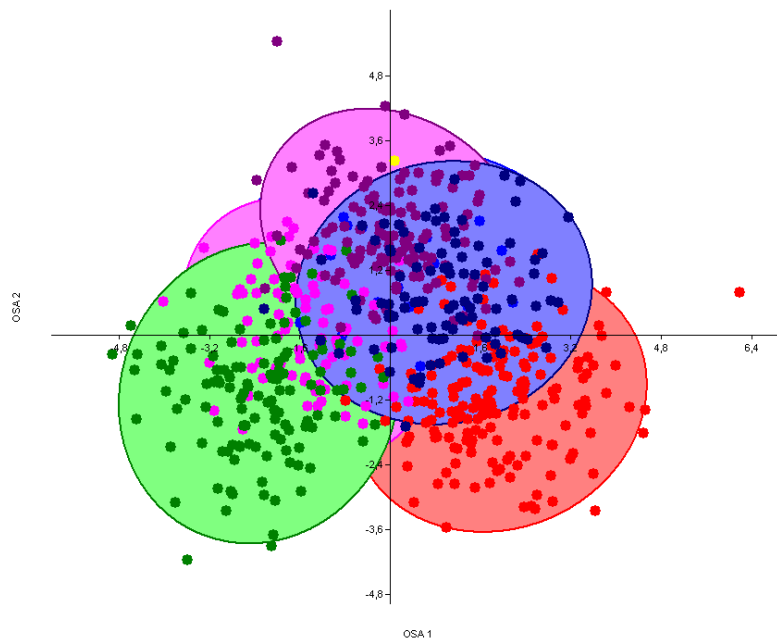
Obr. 3. Vlastní čísla hlavních komponent, 97,5% interval spolehlivosti hodnot byl získán metodou bootstrappingu (N=100).



Obr. 4. Bodový graf první a druhé hlavní komponenty 3D prokrústovských reziduí doplněné extrémními tvary dané komponenty a tvarem modelu zkoumané mumie. Morfologie lebek české populace je zobrazena fialovou barvou.



Obr. 5. Výsledky kanonické analýzy tvarových proměnných referenčních populací. Bodový graf zobrazuje průměrné hodnoty první, druhé a třetí kanonické proměnné pro zkoumané referenční populace, CZ označuje českou populaci, P-portugalskou, GR-řeckou, M-mužské lebky a F-ženské lebky, KUP označuje morfologii zkoumané mumie.



Obr. 6. Bodový graf zobrazující hodnoty první a druhé kanonické proměnné, elipsy ohraničují 95% variability souboru. Morfologie lebek české populace je zobrazena fialovou barvou. Mumie KÚP je vyznačena žlutou barvou.

Na základě hodnot 11 kanonických proměnných a hodnot Mahalanobisovy vzdálenosti k centroidům definovaných skupin vykazovala lebka mumie největší afinitu k lebčkám českých mužů. Z grafického znázornění prvních tří kanonických os (34%, 21% a 16% variability) je však patrné, že toto postavení mumie vůči ostatním jedincům této skupiny je okrajové (Obr. 5, 6).

FORDISC

Na základě 15 lebečních rozměrů bylo v programu FORDISC 3.0 provedeno srovnání s rozměry 33 světových populací, které program nabízí. Pouze lebky mužských lebek byly zařazeny do srovnání. Kanonická analýza vypočítaná algoritmem programu ukázala, že mumie vykazuje nejvyšší populační afinitu ke středoamerickým a jihoamerickým populacím (lebčkám současné populace z Guatemaly a peruánských populací zastoupených v Howellsově databázi lebečních rozměrů, pro srovnání s Howellsovou databází bylo vhodných pouze 12 rozměrů). Ani v jednom případě nevykazovala studovaná lebka afinitu k evropským populacím.

COLIPR

Na základě kartézských souřadnic 24 kranio-metrických bodů s použitím 14 populačně univerzálních a populačně specifických (pro českou populaci) diskriminačních rovnic pro určení pohlaví byla lebka mumie diagnostikována jako mužská (Tabulka 3).

ID-3D

Na základě kartézských souřadnic 19 bodů byla lebka mumie přiřazena mezi muže jihoamerických populací ($D^2=88,16$, aposteriorní pravděpodobnost 0,5201). Stejný výsledek program poskytl i v případě, kdy byla k tvarovým proměnným připojena také velikost lebek v podobě hodnot velikosti centroidu.



Obr. 7. Podobnost morfologie lebky mumie se světovými populacemi zastoupenými v Howellsově databázi. Velikost bodu určuje míru podobnosti s danou geografickou oblastí a je určena vztahem $1/\text{Mahalanobisova vzdálenost}$ mezi morfologií lebky mumie a průměrnou lebkou referenční populace v dané geografické oblasti.

Univerzální	Česká populace
G-OP = 175,376096 mm	G-OP = 174,636622 mm
EU-EU = 142,790089 mm	EU-EU = 141,489213 mm
ZYG-ZYG = 135,49823 mm	ZYG-ZYG = 133,967314 mm
N-P = 74,3406 mm	N-P = 72,946501 mm
RH-NS = 35,770359 mm	RH-NS = 36,594832 mm
B-BA = 133,729407 mm	B-BA = 133,486941 mm
APT-APT = 27 mm	APT-APT = 26,5 mm
EKT-EKT = 59,613745 mm	EKT-EKT = 58,299785 mm
Horizontální ohyb dx = -0,822346 mm	Horizontální ohyb dx = -0,789829 mm
Horizontální ohyb sin = -0,924706 mm	Horizontální ohyb sin = -0,86329 mm
Vertikální ohyb dx = -0,823201 mm	Vertikální ohyb dx = -0,759377 mm
Vertikální ohyb sin = -0,901364 mm	Vertikální ohyb sin = -0,820692 mm
Laterální ohyb = -0,762616 mm	Laterální ohyb = -0,709723 mm
FMO-D/D-FMO = -0,899129 mm	FMO-D/D-FMO = -0,886435 mm
ZOR-D/D-ZOR = 0,251041 mm	ZOR-D/D-ZOR = 0,113076 mm
Velikost orbity dx = 41,513468 mm	Velikost orbity dx = 42,408262 mm
Rovnice 6 = 1,33	Rovnice 6 = 1,22
Rovnice 5 = 1,54	Rovnice 5 = 1,28
Rovnice 7 = 1,83	Rovnice 7 = 1,42
Rovnice 3 = 1,52	Rovnice 3 = 1,65
Rovnice 1 = 1,76	Rovnice 1 = 1,72
Rovnice 4 = 1,56	Rovnice 4 = 1,46
Rovnice 2 = 1,81	Rovnice 2 = 1,54
VÝSLEDEK Muž	VÝSLEDEK Muž

Tab. 3. Výstupy z programu COLIPR.

DISKUZE A ZÁVĚRY

Mumifikované lidské pozůstatky jsou vedle historické antropologie častým předmětem expertní činnosti také v kriminalistice (Steadman 2009). Podobně jako izolované lebky i mumifikované hlavy dříve představovaly hojně suvenýry z cest nebo trofeje z válečných výprav (Bass 1983, Taylor *et al.* 1984). V některých případech byly dokonce používány jako číše nebo poháry (Verano *et al.* 1999, Quigley 2001). Jak ukazuje moderní forenzní praxe, lidské trofejní lebky nebo celé hlavy nejsou žádnou výjimkou ani v současnosti (Sledzik, Ousley 1991) a do rukou forenzního antropologa se mohou kdykoliv dostat z důvodů právních, bezpečnostních nebo etických.

Antropologické metody pro určení biologického profilu člověka jsou založeny na hodnocení somatických znaků jedince. Složitá multifaktoriální podstata posuzovaných znaků, ve které se vedle geneticky podmíněného základu uplatňují adaptační mechanismy, spolu a protichůdně působící faktory vnějšího prostředí, ovlivňují vzhled znaků a vytváří specifické vzorce na úrovni jedince nebo populací. Odhad populační afinity kosterního nálezu neznámého původu představuje klíčový bod identifikace ve forenzně antropologickém zkoumání. Nejenže jedince blíže zařadí do geograficky, etnicky či sociálně vymezené skupiny (populace), ale současně poukáže na některé z faktorů (klíma, výživa, socioekonomický status), které by mohly výstupy identifikačních metod ovlivnit.

Odhad populační afinity vychází v první řadě ze zařazení kosterního nálezu do jedné ze tří velkých skupin („ras“) – kavkazoidní (evropská), negroidní (africká, afroamerická) a mongoloidní (asijská). Každá z těchto skupin je určena typickými morfoskopickými znaky nebo jejich kombinacemi. Tyto znaky nalzáme na lebce i postkranialním skeletu. Vlivem rychlého růstu lebky v raných fázích postnatálního vývoje, do kterého se výraznou mírou promítá populačně specifický genetický potenciál modulovaný faktory vnějšího prostředí, jsou populačně specifické znaky na lebce člověka zřetelnější a více vyvinuté než na postkranialním skeletu. Podrobnější dělení na populace ve smyslu etnický nebo geograficky vymezených celků na základě frekvence morfoskopických znaků většinou není možné. Naopak metrické metody jsou schopny vyjádřit míru odlišností mezi populacemi a kombinaci naměřených rozměrů přiřazují pravděpodobnost, s jakou tato kombinace rozměrů spadá do té či oné skupiny. V této souvislosti je to především tvar lebky, blíže tvar klenby lebky, který je citlivým populačně diskriminujícím ukazatelem.

Přítomnost měkkých tkání do jisté míry usnadňuje určení biologického profilu mumifikované mrtvoly. Zachování vnějších genitálií nebo sekundárních pohlavních znaků na těle (např. zde vousy) s jistotou odkazuje na pohlaví jedince. Podobně měkké tkáně obličeje usnadňují určení etnického původu jedince. Určení populační afinity u mumifikovaných těl je však složitější. Ztráta tekutin výrazně modifikuje populačně specifické znaky v obličeji. Mění se i pigmentace pokožky, jež je obvykle dostatečně diskriminujícím znakem velkých populací. Určení je tedy nakonec odkázáno na standardní kraniofaciální analýzu (Novotný *et al.* 1993). V posledních letech se v rámci identifikačního zkoumání ve forenzní antropologii začínají uplatňovat práce s virtuálními modely skeletálních částí i měkkých tkání (Clement, Marks 2005). Spolu s technickými novinkami se do popředí dostávají metody založené na vícerozměrné statistice nebo na složitějších nelineárních klasifikačních modelech (např. neuronových sítích) (Mahfouz *et al.* 2007). V takových případech hraje důležitou roli vedle odborných zkušeností forenzního antropologa počítačová podpora. Při určení biologického profilu virtuálního modelu mumifikované hlavy byly použity čtyři různé postupy. Za prvé to byla analýza tvaru metodami geometrické morfometrie založená na studiu konfigurace význačných bodů a vícerozměrné statistiky. Za druhé byl použit program 3D-ID (Slice, Ross 2009), jehož algoritmus se *de facto* shoduje s postupy geometrické morfometrie. Ve třetím případě byly výsledky získány použitím programu FORDISC 3.0, který využívá tradiční kranio-metrické rozměry a kanonickou analýzu. A za poslední program COLIPR (Urbanová, Králík 2008), který poskytl pouze potvrzení pohlaví mumie. Všechny čtyři postupy posuzují afinitu k dané skupině na základě postupů vícerozměrné statistiky, kanonické a diskriminační analýzy. Tři z nich využívají trojrozměrná prostorová data, pouze FORDISC je založen na tradičních kranio-metrických rozměrech. Výsledky těchto postupů ukazují, že morfologie lebky mumifikované hlavy se nachází mimo nebo na okraji varibility tvarů lebek, které pozorujeme u souborů zastupující českou populaci, ale i jiné oblasti Evropy.

Spolehlivost odhadu populační afinity se ve všech případech odvíjí od kvality a kvantity referenčních souborů, se kterými je tvar neznámé lebky srovnáván. K analýze populační afinity metodami geometrické morfometrie byly k dispozici pouze data z evropských souborů. Zastoupení některých populací v programu 3D-ID je nápodobně velmi omezené. Například pro jihoamerické populace je v databázi zahrnuto 82 jedinců (Slice, Ross 2009), nicméně pro použitou konfiguraci bodů bylo do kanonické analýzy zahrnuto pouze 14 jedinců. Program FORDISC 3.0 disponuje daty z databáze forenzních případů (*Forensic Data Bank Groups*) a obsahuje také Howellovu databázi kranio-metrických rozměrů 28 světových populací, jež je volně ke stažení na internetu (<http://konig.la.utk.edu/howells.htm>). Pro jiné než tradiční morfometrické srovnání je však tato databáze nevhodná.

Správnost a relevantnost výsledků je také určena přesností, s jakou jsou získána vstupní data. Ačkoliv chybu záznamu nelze nikdy úplně odstranit, její hodnota nesmí nikdy překročit pozorované rozdíly mezi jedinci nebo skupinami (Harris, Smith 2009). Podle očekávání a v souladu s předchozími studii u ramenových digitizérů (Slice, Ross 2009, Valeri *et al.* 1998, Ross, Williams 2008) i 3D optických skenerů (Enciso *et al.* 2004) byla největší chyba odhadu zaznamenána u bodů zygion a euryon. Podle Booksteinovy klasifikace jsou tyto body klasifikovány jako typ III (Bookstein 1991), jejichž definice je tudíž založená na matematické nikoliv biologické podstatě. V tradiční kranio-metrii jsou oba body určeny pokusným vyhledáváním při-

bližného místa výskytu, dokud není dosažena maximální hodnota měření (Martin, Saller 1957). Program 3D-ID již tuto chybu předpokládá a body byly podle autorů (Slice, Ross 2009) záměrně vyloučeny z algoritmu. Na druhé straně je tím metoda ochuzena o body určující šířkové dimenze obličeje a klenby lebky. Oba parametry mají ústřední postavení v mezipopulačních rozdílech na lebce člověka (Beals 1972, Beals 1983, Crognier 1981, Falk, Corrucini 1982, Ruff 2002). Aplikace automatických nebo poloautomatických algoritmů pro extrakci dat z virtuálních modelů by mohla být jednou z cest, jak tento problém vyřešit.

Bylo zřejmým překvapením, že zkoumaná mumifikovaná hlava vykazovala nejvyšší populační afinitu k jihoamerickým populacím. Přirozená, ale i umělá, mumifikace je velmi častý jev u nálezů lidských pozůstatků kultur předkolumbovské Ameriky (Aufderheide 2003). Příznivé podmínky aridních oblastí na západním pobřeží kontinentu (Peru, Chile) poskytovaly a stále poskytují vhodné prostředí pro uchování měkkých tkání těl uložených v hrobech i ponechaných na povrchu. Nápodobně nejsou ojedinělým případem ani nálezy izolovaných mumifikovaných hlav nebo lebek nebo naopak bezhlavých těl. Dekapitace nepřátel je častým motivem v ikonografii předkolumbovských kultur a řada výjevů naznačuje, že oddělení hlavy od těla bylo součástí rituálních praktik. U některých kultur (Jivaro, Paracas, Nasca) se tato tradice rozvinula do rituálního chování zahrnujícího sofistikované postupy úpravy získaných trofejí. Nálezy miniaturních hlaviček, tzv. tsantsy, jsou v archeologickém kontextu doloženy od raných fází osídlení až do příchodů Evropanů (Verano et al. 1999, Proulx 2001). Ačkoliv o funkci těchto nálezů existuje řada spekulací, jsou obvykle interpretovány jako trofeje nepřátel nebo obětí (Aufderheide 2003).

U peruánské kultury Nasca byla popsána celá série trofejních hlav s typickým otvorem v čelní kosti pro zavěšení a s nepravidelným zvětšením velkého týlního otvoru pro vyjmutí mozku. Carmichael (1994) popisuje, že v případě výzkumu nazcazského pohřebiště bylo 5-10% hrobů tvořeno izolovanými hlavami nebo bezhlavými torzy. Antropologické zhodnocení těchto nálezů ukázalo, že se převážně jednalo o muže ve věku 20 až 50 let. Hlava nazcazských mumii byla od těla oddělena ostrým nástrojem z kamenné industrie (obsidián) a to v místě nad krčními obratli. V průběhu přípravy těla byly vedle mozku vyjmuty také oči (Proulx 2001). V případě mumie z KÚP se stejně jako u Carmichaela (1994) jedná o muže v produktivním věku a orbity nálezu byly prázdné. Na první pohled je nicméně zřejmé, že k oddělení hlavy od těla nebyl použit žádný ostrý nástroj. Zdá se spíše, že hlava byla odtržena nebo odkroucena. Stejně tak nebyl nalezen žádný důkaz, který by naznačoval, že hlava byla odtržena před tím, než došlo k mumifikaci měkkých tkání, ani že by byl mozek z lebky vyjmut. Absence otvoru v čelní krajině také odlišuje mumii od typu, který popisuje Carmichael (1994).

Nezávisle na morfometrické analýze mumie byly na Oddělení chemických analýz Kriminalistického ústavu Praha elektronovým skenovacím mikroskopem a spektrometrem na čele mumie v povrchových vrstvách klišu prokázány šupiny zlata (Urbanová, Eliášová 2009). Zlato a metalurgie zlata hrála prominentní roli v životě i pohřebním ritu řady peruánských a chilských kultur (Paracas, Nasca, Inca). Zlaté předměty se přikládaly do obalových vrstev mumie nebo jimi bylo ozdobeno tělo mrtvého. U nazcazské kultury jsou popisovány nálezy tzv. obličejových masek nebo čelenek, které se přikládaly na oblast, jež by odpovídala výskytu zlatých šupin na čele zkoumané mumie (Stöllner 2009).

Revize antropologické expertízy mumifikované hlavy muže ze studijních sbírek KÚP vrhá světlo na původ i relevanci nálezu. S velikou pravděpodobností můžeme říct, že nález je ze zdravotně-bezpečnostního hlediska irelevantní. O historické nebo archeologické hodnotě můžeme pouze spekulovat. Jihoamerický původ, přítomnost zlata i analogie s dokumentovanými případy by jej mohla řadit mezi hodnotné muzejní nebo studijní exponáty. Použití moderních postupů zobrazovacích, deskriptivních a analytických postupů při revizi nálezu dále dokazuje jejich užitečnost a nutnost dalšího rozvoje pro relevantnější a sociálně palčivější případy.

CITOVANÁ LITERATURA

- Aufderheide, A.C. (2003): *The Scientific Study of Mummies*, Cambridge University Press.
- Bass, W.M. (1983): The Occurrence of Japanese Trophy Skulls in the United States. *Journal of Forensic Sciences* 28/3: 800 – 803.
- Beals, K.L. (1972): Head form and climatic stress. *American Journal of Physical Anthropology* 37: 85 – 92.
- Beals, K.L. – Smith, C.L. – Dodd, S.M. (1983): Climate and the evolution of brachycephalization. *American Journal of Physical Anthropology* 62/4: 425 – 437.
- Bookstein, F.L. (1991): *Morphometric Tools for Landmark Data*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Carmichael, P. (1994): The Life from Death Continuum in Nasca Imagery. *Andean Past* 4:81 – 90.
- Clement, J.G. - Marks, M.K. (2005): *Computer-graphic facial reconstruction*. Academic Press,
- Crognier, E. (1981): Climate and Anthropometric Variation in Europe and the Mediterranean Area. *Annals of Human Biology* 8: 99 – 107.
- Enciso, R. – Alexandroni, E. S. - Benyamein, K. – Keim, R. A. – Mah, J. (2004): Precision, Repeatability and Validation of Indirect 3D Anthropometric Measurements with Light-Based Imaging Techniques. *Proceedings of 2nd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging* : 1119 – 1122.
- Falk, D. – Corruccini, R. (1982): Efficacy of Cranial versus Dental Measurement for Separating Human Populations. *American Journal of Physical Anthropology* 57: 123 – 127.
- Ferembach, D. – Schwidetzky, L. – Stloukal, M. (1980): Recommendations for age and sex diagnoses of skeleton. *Journal of Human Evolution* 9: 517-549.
- Giles, E. – Elliot, O. (1963): Sex determination by discriminant analysis of crania. *American Journal of Physical Anthropology* 21: 53-68.
- Haglund, W.D. – Sorg, (1997): *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains*, pp. 139 – 149, CRC Press, Florida, USA.
- Harris, E.F. – Smith, R.N. (2009): Accounting for measurement error: A critical but often overlooked process. *Archives of Oral Biology* 54S: 107 – 117.
- Jantz, R.L. – Ousley S.D. (2005): *FORDISC 3: Computerized Forensic Discriminant Functions*. Version 3.0. The University of Tennessee, Knoxville.
- Jolliffe, I.T. (1986): *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Kieser, J. A. – Bernal, V. – Waddell, J.N. – Raju, S. (2007): The Uniqueness of the Human Anterior Dentition: A Geometric Morphometric Analysis. *Journal of Forensic Sciences* 52/3: 1 – 7.
- Kimmerle, E.H. – Ross, A. – Slice, D. (2008): Sexual Dimorphism in America: Geometric morphometric Analysis of the Craniofacial Region. *Journal of Forensic Sciences* 53/1: 54-57.
- Mahfouz, M. – Badawi, A. – Merkl, B. – Abdel Fatah, E.E. – Pritchard, E. – Kesler, K. – Moore, M. – Jantz, R. – Jantz, L. (2007): Patella sex determination by 3D statistical shape models and nonlinear classifiers. *Forensic Science International* 173: 161 – 170.
- Martin, R. – Saller, K. (1957): *Lehrbuch der Anthropologie*. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart.
- Micozzi, M.S. (1991). *Postmortem Change in Human and Animal Remains: A Systematic Approach*. Springfield, IL: Charles C. Thomas.

- Novotný, V. – İřcan, M.Y. – Loth, S.R. (1993). Morphologic and osteometric assessment of age, sex, and race from the skull. In: M.Y. İřcan, R. Helmer (eds.): *Forensic Analysis of the Skull*. Wiley-Liss, Inc.: New York, pp. 71-88.
- O'Higgins, P. – Jones, N. (2006): Tools for statistical shape analysis. Hull York Medical School. <http://www.york.ac.uk/res/fme/resources/software.htm>
- Pretorius, E. – Steyn, M. – Scholtz, Y. (2006): Investigation into the usability of geometric morphometric analysis in assessment of sexual dimorphism. *American Journal of Physical Anthropology* 129/1: 64 – 70.
- Proulx, D.A. (2001): Ritual Use of Trophy Heads in Ancient Nasca Society. In: E. Benson, A. Cook (eds.): *Ritual Sacrifice in Ancient Peru: New Discoveries and Interpretations*, University of Texas Press, pp. 119 – 136.
- Quigley, C. (2001): *Skulls and skeletons: human bone collections and accumulations*. McFarland and Company, Inc. Publishers, North Carolina USA.
- Ross, A.H. – Williams, S. (2008): Testing Repeatability and Error of Coordinate Landmark Data Acquired from Crania. *Journal of Forensic Sciences* 53/4: 782 – 785.
- Ruff, C. (2002): Variation in Human Body Size and Shape. *Annual Review of Anthropology* 31: 211 – 232.
- Slice, D. (2002): Morphus et al., beta version morphometric analysis software.
- Slice, D.E. – Ross, A. (2009): 3D-ID: geometric morphometric classification of crania for forensic scientists. Version 1.0 (17.12.2010). <http://www.3d-id.org>
- Sholts, S.B. – Wärmländer, S. K.T.S. – Flores, L.M. – Miller, K.W.P. – Walker, P. L. (2010): Variation in the Measurement of Cranial Volume and Surface Area Using 3D Laser Scanning Technology. *Journal of Forensic Sciences* 55/4: 871 – 877.
- Sledzik, P.S. – Ousley, S. (1991): Analysis of six Vietnamese trophy skulls. *Journal of Forensic Sciences* 36: 520 – 530.
- Steadman, D.W. (2009): The Pawn Shop Mummified Head: Discriminating among Forensic, Historic, and Ancient Contexts. In: D.W. Steadman (ed.): *Hard Evidence. Case Studies in Forensic Anthropology*, Pearson Education, Inc., pp. 258 – 270.
- Stöllner, T. (2009): Gold in Southern Peru? Perspectives of Research into Mining Archaeology. In: M. Reindel, Günther, A.W. (eds.): *New Technologies for Archaeology. Multidisciplinary Investigations in Palpa and Nasca, Peru*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 393 – 408.
- Taylor, J.V. – Roh, L. – Goldman, A.D. (1984): Metropolitan Forensic Anthropology Team (MFAT) Case Studies in Identification: 2. Identification of a Vietnamese Trophy Skull. *Journal of Forensic Sciences* 29/4: 1253 – 1259.
- Tibbett, M. – Carter, D.O. (2008): *Soil analysis in forensic taphonomy*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Urbanová, P. (2009): *A Study of Human Craniofacial Variation by Using Geometric Morphometrics*. Dizertační práce, Masaryk University, Brno. (http://is.muni.cz/th/21708/prif_d/Urbanova_2009.pdf, 12.12.2010).
- Urbanová, P. – Eliášová, H. (2009): Applications of 3D Virtual Models in the Process of Identification of Human Mummified Remains. Case Report. EAFS 2009 - 5th European Academy of Forensic Science Conference, Glasgow, UK, September 8 - 11, 2009 (poster).
- Urbanová, P. – Králík, M. (2008): COLIPR (Coordinate-based Legal Investigation Program). Masarykova univerzita, Brno.
- Valeri, C. – Cole, T.I. – Lele, S. – Richtsmeier, J. (1998): Capturing data from surfaces using fuzzy landmarks. *American Journal of Physical Anthropology* 107: 113-124.
- Verano, J.W. – Uceda, S. – Chapdelaine, C. – Tello, R. – Paredes, M.I. – Pimentel, V. (1999): Modified Human Skulls from the Urban Sector of the Pyramids of Moche, Northern Peru. *Latin American Antiquity* 10/1: 59 – 70.

von Cramon-Taubadel, N. – Frazier, B.C. – Lahr, M.M. (2007): The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods and modifications. *American Journal of Physical Anthropology* 134:24 – 35.

Weber, G.H. – Schäfer, K. – Prossinger, H. – Gunz, P. – Mitteröcker, P. – Seidler, H. (2001): Virtual Anthropology: The Digital Evolution in Anthropological Sciences. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science* 20/2: 69 – 80.

Wilson, L.A. – MacLeod, N. – Humphrey, L.T. (2008): Morphometric Criteria for Sexing Juvenile Human Skeletons Using the Ilium. *Journal of Forensic Sciences* 53/2: 269 – 278.

Zollikofer, C.P.E. – Ponce de León, M.S. (2005): *Virtual Reconstruction. A primer in komputer-assisted paleontology and biomedicine*. John Wiley & sons, Inc.

Kapitola 5

Analýza tvaru stop zvířat na středověkých cihlách

ÚVOD

Navzdory obecné představě jsou otisky částí lidského těla na archeologických předmětech různé povahy a původu nebývale běžným jevem (Leakey 1976, Mietto et al. 2003, Sharpe, Van Gelder 2006, Moran 2007). Podobně nejsou na předmětech lidské produkce raritou ani otisky jiných obratlovců. Stopy zvířat odlišného taxonomického zařazení byly dokumentovány z různých geografických lokalit i časových horizontů (Burian 1969, Janál 2002, Musil 1997, Nekuda 1985). Na užitkové keramice obvykle nalzáme otisky těch zvířat, které lze logicky očekávat v blízkosti procesu jejich výroby. Nejčastěji se jedná o psy nebo kočky, ale jsou známé také doklady zvířat, jejichž přímý kontakt s produkcí užitkové keramiky bychom očekávali podstatně méně, například skot (Králík *et al.* 2006, Králík *et al.* 2008). Archeologická literatura se obvykle omezuje na strohý přehled dokládající přítomnost otisků zvířat, a proto vedle stručného popisu a bližšího taxonomického zařazení otisknutého zvířete, již nenajdeme žádnou ucelenější analýzu.

Podobně jako kterýkoliv objekt lze stopu zvířete charakterizovat základními veličinami jako je velikost (délka, šířka, hloubka), tvar, celkový počet, vzájemná vzdálenost nebo poloha. Tyto vlastnosti odkazují na taxonomické zařazení otisknutého zvířete, věk, pohlaví zvířete, určují, zda se jedná o stopu přední nebo zadní končetiny, ale napomáhají také blíže interpretovat stopy z pohledu lokomočního chování (chůze, běh atd.).

Rozdíly mezi stopami psovitých a kočkovitých šelem jsou patrné na první pohled. Stopy psů jsou oválně protáhlé a nepatrně asymetrické. Prostor mezi otisky polštářků má tvar písmene X. Ve stopě se otiskují bříška čtyř prstů (II. – IV.), první prst je redukovaný a ve stopě se téměř nikdy neotiskuje. Vedle prstových bříšek se v dorzální části stopy otiskují spojené metakarpální, respektive metatarzální bříška. Vedle těchto „pravidelných“ součástí stopy se mohou za specifických podmínek (hluboký substrát, vysoká rychlost pohybu zvířete aj.) otisknout také karpální, resp. tarzální bříška, která jsou umístěna relativně vysoko na končetině. Nejventrálnější bod otisku III. a IV. prstového bříška se nachází v jedné úrovni. To znamená, že ani jeden z prstů „nepředbíhá“ a největší délka stopy se měří v úrovni obou prstů. Stopy koček jsou v porovnání se psy kratší, širší a celkově kulatější. Odlišné je také proporční zastoupení jednotlivých složek, které tvoří celkový otisk končetiny. U stop koček zabírá metakarpální respektive metatarzální bříško větší plochu otisku než u stop psů. Nejdorzálnější okraj stopy je zřetelně roz-

dělen na tři laloky. Stopy jsou asymetrické, první prst tlapy je stejně jako u psů redukován a na stopách není nikdy zřetelný. Ostatní prsty jsou na stopách dobře rozpoznatelné. Třetí prst bývá vždy větší než prst čtvrtý a špička otisku III. prstového bříška je tudíž nejventrálnějším bodem celé stopy. Otisky jednotlivých bříšek prstů mají tvar kapek, při čemž špičky kapek směřuje ventrálně. Na rozdíl od psích stop, kde se otiskují i drápy, jsou drápy koček ve stopě spíše vzácností, a pokud se otisknou, naznačují to, že při dotyku se substrátem zvíře běželo nebo skákalo.

Velikostní parametry stop jsou úzce spojeny s celkovou velikostí těla. Volně žijící druhy čeledi psovitých i kočkovitých jsou větší než domestikovaní psi a kočky a tudíž i jejich stopy jsou v absolutních hodnotách větší. Zatímco maximální délka stopy středně velkého psa (*Canis familiaris*) dosahuje hodnoty v rozmezí od 60 do 80 mm, u vlka (*Canis lupus*) je to téměř dvakrát tolik (Elbroch 2003).

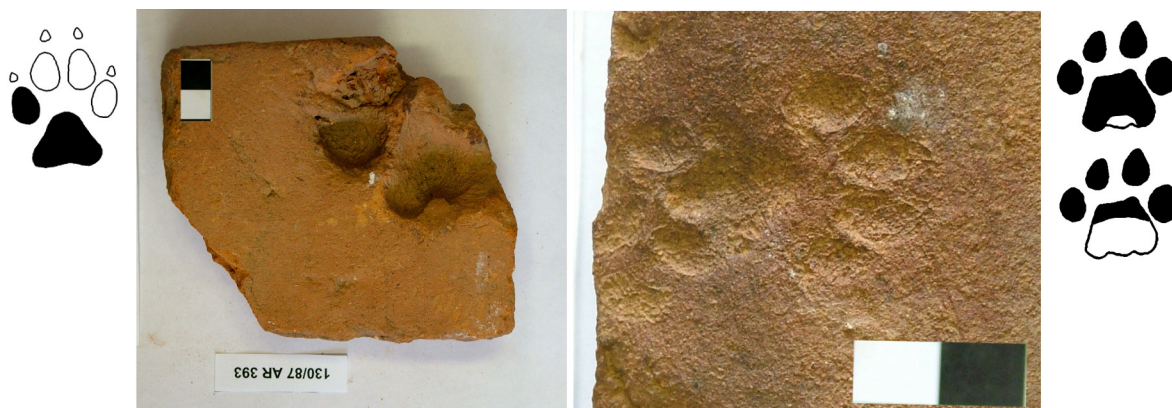
Určení, zda se otiskly přední nebo zadní končetiny je opět založeno na tvarových a velikostních rozdílech obou párů stop. Otisky předních končetin psů jsou relativně větší a širší než zadní. Otisk metakarpálního polštářku u stop předních končetin je výraznější než u metatarzálního protějšku stop zadních končetin. V závislosti na tvrdosti a množství substrátu, do kterého se zvíře otiskne, lze vedle otisků polštářků pozorovat také otisky drápů. U předních končetin se zaznamenávají všechny čtyři drápy odpovídající prstům. U zadních končetin jsou výraznější otisky drápů III. a IV. prstu a ostatní dva v mnoha případech scházejí (Elbroch 2003). U koček jsou stopy předních tlapek obvykle větší než stopy zadních tlapek. Přesto jsou velikostní rozdíly proti stopám psů, i proti psům malých rozměrů, zcela zřetelné.

Tradiční morfometrická analýza zvířecích stop, především pak stop šelem, postrádá ustálené přesně definované rozměry. Neexistuje například konvence, která by ustavovala, která místa stopy určují její maximální délku. Na rozdíl od běžně pozorovaných stop zvířat v přírodě stopy na archeologickém materiálu bývají často nekompletní. Stupeň jejich zachování závisí nejen na rozsahu otisknutelné a otisknuté části plosky tlapy zvířete, ale také na depozičních a postdepozičních procesech substrátu, do něhož se zvíře otisklo, respektive artefaktu s otiskem zvířete. Srovnání stop na základě rozměrů, které bychom naměřili na stopách v přírodě je proto problematické. Použití absolutních lineárních rozměrů navíc brání rozdíly mezi vlastnostmi otisku v čerstvém substrátu, tj. hlíny, a měřeném výsledku v přenosném médiu, tj. keramice. Sušením a výpalem hlíny dochází k redukci původních metrických rozměrů v průměru o 7,5% a rozměry je proto nutné upravit o daný koeficient smrštění.

V této studii je prezentován postup hodnocení otisků stop psů a koček na archeologických nálezech na základě metod geometrické morfometrie. Ačkoliv v humanitních vědách najdeme množství studií aplikujících nejrůznější matematické, statistické nebo jiné pokročilé analytické postupy (Malina, Vašíček 1990, Saragusti *et al.* 2005, Saragusti *et al.* 1998, Hagstrum, Hildebrand 1990), geometrická morfometrie, jež vznikala primárně z podhoubí biostatistických a biometrických základů, nemá v archeologii příliš početné zastoupení. Přesto lze v poslední době vystopovat jistý obrat, a to především v oblastech, ve kterých se uplatňuje mezioborová spolupráce s geologickými nebo biologickými vědami. Tímto způsobem našla geometrická morfometrie uplatnění při popisu paleolitické kamenné industrie (Buchanan *et al.* 2007, Archer, Braun 2010, Lycett, Chauhan 2010) nebo variability osteoarcheologických nálezů (Bignon *et al.* 2005). Podobně nejsou početné práce, jež by hodnotily stopy zvířat metodami pokročilé deskripce tvaru. García *et al.* (2010) hodnotili pohlavní rozdíly ve tvaru stop kočkovitých pomocí eliptické Fourierovy analýzy. Rodrigues, dos Santos (2004) využili prokrústovskou analýzu a analýzu relativních varp k popisu stop jurských ichtyosaurů.

Použití geometrické morfometrie k popisu stop zvířat na archeologických předmětech přináší vedle výhod, jež jsou obvykle prezentovány ve spojení s pokročilými metodami analýzy tvaru (numerický výstup, zachování prostorové informace, vizualizace výsledků apod.) také způsob, jakým lze elegantně eliminovat vliv smrštění na popis stop zachovaných v odlišných substrátech. Pokud předpokládáme rovnoměrné smrštění substrátu, pak velikostní rozdíly mezi srovnávanými tvary jsou automaticky odstraněny v průběhu úpravy dat pro kvantitativní popis.

Iniciátorem této studie byla snaha blíže identifikovat neúplné zvířecí stopy nalezené na souboru 20 středověkých cihel ze středověké lokality Sezimovo Ústí (Obr. 1) (více o lokalitě viz Richter, Krajc 2001).



Obr. 1. Ukázky otisků stop psa (*Canis familiaris*) a kočky (*Felis catus*) na středověkých cihlách ze Sezimova ústí.

Zlomkovitost cihel se stopami vyústila v potřebu vytvořit na základě referenčního souboru tvarů vhodný predikční model, který by se na jedné straně vyrovnal k velkým množstvím chybějících prostorových dat, a na straně druhé by byl pomocníkem v určení taxonomické příslušnosti, lateralitě i pořadí stop na cihlách.

Problém neúplných vstupních dat

Přítomnost chybějících prostorových dat zásadně komplikuje kvantitativní popis tvaru metodami geometrické morfometrie. Neúplnost studovaného materiálu je častým jevem v oborech, jako je kosterní antropologie, paleontologie nebo archeologie, ve kterých tafonomické faktory narušují původní integritu předmětů nebo organických zbytků. Nejjednodušší, ale zároveň nejméně ekonomické řešení, jak tuto překážku překonat, je zahrnutí pouze těch tvarů, které jsou kompletní. Tím však vystavujeme analýzu jinému problému. Snížení počtu tvarů může výrazně snížit tvarovou variabilitu nebo ji posunout k jednomu z extrémních tvarů. Druhou strategií je snížení počtu bodů konfigurace nebo omezení analýzy tvaru na ty části objektů, které jsou vždy přítomny. To však může vést k nadměrné abstrakci tvaru na straně jedné a posunu v interpretaci popsané tvarové variability na straně druhé. Třetí možný postup, jak se vypořádat s neúplnými daty, je nahradit prázdné místo v matici vhodnou hodnotou, například aritmetickým průměrem nebo jinou hodnotou reprezentující střední hodnotu skupiny nebo podskupiny dat. Nevýhodou této strategie je skutečnost, že postup ve svém důsledku podhodnocuje posuzovanou variabilitu souboru. Jako čtvrtý možný postup přichází v úvahu predikce hodnoty na základě regresního modelu, který byl vytvořen na kompletních datech. V případech, ve kterých je množství chybějících dat vysoké a tvarové změny komplexní to však může přinést nevyzpytatelné výsledky. Další možnost se nabízí u bilaterálně souměrných struktur. Popisujeme-li objekt konfigurací bodů, který mají svůj zrcadlový ekvivalent a odchylky v symetrii nejsou předmětem zájmu, je možné chybějící data nahradit převrácenou hodnotou protilehlého bodu nebo části obrysu (McNulty *et al.* 2006). Sofistikované řešení poskytují statistické postupy založené na metodě maximální věrohodnosti (anglicky *maximum likelihood*) (Little, Schluchter 1985) a TPS funkci (Mitteroecker, Gunz 2009). Tento postup je postaven na predikci chybějícího bodu s ohledem na minimální hodnotu deformační energie tvarové změny mezi kompletním referenčním a nekompletním cílovým tvarem a klade velký důraz na správný výběr referenčního tvaru. Vedle hodnoty deformační energie je jako kritérium pro predikci polohy bodu možné použít také hodnoty prokrústovské vzdálenosti.

MATERIÁL A METODY

Studovaný materiál představoval soubor 20 cihel ze středověké lokality Sezimovo Ústí, který byl podstoupen na Ústav antropologie PřF MU za účelem trasologické studie výroby cihel a s ní souvisejících otisků lidských rukou. Při této analýze byly na 6 z 20 studovaných cihel (6 AR 42, 95/88 AR 392, 121/87 AR 392, 135/87 AR 387, 130/87 AR 393) objeveny otisky zvířecího původu. Po očištění a pečlivějším ohledání materiálu bylo na cihlách identifikováno celkem 10 stop, které byly podstoupeny bližší analýze. Vizuálním zhodnocením otisků byla určena taxonomická příslušnost otisknutého zvířete, laterality otisku, a zda se otisky přední nebo zadní končetiny. Na základě vnější morfologie bylo 8 z 10 stop přiřazeno čeledi psovití (*Canidae*), s největší pravděpodobností druhu pes domácí (*Canis familiaris*) a dvě stopy k čeledi kočkovití (*Felidae*) a blíže pak druhu kočka domácí (*Felis catus*). Více než jedna stopa na předmětu byla zaznamenána pouze ve dvou případech (tři stopy na cihle 6 AR 42 a dvě stopy na cihle 121/87 AR 392). U pěti stop bylo určeno pořadí a laterality stopy. Dvě stopy jsou otisky předních (obě z pravé strany) končetin. Tři jsou otisky zadních nohou (1 z pravé strany a 2 ze strany levé). Stopy koček byly nalezeny na jediném objektu, na fragmentu prejzu (č. 74/87 AR 387). Kompletně zachovaná byla pouze jediná stopa (cihla 121/87 AR 392, stopa 1).

Referenční soubor pro srovnání se stopami na cihlách a pro vytvoření predikčních modelů se skládal z digitálních snímků 38 stop psů a 4 stop koček otisknutých do keramické hlíny. Každá ze stop souboru byla snímána digitálním fotoaparátem Fuji FinePix S7000 a u každého snímku bylo zaznamenáno taxonomické zařazení otisknutého zvířete, laterality otisku (pravá vs. levá končetina) a zda se jedná o otisk přední nebo zadní končetiny. Vedle stop z cihel a referenčního souboru recentních psů a koček jsme do souboru zahrnuli také databázi snímků rozličných představitelů čeledi *Felidae* a *Canidae*, které jsme získali z odborných tištěných i elektronických publikací (Elbroch 2003, Stokes, Stokes 1986, Cabrera 2008). Vybírány byly pouze snímky, které odpovídali standardní pozici, v jaké jsme fotografovali stopy referenčního souboru. Zahrnuty byly stopy předních i zadních končetin a stopy z pravé i levé strany těla. Studovaný soubor čítal 104 digitálních snímků.

Cílem analýzy tvaru bylo získat objektivní přehled o tvarové variabilitě zkoumaných stop s ohledem na mezidruhové rozdíly, původ stopy (přední/zadní, levá/pravá strana) a rozdíly v prostoru a čase.

Záznam vstupních dat

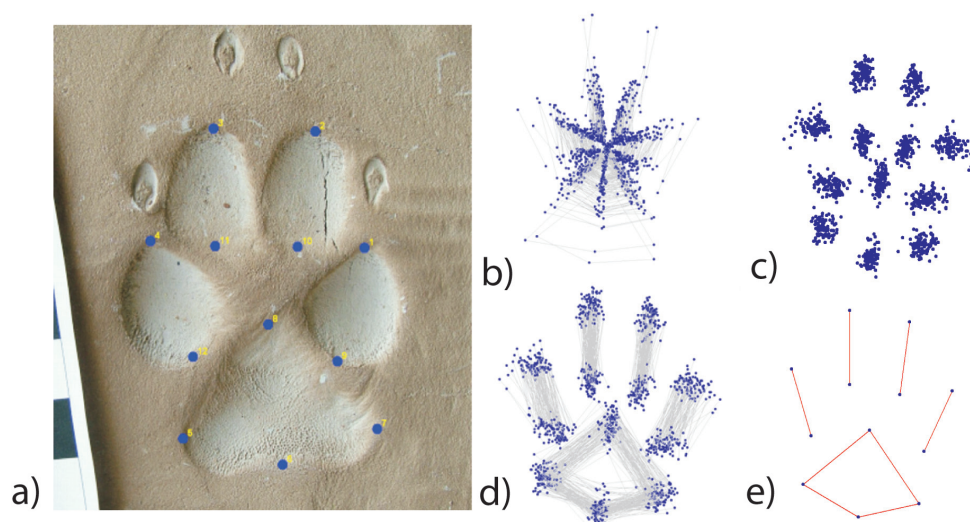
U každého snímku stopy byla zaznamenána poloha 12 význačných bodů. Data byla získána s pomocí programu TPSDig 2.05 (Rohlf 2005). Snímky stopy levé strany těla šelmy byly před digitalizací zrcadlově převráceny tak, aby odpovídaly orientaci stop pravé strany těla.

Analýza tvaru

Konfigurace bodů byly standardizovány obecnou prokrústovskou analýzou. Tímto postupem byla získána první sada tvarových proměnných (prokrústovské souřadnice, prokrústovská rezidua, prokrústovské vzdálenosti). Druhá sada tvarových proměnných (hlavní a dílčí varpy) byla následně získána metodou tenkých ohebných plátek.

Statistické zpracování

Při rozlišení taxonomických skupin na základě tvaru stop byla aplikována kanonická analýza. Vstupními daty byly prokrústovské souřadnice 104 snímků stop referenčního souboru a snímků stop na cihlách 121/87 AR 392/1 a 74/87 AR 387. Důvodem pro toto omezení byla fragmentárnost ostatních stop a absence význačných bodů potřebných pro komparaci s ostatními druhy. Před vlastní kanonickou analýzou byly rozdíly mezi skupinami posouzeny neparametrickou analýzou rozptylu (NPMANOVA).



Obr. 2. Schéma ilustrující základní kroky analýzy tvaru pomocí metod geometrické morfometrie. Na stopách bylo definováno 12 význačných bodů (a), které byly následně standardizovány prokrústovskou superpozicí tak, že byly minimalizovány rozdíly ve velikosti (b), poloze a otočení stop (c, d). Na základě těchto superponovaných bodů bylo možné mimo jiné vypočítat a graficky znázornit průměrný tvar stopy v souboru (e).

Soubor 62 stop psových šelem byl dále studován metodou tenkých ohebných plátků. Účelem této analýzy bylo prozkoumat vztah afinní a neafinní komponenty tvarové variability a zjistit jejich vzájemný podíl na pozorovaných otisknutých tvarech.

Vícerozměrná regresní analýza byla použita k prozkoumání rozdílů ve tvaru stop mezi skupinou otisků předních a zadních končetin. Vícerozměrná regresní analýza zkoumá vztah jedné nezávislé proměnné (prediktoru) a více než jedné závislé proměnné (tvarové proměnné). Za nezávislou proměnnou bylo zvoleno pořadí stopy. Stejně jako v předchozím případě byly do analyzovaného souboru zahrnuty pouze stopy čeledi psových. Výsledný soubor se skládal z 62 snímků, u kterých bylo předem známo, zda se jedná o stopy přední nebo zadní končetiny. Vliv lateralit na tvar byl potlačen podobně jako v předchozím případě. Stopy levé končetiny byly zrcadlově převráceny tak, aby stranově odpovídaly stopám pravé končetiny.

Na základě této proměnné byly vytvořeny 3 predikční modely: 1) predikční model pro odhad hodnot 18 dílčích varp (afinní komponenta byla vyloučena z analýzy), 2) predikční model pro odhad 18 dílčích varp a 2 hodnot afinní komponenty (celkem 20 závislých proměnných) a 3) predikční model pro odhad prokrústovských souřadnic 12 význačných bodů tvaru stopy (celkem 24 závislých proměnných). Data byla dále postoupena do analýzy relativních varp, která umožňuje prozkoumat charakter a rozsah největších tvarových změn v rámci zkoumaného souboru. Na souboru stop byly provedeny dvě analýzy. V první byl studován vztah tvarů stop na cihlách (zachovaných i rekonstruovaných, viz dále) a stop psových šelem. Do druhé analýzy byly vzájemné vztahy studovány pouze na stopách z cihel a stopách psů referenčního souboru.

Rekonstrukce tvaru stop

U 6 ze 7 částečně zachovaných stop byla zrekonstruována poloha chybějících význačných bodů tak, aby bylo možné srovnat tvary těchto stop s tvary v referenčním souboru stop psů a s volně žijícími psovými šelmami. Soubor 68 stop (61 psových, 1 kompletní stopa a 6 částečně zachovalých stop ze Sezimova Ústí) byl nejdříve standardizován prokrústovskou analýzou v programu *Morpheus et al.* (Slice 2002) takovým způsobem, že body neúplných konfigurací byly označeny jako chybějící („missing values“). Program *Morpheus et al.* je schopen zpracovat matice s chybějícími položkami standardizací tvarů v několika po sobě následujících krocích. Nejdříve jsou standardizovány všechny tvary, u kterých

je zachovaný kompletní počet význačných bodů. Poté jsou k nim postupně přidávány tvary s neúplným počtem a ty jsou standardizovány na základě té kombinace bodů, která je pro daný objekt známá. Vlastní rekonstrukci polohy význačných bodů jsme provedli s ohledem na hodnoty prokrústovských vzdáleností mezi podobnými tvary.

Statistické analýzy morfometrických dat byly počítány s podporou programů TPSRegr, TPSRelw (oba (Rohlf 1998), PAST 2.0 (Hammer *et al.* 2001), NTSYSpc 2.11f a Statistica 8.0 (Statsoft 2007).

Vizualizace výsledků

Grafické výstupy byly získány jako doprovodné výstupy analýzy tvaru a statistického zhodnocení v programech TPSRegr, TPSRelw a PAST 2.0.

Chyba metody

Chyba digitalizace byla vyčíslena na 10 stopách vybraných náhodně ze studovaného souboru. Pro každou z těchto stop byla opakovaně určena poloha 12 význačných bodů. Rozdíly mezi odpovídajícími tvary byly vyjádřeny pomocí prokrústovské vzdálenosti. Průměrná prokrústovská vzdálenost mezi tvary získanými opakovanou digitalizací stejných stop dosáhla hodnoty 0,041. Pro srovnání průměrná prokrústovská vzdálenost mezi různými tvary měla hodnotu 0,18.

VÝSLEDKY

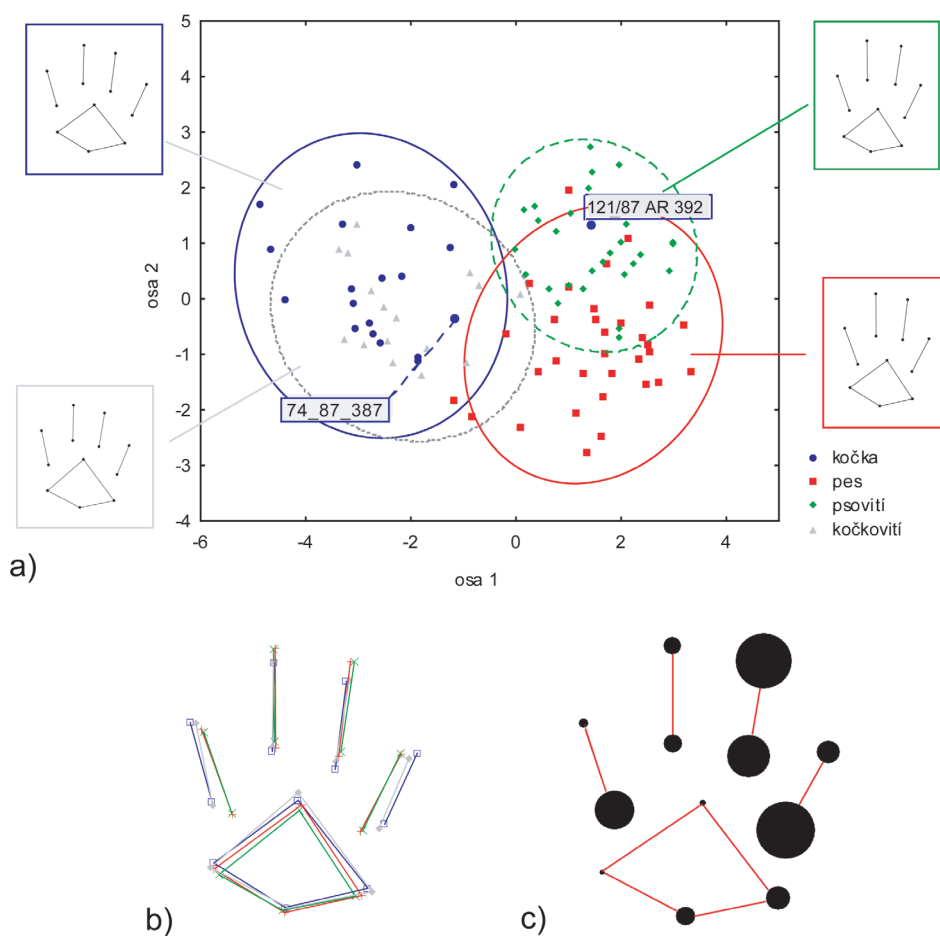
Rozdíly mezi taxonomickými skupinami tvaru stop

Neparametrická analýza rozptylu nepotvrdila statisticky významné rozdíly mezi psy a volně žijícími psovitými šelmami. Stejně tak nebyly zjištěny rozdíly mezi tvarem stop kočky domácí a druhy čeledi kočkovitých žijícími volně v přírodě. Testy pro ostatní kombinace (pes-kočka, psovítí-kočka, kočkovití-psovítí) ukázaly vždy statisticky významné rozdíly ve tvaru stop.

Podle výsledků kanonické analýzy stop první a druhá kanonická osa odčerpává 90% variability ve studovaném souboru, z čehož 77% variability je vysvětleno první kanonickou osou, zatímco druhá kanonická osa vysvětluje pouze 13% variability. Podobně jako neparametrická analýza rozptylu také kanonická analýza potvrdila tvarovou rozdílnost mezi stopami dvou studovaných čeledí: kočkovití (*Felidae*) i psovítí (*Canidae*) a relativní homogenitu mezi druhy uvnitř čeledí (Obr. 3). Variabilita stop psovitých šelem a tedy i rozdíly mezi volně žijícími druhy a domestikovanými psy je nepatrně větší než u kočkovitých. To však může být dáno počtem druhů zahrnutých v analýze.

Stopy na cihlách zařazené do analýzy (121/87 AR 392/1 a 74/87 AR 387) byly na základě aspektivního zhodnocení určeny jako stopy psů a koček. Na základě výsledků kanonické analýzy je patrné, že tyto stopy spadají svým tvarem do uvedených taxonomických skupin a je možné je tedy pozitivně identifikovat jako stopu psa a kočky.

Analýza dále ukázala, že tvarové rozdíly mezi jednotlivými skupinami jsou dány pouze přemístěním několika význačných bodů (body s čísly 2, 9, 10, 12, Obr. 2). To znamená, že rozdíly ve tvaru stop koček a psů jsou určeny polohou třetího a čtvrtého prstu vůči sobě i s ohledem na postavení ostatních prstů končetiny (Obr. 3c).

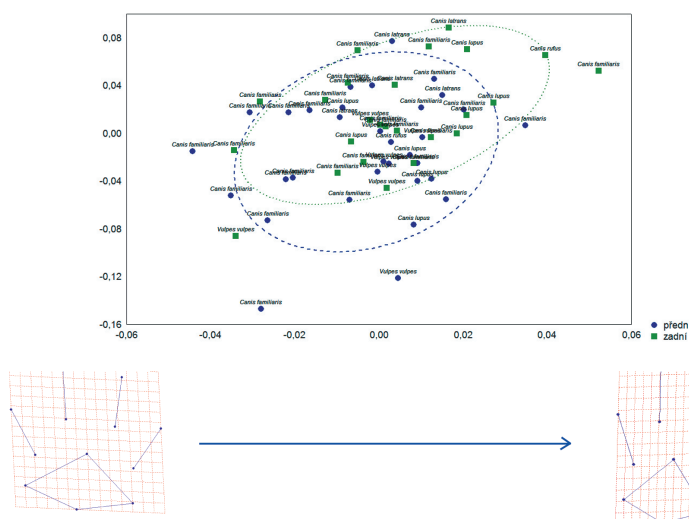


Obr. 3. Grafické výstupy kanonické analýzy tvarů stop. Bodový graf první a druhé kanonické osy s průměrnými tvary stop pro každou ze studovaných skupin (a). Superponované průměrné tvary pro 4 studované skupiny šelem (b). Schéma konfigurace význačných bodů, ve kterém průměr zobrazeného bodu určuje, jak moc daný bod přispívá k popisu tvarových změn v rámci první kanonické proměnné, která popisuje více než tři čtvrtiny celkové variability v rámci zkoumaného souboru (c).

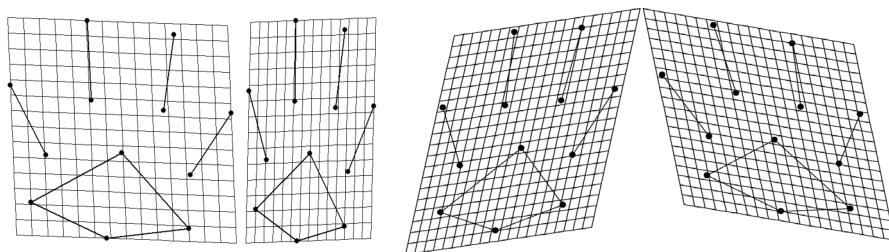
Podíl afinní a neafinní komponenty tvaru

U analyzovaného souboru stop vysvětluje afinní komponenta tvarové variability přibližně 30% tvarových rozdílů (Obr. 4). Komponenta popisuje rozdíly v délko-šířkových poměrech stopy (osa X) a také protichůdný posun vnitřních a vnějších bodů, kterými je stopa popsána (osa Y). Vzájemný šikmý posun bodů (stříhání) nesouvisí s pořadím končetiny ani s taxonomickým zařazením a je nejspíše důsledkem odchylek ve standardní pozici stopy na fotografii. Změny délky a šířky stopy je možné interpretovat s ohledem na postavení končetin. Stopy předních končetin nabývají spíše záporných hodnot, což odkazuje na celkově širší a kratší tvar. Naopak stopy zadních končetin nabývají na X ose převážně kladných hodnot a celkový tvar je spíše úzký a protáhlý (Obr. 5).

Neafinní komponenta, která je zastoupena hodnotami dílčích varp, vysvětluje zbývající část celkové variability, tedy přibližně 70%. Je odrazem druhových rozdílů, lokálních tvarových odlišností předních a zadních končetin a individuálních charakteristik jedinců v souboru.



Obr. 4. Bodový graf hodnot afinní komponenty tvarové změny. V grafu je uvedena taxonomická klasifikace stop a jsou odlišeny stopy předních a zadních končetin.



Obr. 5. Dva typy afinní změny tvaru pozorovaný v souboru stop čeledi psovitých.

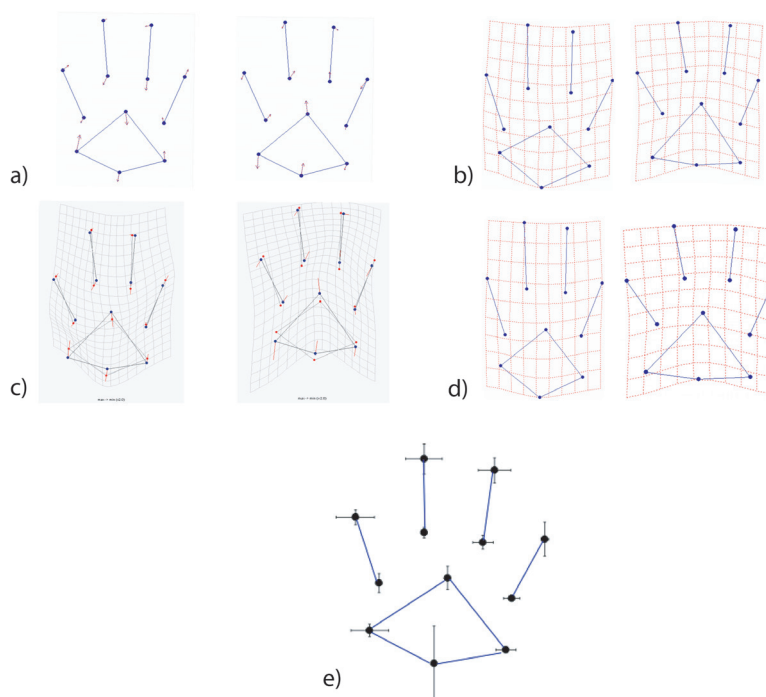
Vícerozměrná regresní analýza

Výsledky vícerozměrné regresní analýzy byly graficky znázorněny pomocí vektorů posunutí význačných bodů a pomocí deformační mřížky (Obr. 6). Jak je patrné, tvarové rozdíly mezi stopami předních a zadních stop jsou dány změnou tvaru metakarpálního, respektive metatarzálního bříška, přesněji pak posunem význačného bodu 6. U stop předních končetin se nejlaterálnější bod bříška posouvá dozadu a tvar bříška tak, jak jej zachycují 4 význačné body, nabývá tvaru trojúhelníka. Současně s tímto se prsty předních končetin radiálně rozbíhají. K největšímu posunu v tomto směru dochází v oblasti druhého prstu (význačné body 4 a 12). V přední i zadní části tak dochází k rozšiřování. U stop zadních končetin dochází k přesunu zadní části metatarzálního bříška dorzálně. Současně se laterální body posouvají ventrálně a prsty se sbíhají směrem ke střední ose celé stopy. Stopy zadních končetin se tak zužují a protahují.

Analýza relativních varp

Analýza tvaru stop psovitých šelem na středověkých cihlách ukázala, že hlavní tvarová variabilita v souboru je spojena se změnami celkové délky a šířky stopy a také se změnami proporcí mezi zastoupením otisku metakarpálního nebo metatarzálního bříška vůči celé ploše otisku (obr. 7). Stopy se v prostoru první a druhé relativní varpy, které vysvětlují dohromady 45% celkové variability (30% a 15%), seskupily do dvou skupin. Tyto skupiny jsou totožné s určením, zda se jedná o stopy přední nebo zadní končetiny. Z ostatních tvarových změn stojí za zmínku dvě stopy předních končetin lišky, které se tvarově výrazně liší od zbytku studovaného souboru.

V druhé analýze relativních varp, která zahrnovala výhradně soubor stop z cihel a recentních psů, jsou tvarové rozdíly popsány první relativní varpou téměř totožné s výsledky předchozí analýzy. Stejně jako



Obr. 6. Grafické výstupy vícerozměrné regresní analýzy pro predikci tvaru předních a zadních končetin. a, b) Rozdíly mezi stopami zadní (vlevo) a přední (vpravo) končetiny bez zakomponování afinní komponenty tvarové variability. Deformační mřížka a vektory posunutí zobrazují změny od průměrného tvaru $k \pm 5$ SD celkové variability ve zkoumaném souboru. c, d) Rozdíly mezi stopami zadní a přední končetiny získané predikčním modelem se zahrnutou afinní komponentou. Deformační mřížka a vektory posunutí zobrazují změny mezi stopami předních (modré body) a zadních (červené body) končetin. Zobrazené změny jsou dvakrát zesílené. e) Lokalizace a směr největších tvarových změn v rámci kartézské soustavy souřadnic mezi předními a zadními končetinami.

u analýzy stop více druhů vysvětluje první relativní varpa přibližně 30% celkové variability tvarů stop a popisuje tvarové změny odpovídající změnám poměru délky a šířky stopy. Druhá relativní varpa vysvětlující 14,5% z celkové variability je úzce spojená se změnami ve tvaru otisku metakarpálního (metatarzálního) bříška. V této tvarové změně tvoří skupina stop z cihel určené jako stopy zadních končetin, relativně samostatnou skupinu mimo rozsah hodnot recentních psů. Je otázkou, zda jsou tyto odlišnosti dány reálnými rozdíly ve tvaru stop, zda se jedná o důsledek matematické rekonstrukce stop, nebo zda jde o deformaci tvaru při výpalu. Pravdou je, že všechny tři stopy z cihel, které se nacházejí mimo rozsah hodnot získaných pro recentní psy, jsou neúplné a byly rekonstruovány na základě jen několika významných bodů. Je tedy pravděpodobné, že při otisknutí celé plochy končetiny nebo při lepších podmínkách zachování by se tyto stopy blížily více tvaru recentních psů.

Vícenásobná regresní analýza

Obrácením procesu predikce tvarových proměnných s pořadím otisknutých končetin (přední vs. zadní) jako nezávislé proměnné bylo možné prověřit správnost původního určení stop na základě vizuálního zhodnocení a anatomicko-morfologického srovnání. Predikční rovnice pro identifikaci stop předních a zadních končetin byly vytvořeny na základě 20 proměnných (18 dílčích varp a 2 afinních komponent) vícenásobnou regresní analýzou. Výsledný regresní model ($R=0,65$, $R^2=0,43$) správně určil 85% stop z referenčního souboru a byl následně použit na identifikaci 7 zrekonstruovaných stop ze Sezimova ústí. Výsledky potvrdily správné určení pořadí stopy u 5 stop. Pouze u stopy č. 2 na cihle 6 AR 42 se lišila identifikace na základě statistického modelu a morfoskopického hodnocení. Zatímco původní identifikace určila, že se jedná o stopu zadní končetiny, regresní model poskytl určení opačné. V případě této stopy mohlo dojít k nepřesnostem při rekonstrukci polohy chybějících bodů. Na stopě byla odhadnuta

poloha bodů 1, 2, 5, 6, 7. Tyto body definují tvar otisku třetího, čtvrtého prstu a metakarpálního/metatarzálního bříška, které byly určeny jako zásadní prvky při identifikaci pořadí končetin. Po bližším prozkoumání morfologických a metrických charakteristik je potřeba se přiklonit k původnímu určení stopy jako otisk zadní končetiny.

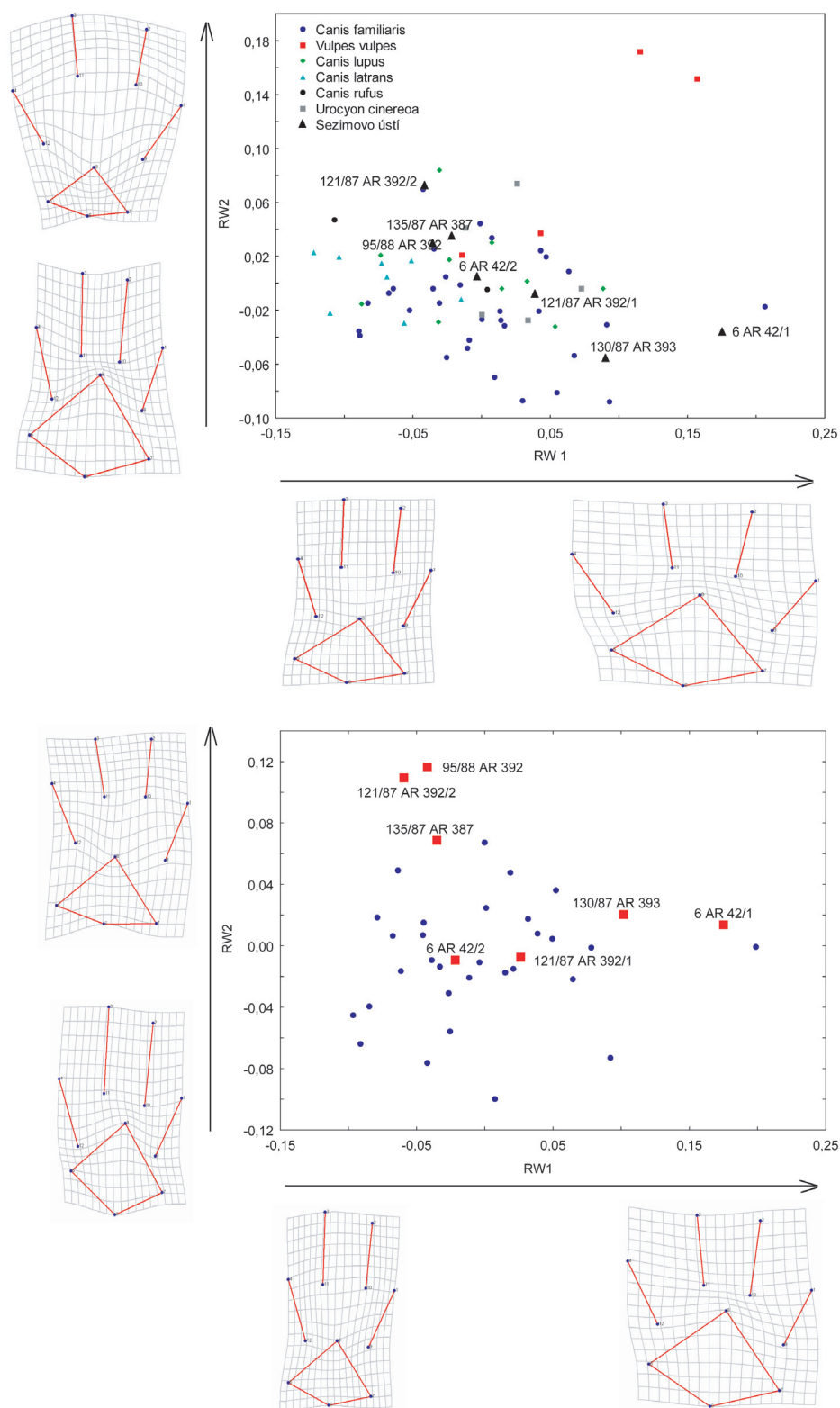
Analýza však umožnila blíže identifikovat stopu číslo 2 na cihle 121/87 AR 392, kterou nebylo možné určit na základě vizuálního hodnocení. Regresní analýzou byla tato stopa určena jako stopa zadní končetiny.

DISKUZE A ZÁVĚRY

Analýzy tvaru stop zachovaných na užitkové keramice ze Sezimova Ústí ukázaly, že během jejich výroby se otiskly domestikované šelmy nikoliv volně žijící druhy. Otisky na fragmentech stavební keramiky byly identifikovány jako stopy několika psů a pravděpodobně jedné kočky, které tvarem spadají do variability pozorované u současných psů a koček. Pomocí morfoskopického zhodnocení a analýzy tvaru bylo možné odlišit, zda se otiskly stopy předních nebo zadních končetin.

Z hlediska variability stop psovitých šelem je zajímavé, že afinní komponenta tvoří téměř třetinu tvarové variability morfometrických dat. Afinní a neafinní komponenta představují dvě základní složky tvarové variability. Afinní složka variability je spojena s nulovou deformační energií a je nejčastěji vyjádřením komplexních systémových změn, které postihují tvar jako celek. V případě mezidruhových a vnitrodruhových rozdílů ve tvaru stop šelem by se jednalo o strukturální změny v raných fázích vývoje končetiny, rozdílné postavení základních stavebních jednotek končetiny (např. rozdílná délka metakarpálních a metatarzálních kostí končetiny). Na druhé straně vysoký podíl afinní komponenty může být také důkazem systémové chyby v metodice výzkumu (např. nedodržení standardní pozice fotoaparát-stop, fotografická distorze apod.). Neafinní komponenta tvarové variability popisuje lokálněji situované změny tvaru závislé na nestejném přemístění význačných bodů v prostoru a její hodnoty odkazují na vnitroskupinovou a meziskupinovou variabilitu ve tvaru otisků šelem.

Z pohledu archeologie a antropologie může výzkum stop na užitkové keramice přinést nové informace o životě a práci našich předků. V případě zkoumané lokality to znamená, že výroba cihel probíhala za přítomnosti domestikovaných zvířat, kterým byl dovolen kontakt s čerstvě vytvořenými výrobky.



Obr. 8. Bodový graf první a druhé relativní varpy souboru stop z cihel a 6 druhů psovitých šelem (nahore), bodový graf první a druhé relativní varpy stop z cihel a referenčního souboru recentních psů.

CITOVANÁ LITERATURA

- Archer, W. – Braun, D.R. (2010): Variability in bifacial technology at Elandsfontein, Western cape, South Africa: a geometric morphometric approach. *Journal of Archaeological Science* 37 201 – 209.
- Buchanan, B. - Johnson, E. - Strauss, R.E. - Lewis, P.J (2007): A Morphometric Approach to Assessing Late Paleoindian Projectile Point Variability on the Sourthern High Plains. *Plains Anthropologist* 52: 279 – 299.
- Burian, V. (1969). Předběžná zpráva o historicko-archeologickém výzkumu na kartouze v Dolanech r. 1968. *Zprávy VÚ v Olomouci*, 144, 11-15.
- Cabrera, K.A. (2008): Animal Tracks, <http://www.bear-tracker.com/mammals.html>, 23.8.2008.
- Elbroch, M. (2003). *Mammal Tracks and Signs. A Guide to North American Species*: Stackpole Books.
- García, K.P. – Ortiz, J.C. – Vidal, M. – Rau, J.R. (2010): Morphometrics of the Track sof Puma concolor: Is It Possible to Differentiate the Sexes Using Measurements from Captive Animals? *Zoological Studies* 49/4: 577 – 582.
- Hagstrum, M.B. – Hildebrand, J. A. (1990): The Two-Curvature Method for Reconstructing Ceramic Morphology. *American Antiquity* 55/2: 388 – 403.
- Hammer, R. – Harper, D.A.T. – Ryan, P.D. (2001): PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4/1: 9 pp. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.
- Janál, J. (2002). Nálezy z hradu Křídlo v Hostýnských vrších. *Archeologie Moravy a Slezska*, 2: 66 – 72.
- Králík, M. – Urbanová, P. – Hložek, M. (2006): Trasologická analýza fragmentu cihly z předhradí lelekovického hradu. *Pravěk NŘ (Supplementum)* 15: 61–79.
- Králík, M. – Urbanová, P. – Hložek, M. (2008): Finger, Hand and Foot Imprints: The Evidence of Children on Archaeological Artifacts. In: L.H. Dommasnes, M.Wrigglesworth (eds.): *Children, Identity and the Past*, London, Cambridge, pp. 1 – 15.
- Leakey, M.D. – Hay, R.L. – Curtis, G.H. – Drake, R.E. – Jackes, M.K. (1976): Fossil hominids from the Laetolil Beds. *Nature* 262: 460 – 466.
- Little, J.A. – Schluchter, M.D. (1985): Maximum Likelihood Estimation for Mixed Continuous and Categorical Data with Missing Values. *Biometrika* 72/3: 497 – 512.
- Lycett, S. J. - Chauhan, P.R. (2010): Analytical Approaches to Palaeolithic Technologies: An Introduction. In: S. J. Lycett, P.R. Chauhan (eds.): *New Perspectives on Old Stones. Analytical Approaches to Paleolithic Technologies*, Springer Science+Business Media, LLC, pp. 1 – 22.
- Malina, J. – Vašíček, Z. (1990): *Archeology yesterday and today. The development of archeology in the science and humanities*. Cambridge University Press.
- McNulty, K.P. – Frost, S.R. – Strait, D.S. (2006): Examining affinities of the Taung child by developmental simulation. *Journal of Human Evolution* 51: 274 – 296.
- Mietto, P. – Avanzini, M. – Rolandi, G. (2003): Human footprints in Pleistocene volcanic ash. *Nature* 422: 133.
- Mitteroecker, P. – Gunz, P. (2009): Advances in Geometric Morphometrics. *Evolutionary Biology* 36: 235 – 247.
- Musil, J. (1997). Römische Ziegel. In L. Poláček (Ed.), *Römische Ziegel*.
- Nekuda, V. (1985). *Mstěnice 1 - Zaniklá středověká ves u Hrotovic: Hrádek - tvrz - dvůr - předsunutá opevnění*. Brno: Muzejní a vlastivědná společnost v Brně.

- Richter, M. – Krajíc, R. (2001): Sezimovo Ústí, archeologie středověkého poddanského města 2. Levobřežní předměstí - archeologický výzkum 1962-1988. Praha - Sezimovo Ústí - Tábor.
- Rohlf, F.J. (1998): TPS series, version 1.369. N.Y.: State Univ. at Stony Brook.
- Rohlf, F. J. (2005): tpsDig, digitize landmarks and outlines, version 2.05. Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook.
- Rodrigues, L.A – dos Santos, V.F. (2004): Sauropod Tracks – a geometric morphometric study. In: A.M. Elewa (ed.): Morphometrics. Applications in Biology and Paleontology. Springer, pp. 129 – 139.
- Saragusti, I. - Karasik, A. - Sharon, I. - Smilansky, U. (2005): Quantitative analysis of shape attributes based on contours and section profiles in archaeological research. *Journal of Archaeological Science* 32, 841 – 853.
- Saragusti, I. – Sharon, I. (1998): Quantitative Analysis of the Symmetry of Artefacts: Lower Paleolithic Handaxes. *Journal of Archaeological Science* 25: 817 – 825.
- Sharpe, K. – Van Gelder, L. (2006): Evidence for cave marking by Palaeolithic children. *Antiquity* 80/310: 937 – 947.
- Slice, D. (2002): Morphueus et al., beta version morphometric analysis software.
- Stokes, D. – Stokes, L. (1986): A guide to animal tracking and behaviour. Litte, Brown and Company, New York, USA.

Kapitola 6

Analýza tvarové podobnosti drobné středověké plastiky pomocí 3-D modelů

ÚVOD

Drobné hrnčířské plastiky patří do skupiny archeologických nálezů, které umožňují blížeji nahlédnout do materiálního a duchovního života společnosti vrcholného středověku. Vysvětlení funkce těchto drobných předmětů osciluje mezi určením jako dětská hračka, nebo, a to platí zejména pro lidskou figurální plastiku, jako předmět náboženského charakteru, votivní soška. Nejčastěji se v archeologických nálezech objevuje lidská figurální plastika zastoupená různými druhy panenek, madonek či "mnišků". Plastiku zvířecí pak představují zejména koničci; spojením obou vzniká oblíbená plastika jezdecká v podobě různých forem koníčků s jezdcí. Podstatně méně se objevuje znázornění jiných zvířat, jelenů, srnců, zajíců, psů, vlků, lišek, kterých bylo potřeba při hře na lov a honitbu (Meier 2006).

Původ drobné plastiky lze vysledovat v keramické výrobě německy mluvících zemí (Bavorsko, Sasko) na přelomu 12. a 13. století. Odtud se výroba rozšířila do okolních zemí střední Evropy (Čechy, Morava, Slovensko, Maďarsko). Chronologicky lze figurky nalézt po celé období středověku a raného novověku. Figurální lidskou plastiku z moravských nálezů je možné rozdělit do několika typů (Měchurová 1988), jež byly vyráběny analogickou technologií. Do první skupiny spadají ženské sošky s vlnovkovitým vnutím čepce, límce a oválným obličejem a se zjevným postupem výroby pomocí jednostranné formy. Přestože figurky z této skupiny tvoří morfologicky konzistentní skupinu, mezi dosud nalezenými plastikami nebyla identifikována žádná identická figurka pocházející z jedné formy. Poměrně značná podobnost je zřejmá i u obličejové části druhého typu figurek, který se vyznačuje jemně modelovanými obličejí s realistickými rysy. Tělo figurek nebývá příliš pečlivě tvarováno, pouze obličej je propracován detailně, což naznačuje výrobní postup otisknutím do formy. Obdobné tvary obličejů lze vysledovat i u třetího typu figurek, které jsou charakteristické stylizovanými tvářemi s kulatými očima, silným nosem a širokými rty.

Zavedením trojrozměrného modelování a 3D vizualizace movitých i nemovitých nálezů získala archeologie bezesporu výraznou pomoc pro dokumentaci a formální popis tvarové a velikostně variabilních objektů. Záznam terénních situací (Lambers *et al.* 2007) nebo artefaktů (Grosman *et al.* 2008, Mara 2009) pomo-

cí digitálních technologií umožňuje eliminovat subjektivní vklad dokumentátora. Získaný počítačový model je možné bezprostředně využít pro záznam exaktních dat a jejich další analýzu. Na rozdíl od fotografické dokumentace umožňují trojrozměrné modely zhodnotit předmět v libovolné orientaci nebo úhlu pohledu. Využití trojrozměrných modelů se neomezuje pouze na analytické postupy. Virtuální modely působí jako výstavní exponáty, reprezentační materiály nebo výukové pomůcky (Chhem *et al.* 2006). I přes zřetelné výhody jsou trojrozměrné metody stále limitovány finanční náročností hardwaru, softwaru a v neposlední řadě i komplikovaností postupů, kterými lze modely zkoumat z hlediska jejich morfologické variability. Jednu z možných metod explorace 3D dat založenou na trojrozměrných virtuálních modelech představuje geometrická morfometrie.

Při studiu podobnosti tvarů trojrozměrných modelů se nabízí několik postupů. Nejjednodušší metodou je vzájemná superpozice dvou 3D modelů ve virtuálním prostoru. Tento postup je nicméně omezen pouze na srovnání vždy jen jedné dvojice a jde pouze o aspektivní srovnání, které neposkytne žádný číselný výstup, jež by dokazoval vzájemnou podobnost nebo rozdílnost tvarů. Alternativní přístup nabízí metody kvantitativní analýzy tvaru. V případě trojrozměrných prostorových dat jde však o postup relativně komplikovaný, vyžadující znalosti pokročilé geometrie (Gunz *et al.* 2005). Analýza dvourozměrných prostorových dat je postupem teoreticky i prakticky jednodušším a převod 3D na 2D data je rutinně praktikován pro biologické objekty i pro artefakty (Saragusti *et al.* 2005).

Na počátku této studie stála snaha vyřešit spor týkající se podobnosti dvou středověkých figurek (Obr. 1 a, b). Míra podobnosti jejich obličejových partií vyvolala dohady o tom, zda při výrobě figurek nebyla použita shodná forma. Tradiční aspektivní srovnání tento spor nevyřešil, proto bylo rozhodnuto, že obličejové části figurek budou srovnány metodami trojrozměrného záznamu povrchových dat a analýzy tvaru. Současně byl do analýzy zahrnut soubor figurek shromážděných z dalších moravských lokalit. Cílem analýzy bylo prozkoumat tvarovou podobnost obličejů figurek s možností identifikace shodného použití tvarové formy při výrobě figurek. Ověřena měla být metodika kvantitativní analýzy tvaru na účelově vybraných předmětech dochovaných v úplnosti i částečně poškozených exemplářích.

MATERIÁL A METODY

K analýze tvarové podobnosti bylo vybráno šest keramických figurek. Tři plastiky patří mezi plastiky s jemně modelovanými obličejí s realistickými anatomickými rysy (figurky č. 1-2 a pravděpodobně č. 3) a další tři byly zařazeny do skupiny plastik se stylizovanými tvářemi s kulatými očima, silnýmnosem a širokými rty (figurky č. 4-6). Figurky byly dochovány v různém stavu, podmínkou jejich zařazení do analýzy byla alespoň částečná identifikace obličejové části (Obr. 1).

Obličejové části figurek byly digitalizovány pomocí ručního laserového skeneru MicroScan 3D v kombinaci s ramenovým digitizérem MicroScribe G2XL. Oba přístroje tvoří funkční celek, který je schopen převést prostorovou informaci o morfologii objektu do podoby trojrozměrného počítačového modelu. Celý proces se skládá z několika na sebe navazujících kroků. Pohybem laserového paprsku po povrchu objektu jsou nejdříve vytvořeny prvotní hrubé skeny zaznamenávající tvar z různých pohledů. Tyto dílčí partie byly složeny do jednoho celistvého skenu na základě čtyř referenčních bodů a následně rozloženy na mrak bodů, aby byly nakonec opět pospojovány do tzv. polygonů. Polygony tvoří základní stavební prvek výsledného trojrozměrného tzv. polygonálního modelu. Jejich velikost a počet určuje přesnost, s jakou byl původní fyzický objekt převeden do virtuální podoby. Skenováním obličejových částí figurek byly vytvořeny reprezentativní počítačové modely, jež obsahovaly od 60 000 do 800 000 polygonů.

Již předchozí práce poukázaly na skutečnost, že při převodu objektu do prostředí počítače mohou vznikat drobné odchylky mezi skeny stejných částí povrchu artefaktu (Sholts *et al.* 2010). Jsou dány zejména různými nastavením skeneru nebo podmínkami skenovacího procesu (světelné podmínky a jejich stabilita, rozptyl paprsku aj.). Pro zmírnění dopadu těchto odchylek na analýzu tvaru byla každá figurka naskenovaná nejméně dvakrát. Také během převodu syrových skenů do výsledného polygonálního modelu dochází ke vzniku



Obr. 1. a) figurka 1 - torzo jezdce sedícího na koni, b) figurka 2 - torzo odlomené v úrovni pasu (obě Brno „Velký špalíček“ - Mečová 2 a Dominikánská ulice č. 1-7), c) vlevo figurka 4 - kompletní postava ve splývavém rouchu s kápí a rukama sepjatýma na prsou (Měchurová 1988, Hoffmann 1996) (Újezd nad Rokytnou), vpravo figurka 6 - odlomená obličejová část (hrad Obřany), d) figurka 3 - torzo odlomené v úrovni pasu. Figurka je silně abradovaná včetně obličejové části, základní proporce zobrazované postavy zůstaly zachovány (viz Nekuda - Unger 1981) (Újezd u Tišnova, část Horních Louček, kopec zvaný Hrádek), e) figurka 5 - silně otřelá celá figurka z jemné světlé hlíny s žlutohnědou polevou.

„uměle vytvořené“ morfologické variability mezi virtuálními modely. Použitím různých nástrojů pro úpravu velikosti a povrchu modelů (např. redukce počtu bodů, vyhlazení povrchu, odstranění nepatřičných bodů atd.), bylo i zde pro každou figurku získáno několik více či méně odlišných modelů.

Záznam vstupních dat

Srovnání podobností tvaru obličejů bylo provedeno na vertikálních a horizontálních řezech trojrozměrnými modely. Při úpravě vstupních dat byly modelem vedeny 2 řezné roviny. První procházela střední (medi-osagitální) rovinou obličeje figurky (vertikální řezy), druhá rovina, kolmá na předchozí, protínala obličej figurky transversálně ve výšce špičky nosu (horizontální řezy). Průnik roviny a polygonálního modelu poskytl požadovanou křivku. Celkem bylo ze šesti zkoumaných figurek (43 různých trojrozměrných modelů) získáno 41 horizontálních a 43 vertikálních křivek. Extrahované kontinuální křivky byly poté rozděleny konstantním počtem pravidelně rozmístěných bodů: 31 bodů pro vertikální řezy a 30 bodů pro horizontální řezy. Trojrozměrné kartézské souřadnice těchto bodů byly konvertovány na dvojrozměrná data tak, že byly nejdříve shodně ustaveny do roviny definované osami X a Y a poté byla konstantní Z-souřadnice u každého z bodů odstraněna. Takto získaná dvourozměrná data se stala vstupními daty pro navazující analýzu podobnosti. Pro vytvoření a manipulaci s modely a křivkami byly použity programy MicroScan Tools a Rhinoceros 4.0, SR4.

Analýza tvaru

Tvarové proměnné byly získány metodou klouzavých pomocných bodů a metodou tenkých ohebných plátek s následujícím technickým nastavením: kritériem pro klouzání pomocných bodů byla zvolena hodnota deformační energie, všechny body křivky s výjimkou dvou koncových bodů byly zahnuty do procesu klouzání, uniformní komponenta byla odhadnuta na základě regrese podle Booksteina a Rohlf (2003), velikost křivek byla standardizována na základě hodnot velikosti centroidu.

Na základě tohoto nastavení byla pro každou skupinu dat (tj. odděleně pro horizontální a vertikální křivky) vypočítána matice prokrústovských vzdáleností.

Statistické zpracování

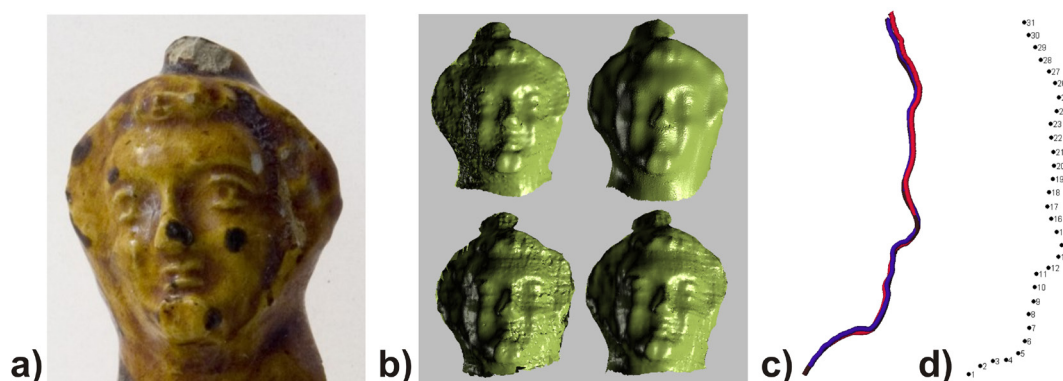
Na získanou matici jsem byla aplikována shlukovací analýza se shlukovacím pravidlem nevážených skupinových průměrů (anglicky *unweighted pair-group method, arithmetic average* – UPGMA).

V další fázi byly obě sady dat zkombinovány do parciální analýzy nejmenších čtverců (anglicky *partial least squares* – PLS). Parciální analýza nejmenších čtverců studuje vztah mezi dvěma nezávislými datovými soubory. Datové soubory se mohou lišit počtem vstupních proměnných (např. bodů), tvarem, který popisují i metodikou jejich záznamu. Zde byly vstupními daty analýzy nejmenších čtverců hodnoty dílčích varp horizontálních křivek (N=27) a hodnoty dílčích varp vertikálních křivek (N=28). Celkový počet studovaných tvarů byl snižen na konečných 39 křivek, aby si vertikální a horizontální křivky u jednotlivých modelů figurek přesně odpovídaly. Výsledkem jsou nové proměnné, které představují lineární kombinace obou skupin vstupních proměnných. Počet proměnných je volitelný. Pro každou sadu dat získány dvě PLS proměnné (tj. celkem čtyři proměnné).

Při analýze horizontálních i vertikálních křivek byly použity programy TPS Relw, TPS Spline a NTSYSpc 2.21b.

Vizualizace výsledků

Výsledky statických testů byly doplněny grafickými výstupy. Především interpretace proměnných analýzy nejmenších čtverců by bez vizualizace, které dokreslují tvarové změny spojené s danou osou, nebyla možná. Rekonstrukce tvaru o dané hodnotě proměnné, respektive o daných hodnotách dílčích varp, vyžadovala sestavení vícerozměrného modelu pro určení hodnot kartézských souřadnic. Tento model byl sestaven na základě vícerozměrné vícenásobné lineární regrese. Grafické výstupy byly připraveny s pomocí programu Morpheus *et al.* (Slice 2002).

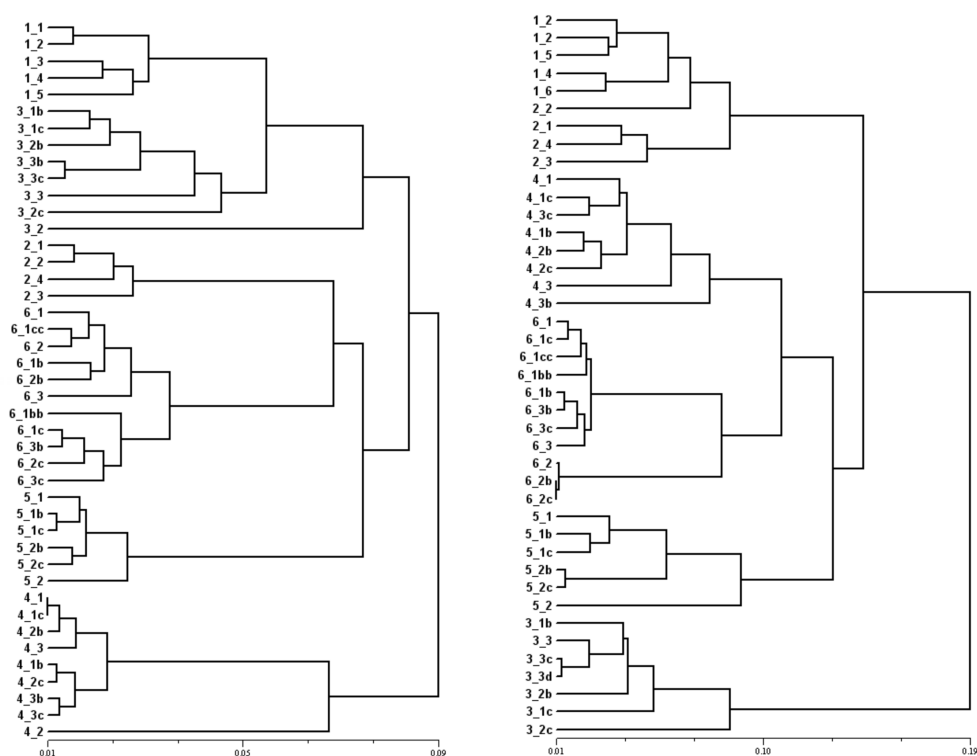


Obr. 2. Postup při získávání prostorových dat popisujících tvar obličejů figurek: a) originální figurka, b) virtuální 3D modely v různém rozlišení a s různým stupněm vyhlazení, c) sada křivek získaná vertikálními řezy virtuálními modely, d) jedna z křivek rozdělená na mrak bodů.

VÝSLEDKY

Shlukovací analýza

Z dendrogramů (Obr. 3) shlukovací analýzy vypočítané na hodnotách tvarových proměnných je patrné, že žádná z technických úprav modelů neměla významnější vliv na výsledný tvar analyzované křivky. Tvary se v případě horizontálních i vertikálních křivek shlukují primárně podle příslušnosti k figurce. Teprve až delší ramena dendrogramů odhalují vzájemnou tvarovou podobnost figurek, při čemž v případě vertikálního řezu figurkou projevují vzájemnou afinitu figurky 1 a 3, figurky 2 a 6 a do určité míry se dá říci, že k nim patří i figurka 5. Figurka 4 se naopak ve vertikálním řezu zcela odlišuje od ostatních tvarů. Horizontální řez ukázal podobnosti mezi figurkami 1 a 2. U figurky 4 a 6 a vzdáleně i figurky 5 je naznačena určitá podobnost. Samostatně pak stojí figurka 3.

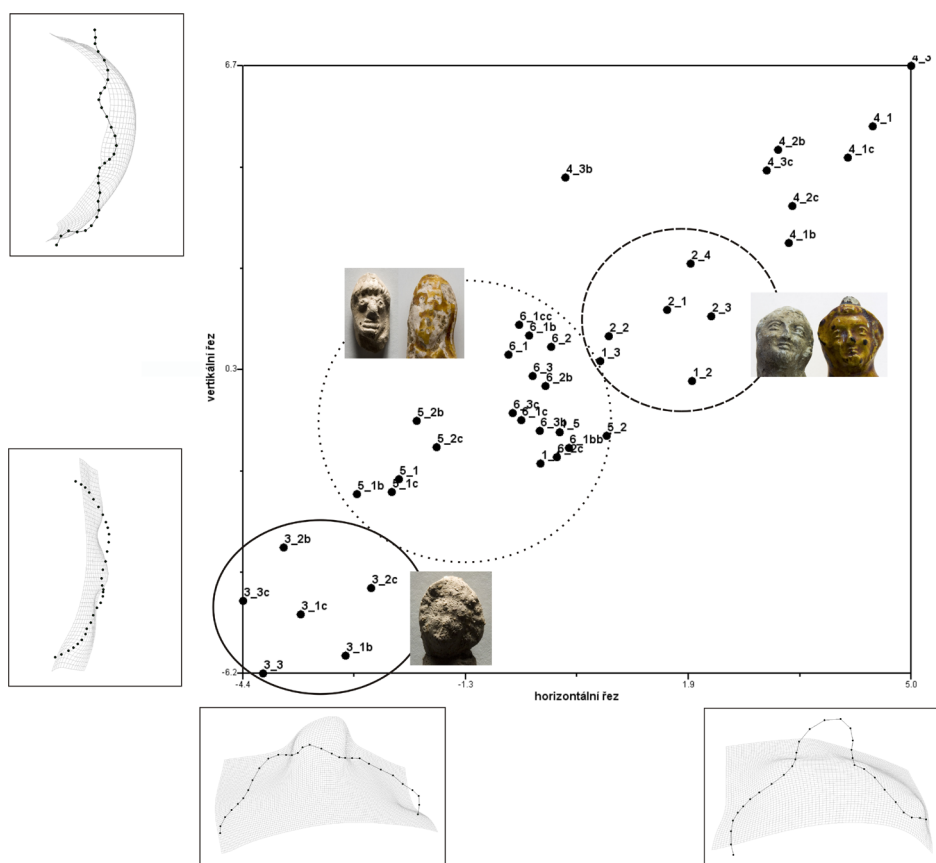


Obr. 3. Dendrogramy shlukovací analýzy tvarové analýzy vertikálních (vlevo) a horizontálních (vpravo) křivek.

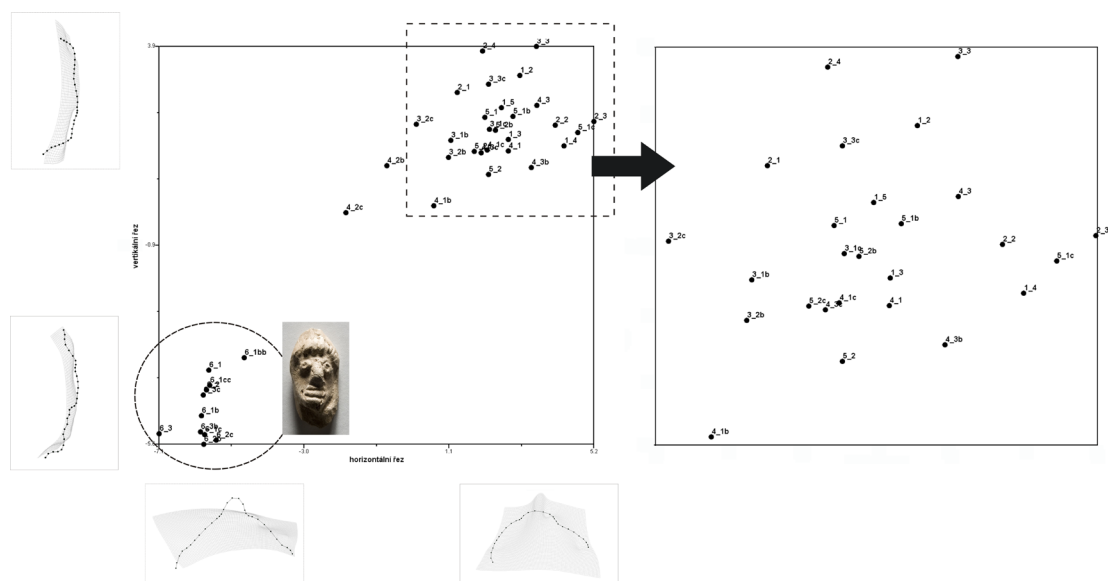
Parciální analýza nejmenších čtverců

Kombinace tvarů do jediné analýzy poskytla konkrétnější obraz o vzájemné tvarové podobnosti figurek. Analýza jednoznačně oddělila figurku č. 6 od všech ostatních tvarů. Také figurka 4 se odlišuje. Naopak figurky 1 a 2 tvoří v prostoru nových proměnných dvojici. Podobně, i když v menší míře, se párují také figurky 3 a 5.

Oddělení tvaru figurky 6 lze vysvětlit na základě tvarových změn, které jsou s osami nových proměnných spojené. Obě první proměnné popisují zvýraznění nebo naopak potlačení dominantních partií obličeje, jako je nos, ústa, brada (Obr. 4). V kladných hodnotách se nacházejí figurky s vlnkovitým profilem. V záporných hodnotách se tvar křivek naopak zaobljuje a přechod mezi částmi profilu je plynulejší. Výrazná je horní polovina křivky zahrnující oblast čela. Naopak spodní část v oblasti brady ustupuje. Také obě druhé proměnné obou tvarů zachycují míru vykreslení tvaru (Obr. 4). Vzájemná silná pozitivní závislost obou proměnných ($R=0,912$, $p<0,05$) odkazuje na skutečnost, že tvary se zápornými hodnotami vertikálního řezu budou současně nabývat záporných hodnot v horizontálním řezu a *vice versa*.



Obr. 4. Rozmístění tvarů obličejů figurek v prostoru prvních kanonických proměnných horizontálního a vertikálního řezu virtuálními modely figurek. Podél os jsou znázorněny tvary, které dané proměnné popisují v záporných a kladných hodnotách.



Obr. 5. Vlevo je znázorněno rozmístění tvarů obličejů figurek v prostoru druhých kanonických proměnných horizontálního a vertikálního řezu virtuálními modely figurek. Podél os jsou znázorněny tvary, které dané proměnné popisují v záporných a kladných hodnotách. Vpravo je zobrazen výřez pro detailnější pohled na tvarovou podobnost figurek.

DISKUZE A ZÁVĚRY

Vizuální hodnocení patří k tradičním postupům při studiu tvarově podobných předmětů v humanitních, ale i přírodních vědách. Tento aspektivní přístup je zajisté jednoduchý, přístrojově a technicky nenáročný a především levný. Pro studium archeologických či jiných artefaktů však bývá zatížen řadou nedostatků. Především spoléhá na schopnosti vlastního hodnotitele, jeho všímavost, erudici a předchozích zkušenosti. Na straně druhé aspektivní hodnocení tvaru je omezeno individuálně specifickými fyziologickými vlastnostmi lidského oka i kognitivními schopnostmi mozku, které často nedovolují rozpoznat jemné nuance tvarových rozdílů mezi zdánlivě stejnými objekty (Todd 2004).

Prvotní vizuální porovnání obličejů sledovaných plastik přineslo hrubý přehled o míře podobnosti mezi studovanými objekty. Shodné rozměry a obdobná morfologie figurek 1 a 2 patrně *a prima vista* naznačovaly, že by při vzniku mohla být použita identická výrobní forma, anebo přinejmenším shodná výrobní technologie. Obdobnou vnější podobnost danou především charakteristicky zvýrazněnými znaky obličejů: kulaté oči, silný nos a široké rty jsme našli u plastiky 4 a 6. O možné identitě forem zde bylo zbytečné uvažovat, protože figurky měly rozdílné proporce obličejů. Proto pokud bychom vytvářeli typologii plastik, obě dvojice bychom zařadili do samostatných kategorií. Naopak u figurek 3 a 5 bylo určení „typu“ nebo podobnosti s ostatními figurkami ztíženo špatným stavem zachovalosti. Figurky jsou silně otřelé a výrazná abraze detailů obličejů brání posouzení právě těch typologicky významných charakteristik obličejů, které charakterizují předchozí skupiny. V těchto případech mohou pomoci kvantitativní postupy analýzy tvaru a vícerozměrné statistiky.

Kvantitativní analýza tvaru s použitím trojrozměrných modelů je v porovnání s jinými postupy metoda relativně pracná, metodicky náročná, ale také objektivní a sofistikovaná, která může doplnit a upřesnit tradiční vizuální porovnání a plně nahradit postupy založené na měření vzdáleností či úhlu. K analýze tvaru obličejů figurek lze přistupovat podobně jako ke studiu skutečných lidských obličejů, kde jsou úspěšně používány metody s lineárními rozměry (Hunter, Garn 1972), eliptickou Fourierovou analýzou (Lu 1965, Tangchaitrong *et al.* 2000) i analýzy význačných bodů (Bulygina *et al.* 2006, Evison *et al.* 2010). Analýza tvaru, jak byla představena v této studii, v podstatě působí podobně jako biometrické systémy při rozpoznávání určitých typů obličejů v bezpečnostních systémech (Woodward *et al.* 2003).

Popis tvaru založený na metodě pomocných klouzavých bodů potvrdil zřetelnou podobnost figurek 1 a 2 v horizontálním řezu, ale již menší podobnost ve vertikálním řezu figurkou. Vyřešen tak byl spor o shodné výrobní formě, který studii inicioval. Každá z figurek má unikátní morfologii a při výrobě žádných dvou ze sledovaných artefaktů byla použita shodná forma. Naopak se potvrdila užitečnost analýzy tvaru při klasifikaci figurek, u kterých bylo vizuální hodnocení limitováno jejich otřelostí. Vertikální řez ukázal na afinitu obličejů 1 a 3. Také numerický popis je stejně jako typologie ovlivněn mírou zachovalosti tvaru, ale výsledky analýzy potvrdily, že použitá metoda je natolik citlivá, že pokud byl úbytek materiálu v zásadě rovnoměrný po celé ploše obličejů, vzájemnou podobnost figurek bylo stále možné zachytit. Stejným případem snížené výpovědní hodnoty vlivem vysokého stupně abraze byla plastika 5.

Vlastní výsledky prostorové analýzy ukázaly, že ani opakované skenování nebo různé postupy pro vytváření a úpravy trojrozměrných modelů nepřekryjí reálné tvarové rozdíly mezi objekty s prostorově komplikovaným povrchem. Využití prezenzované metodiky by bylo beze zbytku možné zejména u jednodušších tvarů, než je obličej středověkých figurek, např. u profilů nádob.

CITOVANÁ LITERATURA

- Bulygina, E. – Mitteroecker, P. – Aiello, L. (2006): Ontogeny of Facial Dimorphism and Patterns of Individual Development Within One Human Population. *American Journal of Physical Anthropology* 131:432 – 443.
- Evison, M. – Dryden, I. – Fieller, N. – Mallett, X. – Morecroft, L. – Schofield, D. – Bruegge, R. V. (2010): Key Parameters of Face Shape Variation in 3D in a Large Sample. *Journal of Forensic Sciences* 55/1: 159 – 162.
- Grosman, L. – Smikt, O. – Smilansky, U. (2008): On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts. *Journal of Archaeological Science* 35: 3101 – 3110.
- Gunz, P. – Mitteroecker, P. – Bookstein, F.L. (2005): Semilandmarks in Three Dimensions. In: D. Slice (ed.): *Modern Morphometrics in Physical Anthropology, Volume V: Developments in Primatology: Progress and Prospects*. New York: Kluwer Academic Press: 73 – 98.
- Hoffmann, V. 1996: *Allerley kurtzweil – Mittelalterliche und frühneuzeitliche Spielzeugfunde aus Sachsen. Arbeits- und Forschungsberichte zur sächsischen Bodenkmalpflege, Band 38, Landesamt für Archäologie Dresden*, 127 – 200.
- Lambers, K. - Eisenbeiss, H. - Sauerbier, M. - Kupferschmidt, D. - Gaisecker, T. - Sotoodeh, S. - Hanusch, T. (2007): Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *Journal of Archaeological Science* 34: 1702 – 1712.
- Lu, K.H. (1965): Harmonic Analysis of the Human Face. *Biometrics* 21: 491 – 505.
- Meier, F. (2006): *Mit Kind und Kegel. Kindheit und Familie im Wandel der Geschichte*. Stuttgart.
- Měchurová, Z. (1988): Drobná středověká plastika ve sbírkách Moravského muzea v Brně. *Acta musei Moraviae - Časopis Moravského muzea LXXIII, Scientiae sociales*, 71 – 76.
- Nekuda, V. – Unger, J. (1981): *Hrádky a tvrže na Moravě*. Brno.
- Saragusti, I. - Karasik, A. - Sharon, I. - Smilansky, U. (2005): Quantitative analysis of shape attributes based on contours and section profiles in archaeological research. *Journal of Archaeological Science* 32: 841 – 853.
- Sholts, S.B. – Wärmländer, S. K.T.S. – Flores, L.M. – Miller, K.W.P. – Walker, P. L. (2010): Variation in the Measurement of Cranial Volume and Surface Area Using 3D Laser Scanning Technology. *Journal of Forensic Sciences* 55/4: 871 – 877.
- Slice, D. (2002): *Morpheus et al., beta version morphometric analysis software*.
- Todd, J.T. (2004): The visual perception of 3D shape. *Trends in Cognitive Sciences* 8/3: 115 – 121.
- Tangchaitrong K. - Messer, L.B. - Thomas, C.D.L. - Townsend, G.C. (2000): Fourier Analysis of Facial Profiles of Young Twins. *American Journal of Physical Anthropology* 113: 369 – 379.
- Woodward, J.D. – Orlans, N.M. – Higgins, P.T. (2003): *Biometrics*. The McGraw-Hill Companies, Inc.

Kapitola 7

Kvantitativní popis tvaru římských nádob pomocí metod geometrické morfometrie

ÚVOD

Keramické nádoby podobně jako produkty lidské činnosti představují v archeologickém kontextu hmotný důkaz chování a života jejich tvůrců. Formální popis tvaru je jedním ze základních kroků studia keramiky v archeologii. Tvar určuje základní klasifikaci nádoby, její funkci, je indikátorem chronologických změn, technologie, místa výroby nebo důkazem kontaktu etnický či kulturně odlišných skupin. V humanitních vědách tradičně převládá typologický přístup studia tvaru a tvarové variability, který rozděluje empiricky pozorované spektrum tvarů do intuitivně vytvořených diskrétních skupin (např. Ericson, Sticke 1973, Zeman 1961). Takový přístup maximalizuje meziskupinové rozdíly a zcela ignoruje variabilitu tvaru nádob uvnitř uměle vytvořené kategorie. Současně klade vysoké nároky na zkušenosti a čas potřebný k hledání paralel a podobností mezi tvary. Nádstavbou typologie jsou bodovací systémy, kterými je tvar nádoby rozložen na nezávisle hodnocené komponenty. Tyto metodické nástroje jsou však obvykle „šité na míru“ konkrétní časoprostorově vyhraněné skupině nádob a v širším kontextu studia archeologické keramiky postrádají obecnější využití. Kvantitativní postupy v popisu tvaru keramiky využívají tradiční postupy vyžadující základní úroveň matematických znalostí. Nejčastěji jsou měřeny základní rozměry, jako je výška, šířka, průměr nebo objem nádoby (Ericson, Sticke 1973). Složitější postupy operují s parametry zakřivení, symetrie nebo pravidelnost vyjádřené matematickými funkcemi, kartézskými nebo polárními souřadnicemi bodů na obryse, indexy (a) symetrie a jinými matematickými prostředky (Hagstrum, Hildebrand 1990, Saragusti *et al.* 2005, Gilboa *et al.* 2004). Těmito způsoby jsou popisovány tvary celých nádob, tvary příčných řezů i kontury promítnuté na zvolenou rovinu.

Studie využívající kvantitativní analýzu tvaru nemá v archeologii příliš početné zastoupení. Z pohledu metod pokročilé analýzy tvaru brání bezproblémovému použití při kvantifikaci tvaru v archeologii čtyři překážky dané vlastnostmi artefaktů a jejich stavem v době nálezů. Za prvé na předmětech (nádoby, nástroje, zbraně) obvykle nenajdeme dostatečné množství význačných bodů, což degraduje tvarovou variabilitu na

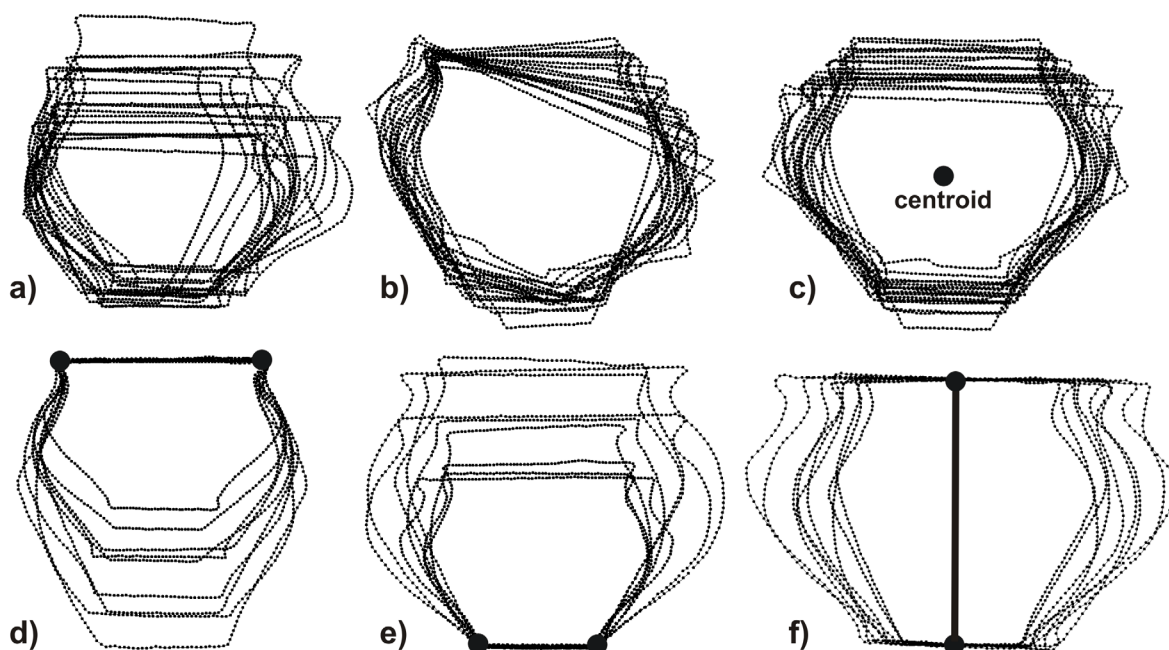
geometricky jednoduché tvarové rozdíly zachycené jen několika základními body. V případě nádob lze za význačné body považovat místo uchycení ucha nádoby nebo místa největšího zakřivení těla nádoby. U tvarů, které jsou výsledkem lidské činnosti, však mohou být tato místa velmi variabilní anebo se mohou měnit pod vlivem opotřebování předmětu (Buchanan 2006, Buchanan, Collard 2010). Ztěžuje to jejich přesnou definici a současně narušuje předpoklad vzájemné homologie mezi zkoumanými objekty. Za druhé rozdíly mezi tvary lidských výrobků převyšují variabilitu, kterou nalézáme u živých organismů a která je určena zákonitostmi živé přírody. Biologické tvary se koncentrují v malé části Kendallova prostoru tvarových proměnných (Zelditch *et al.* 2004). U uměle vytvořených tvarů nemusí být tato vlastnost nutně dodržena. Proto i v případech, kde je možné definovat dostatečné množství význačných bodů, které zachytí tvar v požadovaném rozsahu, tvarová různorodost předmětů může ovlivnit vztahy mezi prostorem tvarových proměnných a tangenciálním prostorem. Za třetí, nádoba má tři základní části dna, výduť a hrdlo. Toto rozdělení může být striktně formální a definice bodů na základě tohoto rozdělení nemusí brát v úvahu tvarové souvislosti. Posledním, zcela pragmatickým, problémem podobně jako u většiny popisných systémů, ať už kvantitativních nebo kvalitativních, zůstává zachovalost popisovaného materiálu. Ve většině případů jsou keramických nádob nalézány ve zlomcích, u kterých mnohdy není zcela jasné, k jaké části nádoby náleží. Vedle přítomnosti neúplných tvarů tak analýzu ztěžuje nejasná korespondence srovnávaných fragmentů.

Z nabídky metod analýzy tvaru jsou v archeologii upřednostňovány metody, které nevyžadují striktně definované body. V jazyce geomerické morfometrie to znamená, že jsou využívány metody 2D analýzy obrysů nebo pomocných bodů. Tyto metody jsou použitelné na projekce objektu na rovinu (obvykle frontální rovinu), které v těchto projekcích tvoří uzavřenou konturu (Obr. 2b) nebo na řezy předmětem (Obr. 2a). Najdeme však i studie, které využívají trojrozměrná prostorová data (Clarkson 2010, Lycett *et al.* 2006, Archer, Braun 2010). První pokusy o kvantitativní popis tvaru archeologických artefaktů je spojen se samotnými počátky pokročilých metod analýzy tvaru. Gero a Mazzullo (1984) poukázali na užitečnost klasické Fourierovy analýzy při popisu uzavřených nepravidelných tvarů v archeologii. Asi největšímu zájmu se geometrická morfometrie těší při popisu tvarových rozdílů kamenné a kostěnné industrie. S pomocí prokrústovské analýzy (Buchanan, Collard 2010), analýzy vlastních tvarů (Costa 2010) nebo eliptické Fourierovy analýzy (Ioviță 2010) byly popsány tvary nástrojů staršího i mladšího paleolitu (Costa 2010) nebo postup jejich opotřebování (Ioviță 2010).

Následující analýza je ukázkovým příkladem kvantitativního popisu keramiky pomocí metod geometrické morfometrie. Na souboru funerální keramiky z mladší a pozdní doby římské z lokality Kostelec na Hané jsou představeny čtyři odlišné techniky, které přepisují vizuální informaci o tvaru keramické nádoby nebo její části do numerického vyjádření. Použita byla eliptická Fourierova analýza, analýza klouzavých pomocných bodů a prokrústovská analýza v kombinaci s analýzou hlavních komponent. Cílem studie bylo navzájem konfrontovat metodické postupy a současně je srovnat s typologickým systémem, který byl na stejném souboru nádob ustaven v 60. letech minulého století (Zeman 1961). Tento konkrétní soubor nádob byl již předmětem studia osídlení a pohřbívání na lokalitě v mladší a pozdní době římské (Vachútová 2010), zde byla však srovnávána pouze užitečnost deskriptivních a analytických nástrojů analýzy tvaru při studiu konkrétní archeologické keramiky. Nebyla testována žádná konkrétní hypotéza týkající se lokality nebo výroby hrncířské výroby v době římské.

MATERIÁL A METODY

Studovaný materiál pocházel z lokality Kostelec na Hané poloha „Prostřední pololány“. Jedná se o rozsáhlé žárové pohřebiště z mladší a pozdní doby římské (2. – 4. století n. l.), ze kterého pochází dosud největší soubor celých a rekonstruovaných tvarů domácí keramiky na Moravě (Vachútová 2010), ačkoliv v současnosti je k dispozici pouze redukovaný počet nádob. V této studii byl zkoumán soubor čítající 67 nádob. Tvar celých nádob nebo jejich profilů byl popsán na základě fotografických snímků ve frontální pozici a kreseb, u kterých byl naznačen profil nádoby. Každá fotografie nebo kresba byla naskenována na stolním skeneru ScanMaker 9800XL, Microtek při rozlišení 600 dpi. Získané snímky byly převedeny z barevných RGB



Obr. 1. Ukázka standardizačních postupů obrysů nádob: a) bez standardizace, b) standardizace prokrústovskou analýzou, c) superpozice obrysů bez standardizace otočení, d) standardizace na základnu shodnou s krajními body hrdla, e) body dna, f) středy dna a hrdla nádoby.

snímků na dichromatické snímky stupně šedi, uloženy v nekomprimovaném formátu TIFF (*Tagged Image File Format*) a následně upraveny v programu Adobe Photoshop CS tak, aby představovaly pouze černé siluety studovaných tvarů.

Záznam vstupních dat

Vstupní data ve formě kartézských souřadnic bodů rozmístěných po obvodu fotografie nebo kresby nádoby byla získána pomocí programu TPS Dig. 2.0. Celé nádoby byly popsány souborem 200 pravidelně rozmístěných bodů (Obr. 2c) a 46 pomocných bodů rozmístěných na okraji siluety nádoby (Obr. 2g). Čtyři z těchto bodů byly konstantně umístěny na okraji dna a hrdla nádoby. Tvar profilu nádoby na kresbě byl zachycen 50 pomocnými body (Obr. 2f).

Analýza tvaru

Tvar každé celé nádoby byl popsán eliptickou Fourierovou analýzou (konfigurace 200 bodů) a metoda klouzavých pomocných bodů (konfigurace 46 bodů) v kombinaci s metodou tenkých ohebných plátek. Profily nádob byly kvantifikovány pouze kombinací metod klouzavých pomocných bodů a tenkých ohebných plátek. Při výpočtu eliptické Fourierovy analýzy byl počet harmonických proměnných nastaven na hodnotu 20. Standardizace tvarů byla nastavena na základě polohy dna nádoby. Tento krok předpokládal otočení tvarů o úhel, který svírá spojnice bodů dna nádoby s osou X katertézského systému souřadnic. Za počátek popisu tvaru byl zvolen bod v horním levém rohu okraje hrdla nádoby. Velikost byla standardizována na základě obsahu, který vymezuje obrys nádoby. Ve výsledku byly získány hodnoty 80 Fourierových koeficientů a dvou konstant.

Nastavení „klouzání“ pomocných bodů bylo následující: kritériem pro ukončení klouzání byla hodnota deformační energie, maximální počet interakcí byl nastaven na hodnotu 3, velikost byla standardizována na základě hodnoty velikosti centroidu. V případě celých nádob byly z procesu klouzání vyloučeny krajní body

hrdla a dna nádoby. Všechny body však byly zahrnuty ve vlastním výpočtu tvarových proměnných. U analýzy profilů nádob nebyl žádný z bodů vyloučen z klouzání. Prokrústovkové souřadnice byly dále postoupeny do analýzy tenkých ohebných plátek, která poskytla hodnoty hlavních a dílčích varp.

Vedle analýzy tenkých ohebných plátek byly hodnoty prokrústovkových souřadnic postoupeny přímo analýze hlavních komponent bez mezistupně analýzy tenkých ohebných plátek.

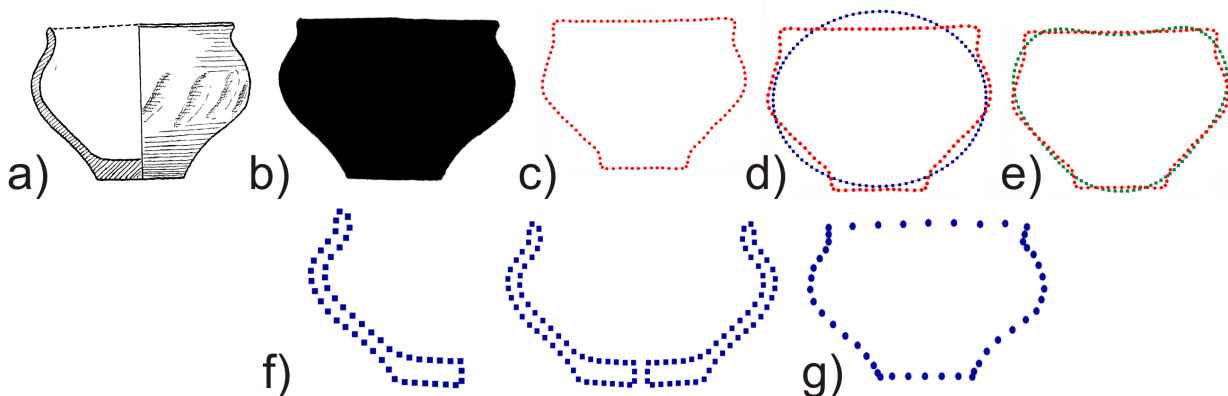
Statistické zpracování

Získané tvarové proměnné byly postoupeny do analýzy hlavních komponent počítané na základě kovarianční matice a do analýzy relativních varp. Efektivita hlavních komponent byla určena s ohledem na Jolliffeho hraniční hodnoty (Jolliffe 1986). Výsledky pro jednotlivé metodické postupy byly srovnány analýza nejbližšího souseda (*nearest-neighbor analysis*, Davis 1986). Tato metoda hodnotí prostorovou distribuci bodů a jejich tendenci tvořit shluky. Skutečná pozorovaná distribuce bodů je testována proti náhodné Poissonově distribuci bodů. Výstupem analýzy je hodnota parametru R daná vztahem $R = D/d$, kde d je průměrná pozorovaná vzdálenost a D je průměrná očekávaná vzdálenost daná Poissonovým rozložením uvnitř vymezené oblasti. Hodnoty tohoto parametru se pohybují v rozsahu od 0 (body se překrývají) po 1 (náhodné rozmístění bodů) až po 2,15 (nenáhodná nadměrná disperze bodů). Vstupními daty pro vzájemné srovnání byly hodnoty prvních dvou hlavních komponent nebo relativních varp. Rozdíly v absolutních hodnotách proměnných byly standardizovány převodem na relativní hodnoty vydělením průměrnou euklidovskou vzdáleností mezi body v dané kombinaci proměnných.

Při výpočtu tvarových proměnných i statistických testů byly použity programy TPSRelw (Rohlf 2001), SHAPE 1.3 (Iwata, Ukai 2002), NTSYSpc 2.11 a PAST 2.4.

Vizualizace výsledků

Při vizualizaci výsledků byly použity grafické nástroje v programech TPSRelw (Rohlf 2001), SHAPE 1.3 (Iwata, Ukai 2002) a NTSYSpc 2.11.



Obr. 2. Schéma kvantitativní analýzy tvaru na základě různých vstupních dat. a) Horní řada: dekompozice původního tvaru nádoby a b) její siluety do c) kartézských souřadnic 200 bodů rozložených rovnoměrně podél obrysu a dále d) do hodnot první harmonické proměnné a e) aditivního účinku prvních pěti harmonických proměnných. Spodní řada: f) profil nádoby vyjádřený 50 pravidelně rozmístěnými body pro aplikaci metody klouzavých pomocných bodů a zrcadlově doplněný tvar celé nádoby, g) tvar nádoby vyjádřený 46 pomocnými body po aplikaci standardizačního pravidla (metody klouzavých pomocných bodů).

Srovnání analýzy tvaru a typologie nádob

Pokladem srovnání kvantitativního a kvalitativního přístupu k popisu tvaru byl typologický systém římských nádob vytvořený Zemanem v roce 1961. Systém rozlišuje 5 základních typů nádob (A, B, C, D, M), z nichž dvě jsou dále rozděleny na podtypy (Tab. 1). Výskyt typů ve zkoumaném souboru nádob je uveden v tabulce 2. Vztah mezi typem nádoby s hodnotami tvarových proměnných byl určen hodnotou Pearsonova korelačního koeficientu. Rozdíly hodnot tvarových proměnných mezi skupinami byly testovány vícerozměrnou analýzou rozptylu. Předpoklady k analýze z pohledu homogenity rozptylů byly prověřeny Levenovým testem. Pro určení statisticky významných rozdílů mezi typy byl vybrán Tukeyho test studentizovaného rozsahu (HSD). Statistické testy byly počítány v programu STATISTICA 9.0 na 5% hladině významnosti.

Typ podle Zemana (1961)		Podtyp podle Zemana (1961)	
A	hrncovité tvary	A1	hrncovité se zataženým okrajem
		A2	hrncovité s ven vyhnutým okrajem
B	mísovitě tvary	B1	mísovitě – terinovitě nádoby typ I
		B2	mísovitě – terinovitě nádoby typ II
		B3	mísovitě – cizí keramická skupina
		B4	mísovitě – se šikmými žlábkami na výduti
		B5	mísovitě – slabě profilované nádoby na nožce
C	kónické		
D	keramika na kruhu		
M	miniaturní nádoba		

Tabulka 1. Typologický systém římských nádob podle Zemana (1961).

Typ	A	A1	A2	B	B1	B2	B3	B4	B5	C	D
N	18	4	14	46	12	11	13	5	5	1	2

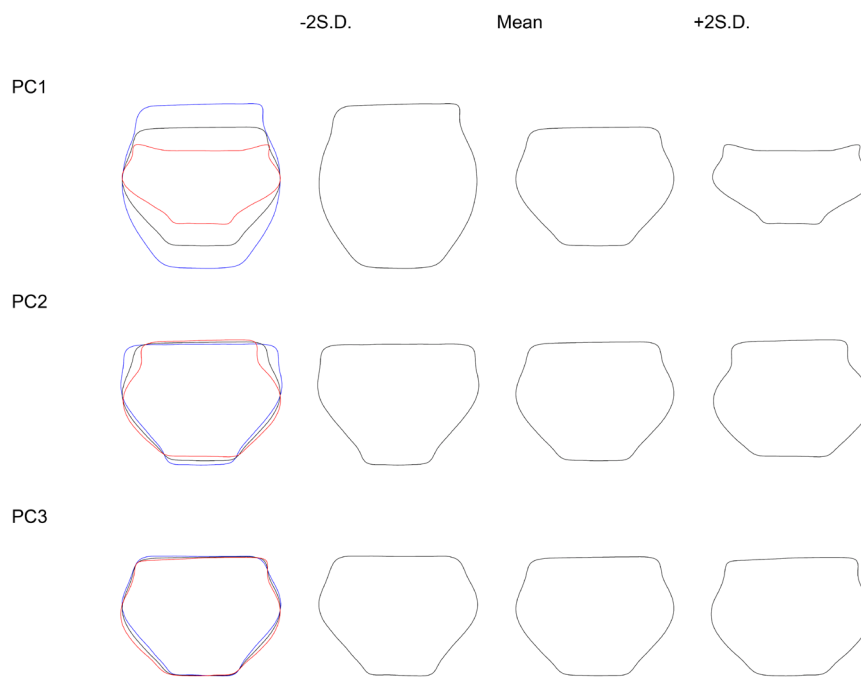
Tabulka 2. Zastoupení typů podle Zemana (1961) ve studovaném souboru.

VÝSLEDKY

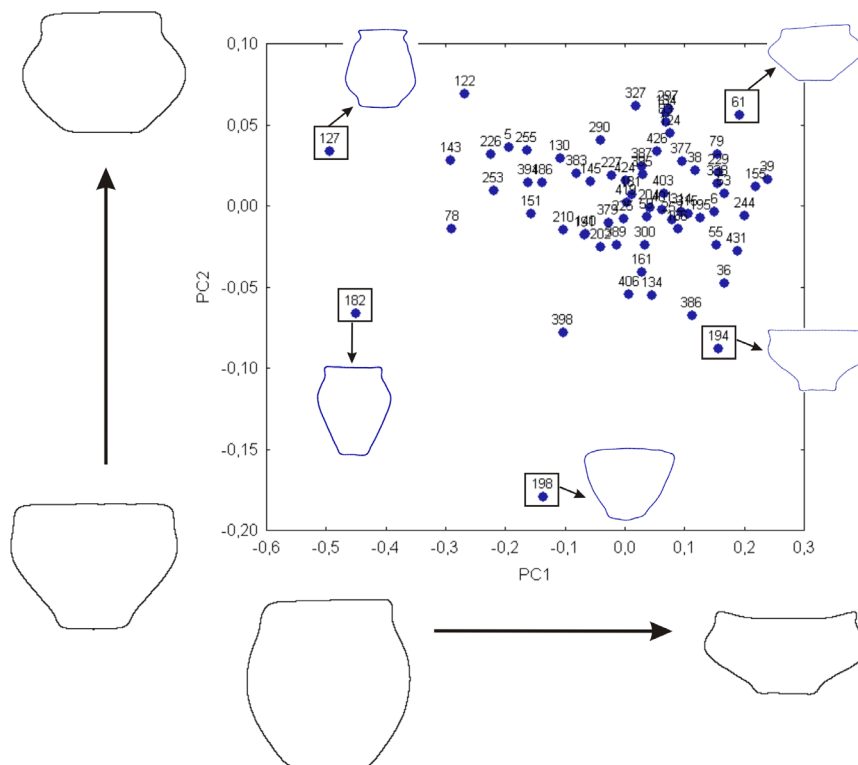
Analýza celých tvarů pomocí eliptické Fourierovy analýzy

Z celkového počtu 80 Fourierových koeficientů, kterými byl popsán tvar každé nádoby, byla analýzou hlavních komponent získána sada 5 efektivních komponent, které popisují více než 96% celkové variability ve studovaném souboru. Hlavní tvarové změny jsou soustředěny do prvních tří hlavních komponent (celkem 93% variability). První komponenta (84,7% variability) odráží výškošírkové rozdíly mezi nádobami, záporná skóre odkazují na vysoké nádoby, zatímco kladné hodnoty popisují nízké široké mísy. Druhá a třetí komponenta popisují již subtilnější tvarové odlišnosti spojené s poměrem šířky dna a hrdla (PC2, 5,1%) a celkovou konvexností nádoby (PC3, 3,3%) (Obr. 3).

Tvarům nádob, které se liší od zbytku nádob v souboru, byly přiřazeny extrémní hodnoty první a druhé hlavní komponenty. Jednalo se především o dvě vysoké nádoby z hrobů 127 a 182 a dále kónická miska z hrobu 198 (Obr. 4). Jak naznačuje shluk tvořených ostatními nádobami v souboru, tvary jsou charakteristické relativní konzistencí a jejich společným znakem je převaha šířky nádoby nad její výškou a dále šířkou horní části nádoby, která převyšuje velikost dna a spodní části.



Obr. 3. Grafická vizualizace výstupů analýzy hlavních komponent Fourierových koeficientů. Zobrazen je průměrný tvar ve studovaném souboru a dále tvary, které odpovídají minimálním a maximálním hodnotám ($\pm 2SD$) prvních tří hlavních komponent.



Obr. 4. Variabilita tvarů nádob ve studovaném souboru vyjádřena hodnotami první a druhé hlavní komponenty získané analýzou Fourierových koeficientů eliptické Fourierovy analýzy (celkem 89% variability). Graf je doplněn tvarovými změnami, které souvisí s danou hlavní komponentou (tvary podél os) a skutečnými tvary vybraných nádob (miniatury uvnitř grafu), které se tvarově odlišují od nejčtenějších tvarů. Čísla v grafu odpovídají číslům hrobů na lokalitě.

Analyza celých tvarů pomocí klouzavých pomocných bodů a tenkých ohebných plátků

Metoda klouzavých pomocných bodů a tenkých ohebných plátků aplikovaná na skupinu nádob shodnou s předchozí eliptické Fourierovy analýzy poskytla téměř shodné výsledky, ačkoliv charakter vstupních data se lišil. Analýza opět vyčlenila nádoby, které se od zbytku souboru liší a na základě svého tvaru nejsou typickými zástupci funerální keramiky na lokalitě (hroby 127 a 182). Obě první dvě relativní varpy ($PC1=72\%$, $PC2=12,4\%$ celkové variability) popisují tvarové změny shodné s výstupy Fourierovy analýzy (pouze orientace os je opačná). Zřetelnou odlišností od výsledků Fourierovy analýzy je větší rozptyl hodnot uvnitř oblaku nejčastějších tvarů nádob a tím menší vzdálenost od extrémních tvarů (Obr. 5).

Analyza celých tvarů pomocí analýzy pomocných bodů bez „klouzání“

Prokrústovské souřadnice studované analýzou hlavních komponent poskytly hodnoty 7 efektivních komponent, jež dohromady vysvětlují 95,4% z celkové variability dat. Shodně s předchozími analýzami se v prostoru první (42,5% variability) a druhé (36,4% variability) hlavní komponenty nádoby z hrobů 127 a 182 nacházejí mimo hlavní skupinu tvarů (Obr. 6). Toto oddělení nádoby z hrobu 182 je však nejvíce patrné v prostoru první s třetí hlavní komponentou (7,8% variability) (Obr. 7). Analýza však výrazně oddělila ještě další tvary a to nádoby z hrobů 78, 198 a 134.

Analyza profilů pomocí metod klouzavých pomocných bodů

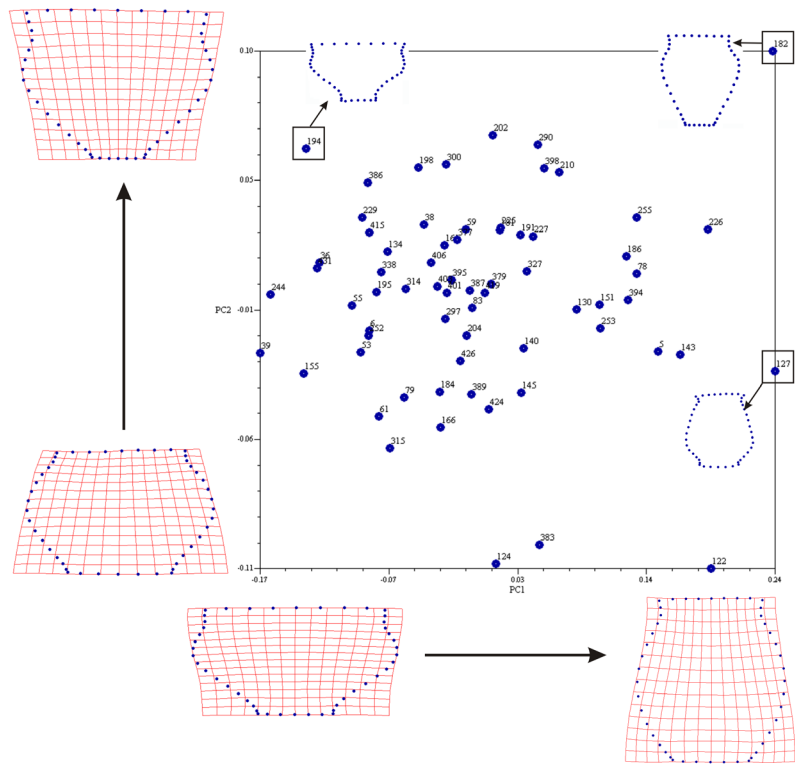
Podobně jako v předchozích případech, také analýza profilů nádob dokázala ze souboru analyzovaných tvarů vyčlenit ojedinělé extrémní tvary. Prvních sedm efektivních komponent popisovalo přibližně 94% celkové variability v souboru. Na rozdíl od analýzy celých tvarů je podíl variability, který nese první hlavní komponenta výrazně nižší ($PC1$, 35%). Přibližně stejný podíl odráží také hodnoty druhé komponenty ($PC2$, 32%). Jak je zřetelné z grafického znázornění tvarových změn podél os komponent (Obr. 8), výškošířkové rozdíly, které byly patrné z analýzy celých tvarů, se u analýzy profilů nepatrně ztrácejí. V pozici hlavní tvarové změny v souboru je nahradila míra zakřivení/přímosti stěny nádoby, především její spodní části. Variabilita uvnitř souboru proti analýze celých tvarů se zvýšila. To by nemělo být překvapením, protože vedle tvaru celé nádoby (v podstatě polovina nádoby) jsou do popisu zahrnuty také odlišnosti v tloušťce a tvaru profilu nádoby.

Prostorová distribuce tvarů

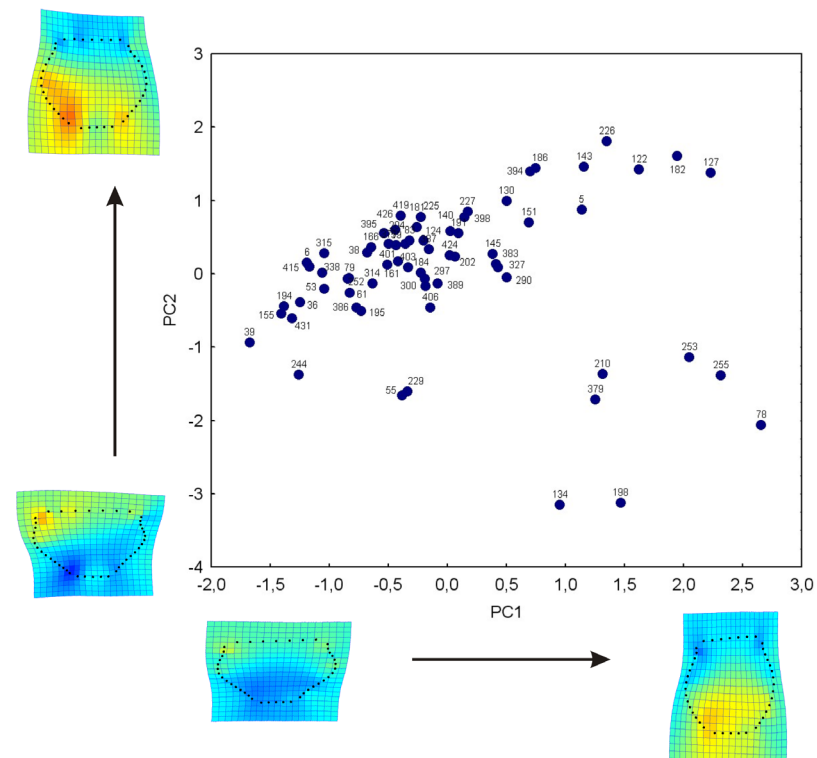
Výsledky analýzy nejbližšího souseda jsou uvedeny v tabulce 3. Největší hustota bodů byla zjištěna v případě výsledků z eliptické Fourierovy analýzy, následovaná analýzou hlavních komponent. Nejmenší hustotu bodů v prostoru prvních dvou hlavních komponent (zde relativních varp) vykazovala analýza tenkých ohebných plátků. Opačný trend byl pozorován v hodnotách průměrné vzdálenosti mezi tvary, jež byla největší u analýzy tenkých ohebných plátků, následovaná těsně eliptickou Fourierovou analýzou. Nejmenší průměrná vzdálenost mezi body byla zjištěna pro analýzu hlavních komponent. Hodnoty parametru R se pohybují okolo hodnoty 1. U eliptické Fourierovy analýzy a analýzy hlavních komponent překračují hodnotu 1, u analýzy tenkých ohebných plátků dosahuje hodnoty 0,8. Tyto výsledky naznačují, že tvary v prvních dvou komponentách nevytváří shluky. Naopak hodnoty vyšší než jedna naznačují přítomnost nezvykle častých ojedinělých tvarů.

	<i>průměrná pozorovaná vzdálenost</i>	<i>průměrná očekávaná vzdálenost</i>	<i>průměrná hustota</i>	<i>R</i>
eliptická Fourierova analýza	0,019	0,017	824	1,12
analýza tenkých ohebných plátků	0,020	0,019	649	1,14
analýza hlavních komponent	0,015	0,018	694	0,80

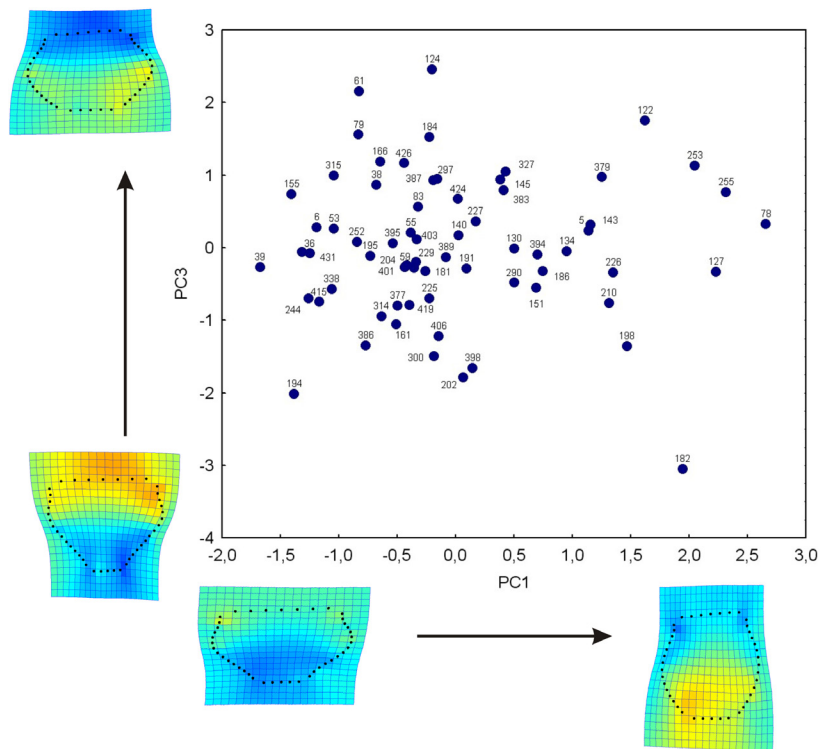
Tabulka 3. Srovnání kvantitativního popisu tvaru pomocí parametrů metody nejbližšího souseda.



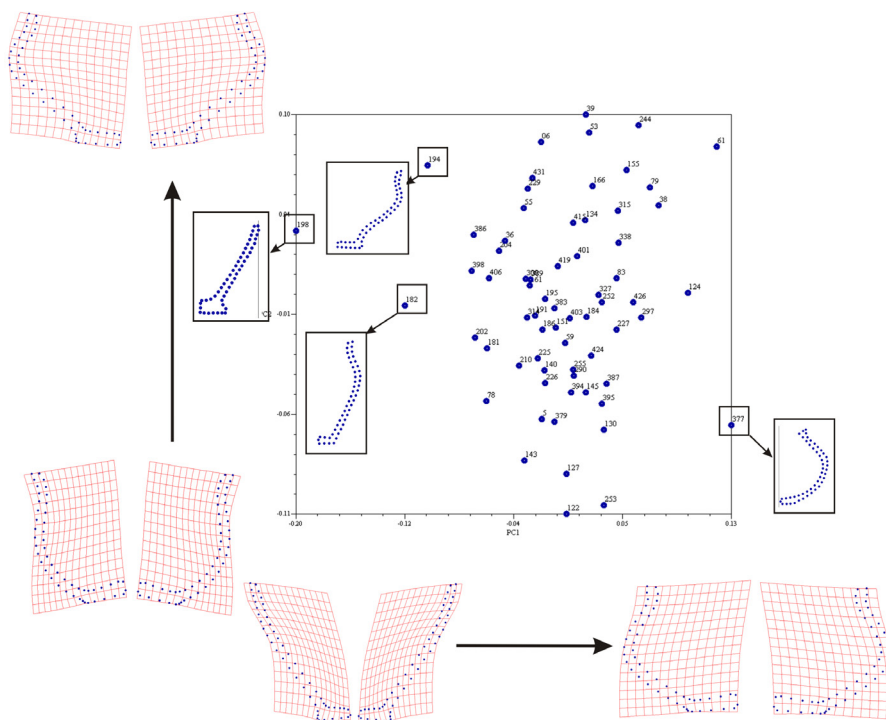
Obr. 5. Variabilita tvarů nádob ve studovaném souboru vyjádřena hodnotami první a druhé hlavní komponenty získané analýzou tvarových proměnných metody klouzavých pomocných bodů a tenkých ohebných plátek (celkem 84% variability). Graf je doplněn tvarovými změnami, které souvisí s danou hlavní komponentou (tvary podél os) a skutečnými tvary vybraných nádob (miniatury uvnitř grafu), které se tvarově odlišují od nejčtenějších tvarů. Čísla v grafu odpovídají číslům hrobů na lokalitě.



Obr. 6. Variabilita tvarů nádob ve studovaném souboru vyjádřena hodnotami první a druhé hlavní komponenty získané analýzou tvarových proměnných metody pomocných bodů bez „klouzání“.



Obr. 7. Variabilita tvarů nádob ve studovaném souboru vyjádřena hodnotami první a třetí hlavní komponenty získané analýzou tvarových proměnných metody pomocných bodů bez „klouzání“.



Obr. 8. Variabilita tvarů profilů nádob ve studovaném souboru vyjádřena hodnotami první a druhé hlavní komponenty získané analýzou tvarových proměnných metody klouzavých pomocných bodů a tenkých ohebných plátek (celkem 67% variability). Graf je doplněn tvarovými změnami, které souvisí s danou hlavní komponentou (a skutečnými tvary vybraných nádob (miniatury uvnitř grafu), které se tvarově odlišují od nejčtenějších tvarů. Čísla v grafu odpovídají číslům hrobů na lokalitě.

Srovnání analýzy tvaru a typologie nádob

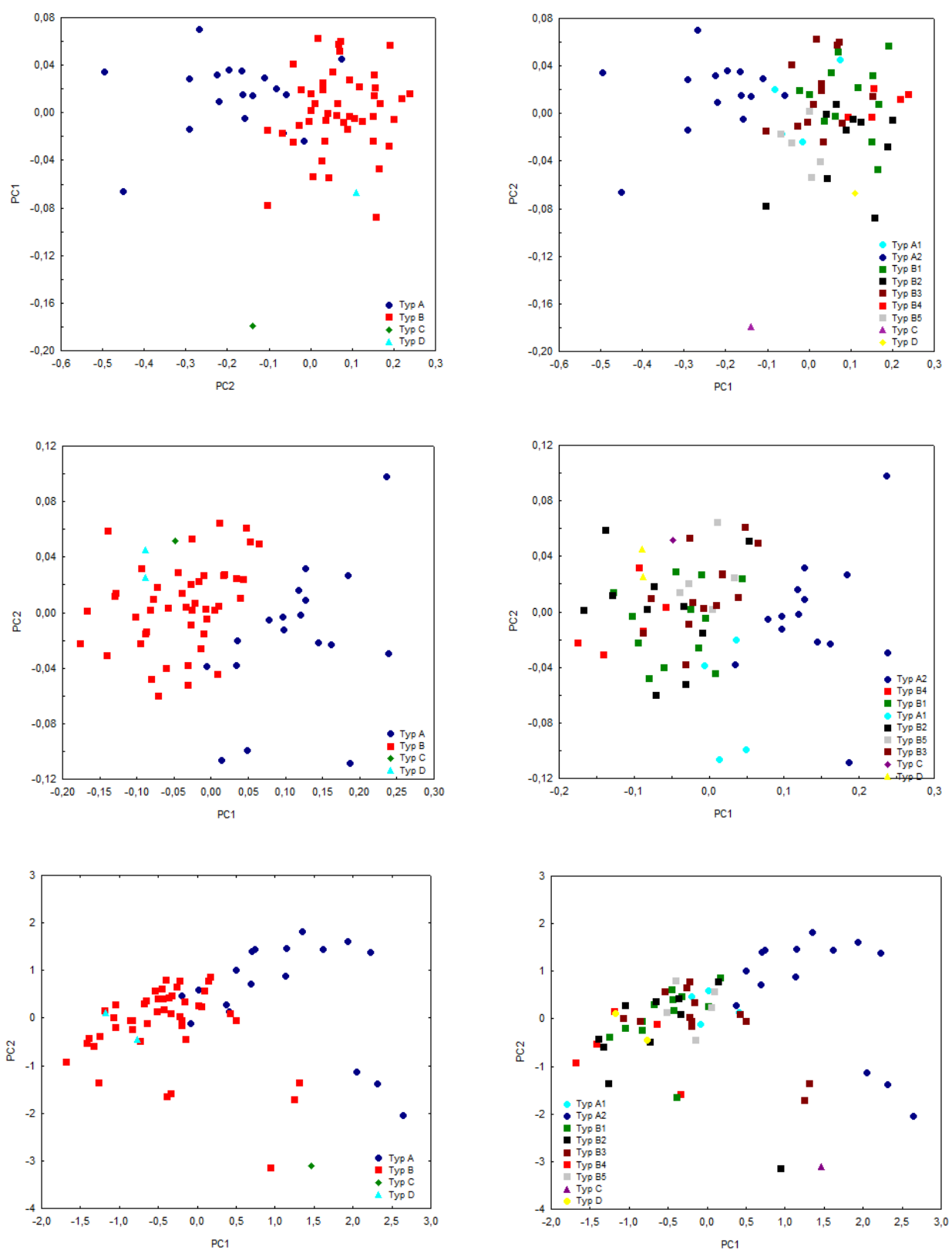
Z efektivních hlavních komponent vykazovaly statisticky významný vztah k typům nádob pouze první dvě proměnné (Tab. 4). Vícerozměrná analýza rozptylu ukázala statisticky významné rozdíly mezi typy pro všechny 3 metodické postupy analýzy tvaru, nicméně podobně jako u korelace jednorozměrné testy odhalily, že za tyto rozdíly jsou zodpovědné první dvě komponenty. Odlišnosti mezi metodickými postupy se ukázaly ve schopnosti prokázat statisticky významné rozdíly mezi typy. Zatímco první dvě hlavní komponenty eliptické Fourierovy analýzy odliší typy A, B a C, zbylé dva postupy ukázaly rozdíly mezi všemi čtyřmi skupinami.

Typy	EFA			TPS			PCA		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
	0,615*	-0,384*	0,193	-0,679*	0,338*	0,005	-0,547*	-0,384*	-0,221

Tabulka 4. Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu mezi typem nádoby a hodnotami tvarových proměnných, * označuje statisticky významné hodnoty na 5% hladině významnosti.

		<i>Wilks</i>	<i>F</i>	<i>Effect</i>	<i>Error</i>	<i>p</i>	
základní členění typů	EFA	Intercept	0,614	7,279	5	58,000	0,000
		typ	0,177	9,328	15	160,514	0,000
	TPA	Intercept	0,574	4,532	9	55,000	0,000
		typ	0,137	5,834	27	161,271	0,000
	PCA	Intercept	0,781	2,288	7	57,000	0,040
		typ	0,214	5,562	21	164,223	0,000
podrobné členění typů	EFA	Intercept	0,729	3,869	5	52,000	0,005
		podtyp	0,040	5,504	45	235,711	0,000
	TPA	Intercept	0,763	1,695	9	49,000	0,116
		podtyp	0,013	3,887	81	325,633	0,000
	PCA	Intercept	0,832	1,471	7	51,000	0,199
		podtyp	0,039	3,609	63	293,343	0,000

Tabulka 5. Výsledky vícerozměrné analýzy rozptylu testující rozdíly tvarových proměnných mezi typy nádob.



Obr. 9-14. Tvarové prostory první a druhé hlavní komponenty s odlišenými typy podle základní a podrobní Zemanovy klasifikace římských nádob. Zobrazené tvarové proměnné odpovídají shora: eliptické Fourierové analýze, metodě klouzavých pomocných bodů a pomocným bodům bez "klouzání".

DISKUZE A ZÁVĚRY

Tato studie souboru vybraných nádob z jedné lokality ukazuje, jakým způsobem je možné aplikovat metody kvantitativního popisu tvaru pokročilými geometrickými a statistickými metodami v archeologii. Na rozdíl od tradičního typologického nebo metrického přístupu metody geometrické morfometrie dokáží vyjádřit celou šíři variability tvaru v souboru zkoumaných artefaktů. Z pohledu libovolné testované hypotézy to znamená, že metodika je schopna odlišit mezi sebou různé typy nádob, dokonce zachytit jemné nuance tvarových rozdílů, které se mohou v typologickém přístupu ztratit, ale také postihnout podobnosti nebo odlišnosti uvnitř definovaných typů nebo skupin.

V ukázce byly demostrovány tři odlišné metodické postupy kvantitativní analýzy tvaru. Za prvé, eliptická Fourierova analýza, jež patří do metod analýzy obrysů. Dále metoda pomocných klouzavých bodů, která tvoří přechod mezi metodami význačných bodů a obrysů. A nakonec analýza pomocných bodů bez standardizace „klouzáním“ doplněná analýzou hlavních komponent. Je všeobecně známo, že typ zvolené metody i druh deskriptoru tvaru může zásadně ovlivnit výstupy kvantitativního popisu tvaru. Nicméně, studie, které by srovnávaly spolehlivost metod na exaktních datech jednoho souboru objektů, nejsou příliš početné a obvykle se týkají biologických (Navarro *et al.* 2004) nebo paleontologických tvarů (MacLeod 2001). Již předchozí práce ukázaly, že pro archeologické artefakty, které obvykle postrádají dostatečné množství přesně si odpovídajících význačných bodů, jsou nejvhodnějšími vstupními daty obrysy nebo pomocné body (Costa 2010, Ioviță 2010). V této souvislosti je třeba zmínit, že mezi biologicky a archeologicky zaměřenou literaturou panuje rozpor v definici pomocných bodů. Mnohé archeologické aplikace (Lycett *et al.* 2010, Lycett, Chauhan 2010) postupují podle revidované typologie bodů (Bookstein 1997) a pomocné body berou za ekvivalenty význačných bodů typu III podle Booksteinovy typologie (Bookstein 1991). Jejich úprava a zpracování se shodují s postupem, který byl v této studii analýzy nádob označen jako analýza pomocných bodů bez „klouzání“ (Costa 2010, Monnier, McNulty 2010). Takový postup je korektní u artefaktů, jejichž konfigurace tvarů nezahrnují současně i význačné body (typ I nebo II), např. pěstní klíny nebo hroty, ačkoliv i zde by bylo vhodnější použít standardizaci klouzáním. Avšak v případě, že bychom stávající matematicky generované body obrysu artefaktu kombinovali s relevantními význačnými body, např. obrys nádoby s místem specifické výzdoby, pak by odlišná relevance bodů zvýhodňovala početnější pomocné body a ve svém důsledku by narušila interpretaci výsledků analýzy.

Všechny srovnávané metody analýzy tvaru poskytují pro odlišné tvary unikátní sady hodnot tvarových proměnných. Jak bylo ukázáno, pro extrémní typy nádob dávají aplikované metody více méně shodné výsledky. Rozdíly mezi metodami se projeví až tehdy, studujeme-li, do jaké míry různé postupy zachytí podobnosti nebo rozdílnosti mezi velmi podobnými tvary. V případě eliptické Fourierovy analýzy jsou hodnoty tvarových proměnných příbuzných tvarů velmi konzistentní. Je to dáno povahou metody, která dokáže velmi dobře popsat celkové globální rozdíly ve tvaru, ale je již méně spolehlivá, je-li cílem popisu zachytit drobné lokální rozdíly. V případě popisu jemných nepravidelností je zapotřebí použít většího počtu harmonických proměnných. S každou další harmonickou proměnnou se zákonitě zvyšuje celkový objem výstupních tvarových proměnných o 4 Fourierovy koeficienty. Ačkoliv standardní hardware počítače zvládne takový nárůst bez větších problémů, veliký počet koeficientů prakticky znemožňuje jednoduchou interpretaci výsledků výsledků bez pomoci vícerozměrné statistiky.

Nepopiratelným kladem výstupů Fourierovy analýzy jsou samostatně stojící proměnné pro popis tvaru, jež nevyžadují nutnost volit ústřední vzorový tvar celé analýzy (vzorem je elipsa Fourierovy analýzy). Naproti tomu analýza tenkých ohebných plátek sice poskytuje menší objem výstupních dat, který je možné vhodně kombinovat do několika málo proměnných, nicméně metoda popisuje tvar pouze na základě míry odlišnosti od zvoleného vzorového tvaru, templátu. Seběmenší změna ve tvaru templátu se zákonitě projeví odlišnými hodnotami tvarových proměnných. Za zdrojový tvar je nejčastěji brán průměrný tvar v souboru. Avšak může jim být také empiricky určený prototyp nádoby, od které se rozvíhají rozličné tvarové varianty. Tento přístup má své silné stránky při posuzování míry diverzity v čase nebo prostoru, například divergence tvarů hrnčířské produkce od centra výroby k periferiím nebo vyjádření míry, s jakou byly při výrobě imitovány importované nádoby.

Jak naznačily výsledky srovnání metodických postupů s typologií, analýza pomocných bodů bez klouzání se svou nízkou schopností odlišit typově odlišné tvary jeví jako metodicky nejslabší postup pro popis archeologické keramiky. Analýza byla stále schopna rozpoznat typově vzdálené tvary, ale v porovnání s eliptickou Fourierovou analýzou nebo pomocnými klouzavými body je odlišení méně zřetelné. Slabinou je předně nízká citlivost odlišit podobně tvarované nádoby. Ve výsledku se tvoří shluky u tvarů, které jsou si podobné v jednom aspektu tvarové změny, ale zároveň se liší v aspektu jiném, který už analýza nedokáže plně rozpoznat. Tato skutečnost je pravděpodobně důsledkem matematicky určené homologie mezi relevantními body srovnávaných konfigurací. Jak ukázala analýza klouzavých pomocných bodů, pohybem bodů podél zakřivení obrysu se zvýší relevance v poloze bodů, což poskytne lepší přehled o tvarových rozdílech.

Jak naznačuje tato studie, také pro hodnocení profilů nádob je metoda pomocných klouzavých bodů výhodnější. Přestože proti popisu uzavřené kontury profilu nádoby Fourierovou transformací nelze z metodického hlediska nic namítnout, úskalí pramení z tvaru profilu *per se*. Průběh obrysu profilu mění náhle směr v několika klíčových bodech. Tyto lokální výkyvy ve směru vektorů jsou pro Fourierovu transformaci, jež je založena na vyhlazovací funkci, překážkou srovnatelnou s izolovanou nepravidelností v tvaru, jejíž popis vyžaduje vyšší počet harmonických proměnných. Analýza profilů vnáší do analýzy vedle tvaru další charakteristiku nádoby a tím je její tloušťka. Tento parametr působí jako důležitý diskriminační prvek mezi skupinami nádob v řadě popisných systémů (Vachůtová 2010).

Metody se dále liší ve schopnosti, jak se vyrovnat se zachovalostí popisovaných objektů. Eliptická Fourierova analýza tak, jak je představena v tomto exkurzu, není schopna popsat tvary, které netvoří uzavřený obrys, např. fragmenty nádob. Naproti tomu, analýzy s pomocnými body mají schopnost popsat jak fragmenty nádob, tak profily fragmentů nádob, za předpokladu, že si tyto fragmenty vzájemně odpovídají.

Důležitou otázkou při studiu tvarové variability keramických nádob jsou vlastnosti dat, které do analýzy vstupují. Ať již popisujeme jakýkoliv objekt, je důležité již na začátku získat takový obraz skutečnosti, který nebude zatížen subjektivním názorem hodnotitele. Nejvhodnější pro objektivní analýzu tvaru nádob jsou proto fotografie získané za standardních podmínek (nádoby musí být vždy ve stejné pozici a natočení, konstantní vzdálenost od objektivu, podobné světelné podmínky atd.). Zajistit tyto striktní podmínky je nedosažitelný cíl v případě, že studujeme fotodokumentace ze starších výzkumů, u kterých není možnost snímky revidovat ani zjistit, za jakých podmínek byly pořízeny. Výpovědní hodnota fotografií závisí na řadě faktorů spojených na straně jedné s optickým systémem snímacího zařízení, na straně druhé s podmínkami, za jakých byla fotografie získána (Šimková, Šimek 1972, Fetter 1967, Sonka *et al.* 1999). Optická vada objektivu, osvětlení, ohnisková vzdálenost jsou jen jedny z mnoha faktorů, které mohou ve svém důsledku ovlivnit kvantitativní vyjádření tvaru. V případě analýzy archeologické keramiky lze pouze doporučit, aby nevhodné nestandardně vyfocené snímky byly vyřazeny z analýzy anebo se smířit s tím, že skutečné rozdíly nebo podobnosti mezi nádobami budou částečně zastřeny „šumem“ ve vstupních datech. Tuto překážku lze odstranit, i když ne zcela, při přípravě dat (úprava fotografické distorze pomocí softwarových nástrojů, např. Adobe Photoshop) nebo v konečném statistickém zpracování (např. vhodným predikčním model pro odstranění nestejnomyšerného otočení nádob atd.). V této studii byly pro popis profilů použity také kresby nádob. Ačkoliv jde o tradičně používanou techniku reprodukce dat, kresebná dokumentace již představuje jistou formou interpretace tvaru. Perokresby jsou schematizované a idealizované a vyvstává zde otázka, do jaké míry se do analýzy promítně idealizace skutečného tvaru a styly a dovednosti kresličů. Vhodnou a zřejmě spolehlivější alternativou kresby by mohl být postup využívající trojrozměrné modely nádob nebo jejich fragmentů, kde virtuální prostor usnadňuje orientaci tvarů do standardní polohy a editační nástroje poskytnou požadovaný příčný řez modelem (Karasik, Smilansky 2008).

Doporučení, jaký metodický postup analýzy tvaru zvolit, nelze příliš zobecňovat. Použití té či oné metody se musí odvíjet od testované hypotézy. Pokud předpokládáme, že studovaný soubor tvarů obsahuje typově rozmanité dobře zachované nádoby a našim cílem je postihnout tyto skupiny bez ohledu na vlastní vnitroskupinovou variabilitu, pak je doporučením popsat tvary eliptickou Fourierovou analýzou. V případě, že tvary jsou si podobné a při popisu se soustředíme na drobné rozdíly, kterými se nádoby navzájem liší, potom Fourierova analýza není nejvhodnějším řešením. Naopak analýza pomocných bodů je dobrým služebníkem

u nekompletních tvarů, u nádob, které se liší tloušťkou stěny a u tvarů se subtilnějšími rozdíly. V analýze by neměla být neuváženě přiřazována stejná váha bodům konfigurace, jako je tomu v případě analýzy pomocných bodů bez „klouzáni“. Může to narušit homologii srovnávaných bodů a vézt k mylným závěrům.

Bez ohledu na podmínky, které musíme při analýze tvarů archeologické keramiky zajistit, jsou metody geometrické morfometrie přínosnou technikou objektivního popisu tvaru. Nejenže poskytují numerický výstup, který může být bez problémů dále testován statistickými metodami, ale hodnotí tvar bez ohledu na zkušenosti a subjektivní názory hodnotitele. Tím se stává univerzálním lehce reprodukovatelným nástrojem pro popis tvaru. Kvantitativní popis tvaru archeologických artefaktů však nemusí sloužit výlučně jako analytický nástroj. Tvarové proměnné, v případě, že je jejich získání automatizováno, může být zahrnut jako součást do katalogizačního algoritmu nebo automatických klasifikačních systémů a být ku prospěchu při vyhledávání v muzejních nebo studijních databázích.

CITOVANÁ LITERATURA

- Archer, W. – Braun, D.R. (2010): Variability in bifacial technology at Elandsfontein, Western cape, South Africa: a geometric morphometric approach. *Journal of Archaeological Science* 37: 201 – 209.
- Buchanan, B. (2006): An analysis of Folsom projectile point resharpening using quantitative comparisons of form and allometry. *Journal of Archaeological Science* 33: 185 – 199.
- Buchanan, B. – Collard, M. (2010): A geometric morphometrics-based assessment of blade shape differences among Paleoindian projectile point types from western North America. *Journal of Archaeological Science* 37: 350 – 359.
- Chauhan, P.R. (2010): Metrical Variability Between South Asian Handaxe Assemblages: Preliminary Observations. In: S. J. Lycett, P.R. Chauhan (eds.): *New Perspectives on Old Stones. Analytical Approaches to Paleolithic Technologies*, Springer Science+Business Media, LLC, pp. 119 – 166.
- Clarkson, C. (2010): Regional Diversity Within the Core Technology of the Howiesons Poort Techno-Complex. In: S. J. Lycett, P.R. Chauhan (eds.): *New Perspectives on Old Stones. Analytical Approaches to Paleolithic Technologies*, Springer Science+Business Media, LLC, pp. 43 – 60.
- Costa, A.G. (2010): A Geometric Morphometric Assessment of Plan Shape in Bone and Stone Acheulean Bifaces from the Middle Pleistocene Site of Castel di Guido, Latium, Italy. In: S. J. Lycett, P.R. Chauhan (eds.): *New Perspectives on Old Stones. Analytical Approaches to Paleolithic Technologies*, Springer Science+Business Media, LLC, pp. 23 – 42.
- Davis, J.C. (1986): *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley, UK.
- Ericson, J.E. - Stickel, E.G. (1973): A Proposed Classification System for Ceramics. *World Archaeology. Theories and Assumptions* 4/3: 357 – 367.
- Gero J. – Mazzullo, J. (1984): Analysis of Artifact Shape Using Fourier Series in Closed Form. *Journal of Field Archaeology* 11/3: 315 – 322
- Gilboa, A., Karasik, A., Sharon, I., Smilansky, U. 2004 Towards Computerized Typology and Classification of Ceramics. *Journal of Archaeological Science*. 31:6: 681 – 694.
- Hagstrum, M.B. – Hildebrand, J.A. (1990): The Two-Curvature Method for Reconstructing Ceramic Morphology. *American Antiquity* 55/2: 388 – 403.
- Ioviță, R. (2010): Comparing Stone Tool Resharpening Trajectories with the Aid of Elliptical Fourier Analysis. In: S. J. Lycett, P.R. Chauhan (eds.): *New Perspectives on Old Stones. Analytical Approaches to Paleolithic Technologies*, Springer Science+Business Media, LLC, pp. 235 – 254.
- Iwata, H. – Ukai, Y. (2002): SHAPE: A Computer Program Package for Quantitative Evaluation of Biological Shapes Based on Elliptic Fourier Descriptors. *The Journal of Heredity* 93: 384 – 385.
- Jolliffe, I.T. (1986): *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Karasik, A. – Smilansky, U. (2008): 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory. *Journal of Archaeological Science* 35: 1148 – 1168
- Lycett S.J., von Cramon-Taubadel, N. - Foley, R.A. (2006): A crossbeam co-ordinate caliper for the morphometric analysis of lithic nuclei: a description, test and empirical examples of application. *Journal of Archaeological Science* 33: 847 – 861.
- Monnier, G.F. – McNulty, K.P. (2010): Questioning the Link Between Stone Tool Standardization and Behavioral Modernity. In: S. J. Lycett, P.R. Chauhan (eds.): *New Perspectives on Old Stones. Analytical Approaches to Paleolithic Technologies*. Springer Science+Business Media, LLC, pp. 61 – 82.

Navarro, N. – Zatarain, X. – Montuire, S. (2004): Effects of morphometric descriptor changes on statistical classification and morphospaces. *Biological Journal of the Linnean Society* 83/2: 243 – 260.

Rohlf, F.J. (2001): TPS series, version 1.369. N.Y.: State University at Stony Brook.

Saragusti, I. – Karasik, A. – Sharon, I. – Smilansky, U. (2005): Quantitative analysis of shape attributes based on contours and section profiles in archaeological research. *Journal of Archaeological Science* 32: 841 – 853.

Sonka, M. – Hlavac, V. – Boyle, R.D. (1999): *Image Processing. Analysis. and Machine Vision*. PWS Publishing. Boston. USA..

Šimková, M. – Šimek, J.(1973): Kvalifikační příručka fotografa a laboranta. Práce. Praha.

Vachůtová, D. (2010): *Keramika z mladší a pozdní doby římské na Moravě*. Dizertační práce, Masaryk University, Brno

Zelditch, M.L. – Swiderski, D.L. – Sheets, H.D. – Fink, W.L. (2004): *Geometric morphometrics for biologists: a primer*. Elsevier Academic Press, New York.

Zeman, J. (1961): *Severní Morava v mladší době římské. Problémy osídlení ve světle rozboru pohřebiště z Kostelce na Hané*. Praha.

Kapitola 8

Využití metod geometrické morfometrie v identifikaci nedospělých jedinců podle obličeje

ÚVOD

Účelem identifikace ve forenzní praxi je prokázání totožnosti osoby nebo pravosti identifikačních dokladů. S postupnou specializací expertízní činnosti se z identifikace stal multidisciplinární proces, kterého se účastní obory jako forenzní genetika (DNA), daktyloskopie (otisky prstů), soudní lékařství (lékařské záznamy), forenzní odontologie (zubní karty), grafické expertízy (analýza písma) a řada dalších. Ve forenzní antropologii je identita prokazována na základě studia biologických znaků, jejich otisků nebo audiovizuálního záznamu. Jedním z nejpoužívanějších postupů je identifikace na základě vnějších znaků obličeje. Na některých znaleckých pracovištích dokonce platí, že případy vyžadující odborné vyjádření o identitě znaků obličeje nebo celé postavy, převažují nad identifikacemi na základě kosterních pozůstatků (Hana Eliášová, osobní sdělení).

Podstata identifikačních metod podle obličeje stojí na předpokladu, že člověk je z biologického hlediska charakterizován jedinečnou sadou vnějších znaků. Základní členění znaků odlišuje znaky statistické a dynamické. Zatímco dynamické znaky popisují chování jedince a jeho interakce s okolím (chůze, gesta, mimika) (Wang *et al.* 2004), statické znaky jsou trvalejšího charakteru a v delším časovém úseku vykazují stále stejnou podobu (typ postavy, tvar oční štěriny, průběh lasová linie). S ohledem na formální popis klasifikujeme znaky na morfoskopické (vizuální), metrické (velikostní) a morfometrické (tvarové). Hodnocení morfoskopických znaků vychází tradičně z typologického určení základních komponent obličeje jako je nos, uši, rty, oči atd. (Fetter *et al.* 1967). Metrické znaky hodnotí absolutní nebo relativní rozdíly ve velikosti obličeje a jeho částí. Morfometrické znaky hodnotí tvarové rozdíly vyjádřené metrickými proměnnými (indexy, poměry). Srovnání znaků dvou a více jedinců na základě foto- nebo videodokumentace se označuje jako fotokomparace. Při fotokomparaci se klade důraz na znaky, které jsou individuálně specifické, málo četné a maximálně stabilní v průběhu života (jizvy, průběh vrásek, znaménka). Vedle zvláštních znaků odkazujících

na totožnost jedince je obličej také bohatým zdrojem údajů o věku, pohlaví a populační příslušnosti. Všechny tyto informace, tzv. skupinové znaky, se uplatňují v procesu určení biologického profilu jedince neboli skupinové identifikaci.

Vedle forenzní expertízy jsou unikátní nebo skupinové znaky na obličej využívány také jako součást komerčních bezpečnostních a ochranných systémů, informačních technologií nebo aplikací v zábavním průmyslu (Woodward *et al.* 2003). V těchto případech není obvykle cílem zjistit skutečnou identitu jedince, ale pouze ověřit, tj. verifikovat, zda vnější znaky jedince odpovídají těm uloženým v databázi. Tento proces proto označujeme jako verifikace. Mluvíme-li o rekognici jedince podle obličeje, pak se jedná o proces, při kterém jsou rozpoznány somatické znaky, které vedou k pravděpodobné identifikaci. Rekognice se ve forenzním kontextu provádí u nálezů těl s dostatečně zachovanými měkkými tkáněmi obličeje a není prováděna odborníky, ale příbuznými obětí.

Základními předpoklady fotokomparačních a identifikačních postupů ve forenzní antropologii je maximální spolehlivost a přesnost používané metodiky. Obojí závisí především na odborných dovednostech a zkušenostech hodnotitele. Naproti tomu prioritou biometrických identifikačních a verifikačních systémů používaných v bezpečnostních systémech, na letištích nebo při vstupech do objektů je vysoký podíl automatizace a také rychlost procesu při zachování optimálního prahu spolehlivosti. Automatické nebo automatizované systémy s podporou počítače jsou ve forenzní praxi využívány spíše pro klasifikaci snímků než za účelem přímé identifikace. Plné automatizaci ve smyslu komerčních aplikací obvykle brání nízká kvalita srovnávané dokumentace a technické nedostatky automatických algoritmů při odstraňování multifaktoriální nebiologické variability snímků. Osvětlení, pozice hlavy, mimika, barva kůže určená množstvím melaninu nebo mírou prokrvení pokožky jsou jen jedny z mnoha faktorů zastírající skutečnou unikátnost znaků, jejich podobnost nebo rozdílnost (Ling *et al.* 2007).

Vedle verifikace totožnosti se automatizované komerční systémy uplatňují také v oblasti skupinové identifikace. Zatímco ve forenzní praxi je skupinová identifikace pouze mezistupněm k pozitivní identifikaci, v komerčních biometrických systémech může představovat efektivní způsob, jak rozpoznat příslušníka požadované skupiny. Ta může být definovaná s ohledem na věk (věkově omezené přístupy), pohlaví nebo náboženskou či etnickou afinitu (boj proti terorismu).

Identifikace nedospělých jedinců podle obličeje je z pohledu nabídky identifikačních postupů a systémů nepatrně v ústraní, přestože se dotýká celé řady společensky velice závažných témat, od pátrání po pohřešovaných dětech, přes dětskou pornografii až po kriminalitu mladistvých. Ve všech těchto případech hraje portrétní identifikace podle fotografické nebo kresebné dokumentace klíčovou roli. Identifikace obličeje nedospělých jedinců přináší zvláštnosti a úskalí, se kterými se u dospělých buď nesetkáváme, nebo ovlivňují identifikační proces v menším rozsahu. V první řadě musí být brán ohled na skutečnost, že obličejové partie dítěte podléhají postupným změnám, které jsou dané růstem a vývojem organismu. Principy ontogenetických změn v obličejí jsou dobře známé (Enlow 1968, Enlow, Hans 1996), nicméně nástup, rychlost a rozsah těchto změn jsou populačně, pohlavně i individuálně specifické a závislé na exogenních a endogenních faktorech jako je socioekonomický status, strava, zdravotní stav a řada jiných.

Věkové změny v obličejí nedospělých jedinců jsou v největší míře odrazem velikostních a tvarových změn obličejové části lebky. Mozková část lebky novorozence zřetelně převažuje nad částí obličejovou. Obličej je krátký, plochý a široký. Tento projev umocňuje vystouplé čelo s prominentními čelními hrboly, malý knoflíkovitý nos, nízké čelisti bez dentice a vizuálně dominantní velké oči posazené v kulatých očnicích. Se změnou zalomení báze lebky, rozvojem dýchacích cest (nasomaxilární komplex), změnou úhlu dolní čelisti, prořezáním dočasné, později trvalé dentice (orální komplex) narůstá nejdříve šířka, následovaná výškou a nakonec se zvyšuje i hloubka (přední délka) obličeje (Goldstein 1936). U očí se zvětšuje oční štěrbin a klesá vnější okraj (orbitální komplex) (Sforza *et al.* 2009), roste výška nosu i šířka rtů a současně s ní narůstá i celková plocha červeně rtů (Ferrario *et al.* 2000). Mění se tloušťka kožních derivátů, tj. vlasů, obočí a vousů v pubertě. Vývoji podléhají všechny složky obličeje, nástup a rozsah změn se však liší. Ve vertikálním směru začínají změny nejdříve v horní části obličeje a odtud postupují

směrem dolů (Enlow, Hans 1996). Obdobný maturační gradient ve vývoji sledujeme i v horizontálním směru. Začíná v oblasti mediosagitální roviny a postupuje k okrajům obličeje. Naopak mezi konstanty, které jsou morfogenezi obličeje ovlivněny minimálně, patří meziočnicová vzdálenost měřená přibližně v místě nasofrontálního přechodu, v místě antropometrického bodu nasion.

Rychlost růstových a vývojových změn v průběhu ontogeneze kolísají a tyto výkyvy odpovídají obecné představě o somatickém růstu vyjádřené Karlbergovým ICP modelem růstu (Karlberg 1987). Zrychlení změn obličeje je spojeno především s akcelerací v pubertě, která u české populace začíná v průměru ve věku 12,5 roku u chlapců a 10,5 roku u dívek, trvá 4-5 let (Sedlak, Bláha 2007).

Předchozí výzkum v oblasti morfologie lidského obličeje nebo jeho kostěnného podkladu ukázal, že metody geometrické morfometrie jsou vhodným pomocníkem pro studium patologií, sexuálního dimorfismu, podobnosti, mezipopulačních rozdílů, věkových změn (Dalal, Phadke 2007; Lu 1965, Bulygina *et al.* 2006, Bastir, O'Higgins 2006, Bookstein 1987, Hennessy, Moss 2001, Rosas, Bastir 2002) nebo jsou použitelné pro korekci polohy hlavy na fotografiích (Gharaibeh 2005). V případě identifikace nedospělých jedinců ve forenzní praxi se vybízejí tři základní oblasti využití. Za prvé tvarové proměnné popisující změny morfologie v průběhu ontogeneze mohou sloužit jako parametry pro klasifikační pravidla pro odhad věku na základě fotodokumentace, videozáznamu nebo obrazu obličeje v reálném čase. Za druhé tvarové proměnné mohou být využity k vyjádření míry podobnosti nebo odlišnosti dvou srovnávaných obličejů a být tak vodítkem pro určení totožnosti v procesu portrétní identifikace, respektive fotokomparace. Za třetí, numerická podstata metod pokročilé analýzy tvaru doplněná grafickými nástroji s podporou počítače může najít užitek v predikci věkových změn a v procesu věkového přizpůsobení portrétní fotodokumentace. Všechny tři oblasti využití předpokládají volbu vhodného parametru vyjadřujícího míru variability morfometrických dat.

Vyjádření míry variability morfometrických dat

Posouzení míry variability morfometrických dat je součástí řady biologických problémů, od odlišení dvou taxonomických jednotek nebo populací, vyjádření příbuznosti skupin, znázornění míry uniformity morfologického znaku na faktorech vnějšího prostředí po posouzení kontinuity vývoje ve tvaru daného znaku. Podle Willse *et al.* (1994) existují základní tři problémy ve vyjádření míry variability populace: 1) tvarové proměnné (rozměry, význačné body, křivky), které si zvolíme a které mají představovat rozmanitost jedinců nebo rozmanitost daného znaku, počet zvolených tvarových proměnných pak určuje počet os prostoru, ve kterém variabilitu dat popisujeme, 2) způsob, jakým hodnoty těchto proměnných zpracujeme, pokud vůbec (surová data, logaritmovaná data, skóre hlavních komponent, skóre hlavních koordinát atd.) a 3) způsob, jakým proměnné zkombinujeme do jedné hodnoty vyjadřující míru variability. První dvě podmínky závisí na podstatě studovaného biologického problému a vlastnostech získaných dat. Třetí nemá jednoznačné řešení.

Výstupy analýzy tvaru obvykle zahrnují více než jednu tvarovou proměnnou. Jednoduché řešení se nabízí za předpokladu, že kovariance mezi tvarovými proměnnými je nízká až nulová. V takovém případě lze zvolené parametry variability kombinovat do hodnoty, vyjadřující objem n -rozměrného tělesa (mnohostěn, hyperelipsoid, varianta, aj.). Použijeme-li dva parametry, může být variabilita vyjádřena obsahem obdélníku, jehož strany jsou vzdáleností minimálních a maximálních hodnot, rozptylem nebo směrodatnou odchylkou. V jiném případě lze vyjádřit objem dat plochou, kterou opisuje elipsa, jejíž osy (a , b) jsou určeny jednorozměrnými parametry variability podle vztahu $\pi \cdot a \cdot b$. Další možností je výpočet obsahu polygonu, který vznikne spojením tvarů s krajními hodnotami tvarové proměnné, tzv. *convex hulls*. Přidáním třetí proměnné (třetí dimenze) se z obsahu obdélníku, respektive elipsy, stává objem kvádra ($a \cdot b \cdot c$), anebo elipsoidu ($4/3\pi \cdot a \cdot b \cdot c$). A tímto způsobem bychom mohli dimenze dále navyšovat. Pro n -proměnných dostaneme objem hyperkvádra v n -rozměrném nadprostoru, respektive hyperelipsoidu o stejném počtu dimenzí podle vztahu:

$$V_n = \frac{\pi^{\frac{1}{2}N} a * b * c * \dots * n}{\left(\frac{n}{2}\right)!}, \text{ je-li } n \text{ sudé číslo nebo}$$

$$V_n = \frac{2^n \pi^{\left(\frac{n-1}{2}\right)} a * b * c * \dots * n * \left(\frac{n-1}{2}\right)!}{n!}, \text{ je-li } n \text{ liché číslo.}$$

Vyjádření variability na základě objemu n-rozměrných struktur je komplikovanější, pokud má jedna nebo více proměnných výrazně nižší variabilitu ve srovnání s ostatními zahrnutými proměnnými, například v případě hlavních komponent s vyšším pořadovým číslem. Doporučením je použít pouze ty komponenty, které odčerpávají efektivní část variability nebo lépe, kterým nepředchází výrazný propad hodnoty vlastního čísla. Alternativním způsob poskytuje Footeův index (Foote 1992, Foote 1997). Footeův index je vyjádřením disparity dat. Vyjadřuje průměrnou tvarovou vzdálenost konsensu pozorovaných skupin od společného průměrného tvaru. Je tedy mírou morfometrické diverzity skupin nebo populací a má následující podobu:

$$D = \frac{\sum d_i}{N-1}, \text{ kde } d_i \text{ je euklidovská vzdálenost centroidu skupiny } i \text{ od centroidu všech } N\text{-skupin.}$$

Nahrazením euklidovské vzdálenosti prokrústovskou vzdáleností získáme výraz, ve kterém je tvarová diverzita vyjádřena sumou rozdílů mezi konsensem skupin a celkovým konsensem všech zahrnutých populací (tzv. „velký průměrný tvar, anglicky *grand mean shape*) (Zelditch *et al.* 2003). Možností je také použití druhé odmocniny průměrné prokrústovské vzdálenosti (Evison *et al.* 2010).

Analýza vývojových trendů metodami geometrické morfometrie

Studium závislosti tvarových proměnných na časové ose metodami geometrické morfometrie přináší některé metodické odlišnosti. Hlavní rozdíl pramení z postavení konsensu v průběhu zpracování dat. V průřezových studiích má konsensus ústřední postavení, protože slouží jako templát pro standardizaci dat i vyjádření podobnosti tvarů. V datech s časovou posloupností jej však nelze brát jako univerzální templát, na základě kterého je tvar popisován. V případě standardizačních postupů to obvykle nepřináší zásadní problém, a řada studií ukázala, že při standardizaci časově posloupných dat lze postupovat tradičním způsobem, tj. obecnou prokrústovskou analýzou (Bulygina *et al.* 2006, McNulty *et al.* 2006). Nicméně není vhodné, aby byl konsensus brán jako referenční tvar, od kterého se odvíjí popis ostatních tvarových rozdílů, např. metoda tenkých ohebných plátků nebo analýza hlavních komponent (Rohlf 1998).

Vývojové trendy, ať už ontogenetické nebo fylogenetické, mají vždy čtyři základní složky: 1) směr, 2) amplituda, 3) tvar a 4) rychlost. Směr vývojových trendů vyjadřuje úhel, který mezi sebou svírají vektory morfometrických dat v n-rozměrném prostoru. Vícerozměrná lineární regrese tvarových proměnných a časového faktoru (chronologické jednotky, věková stadia, stupně rozvoje somatických znaků apod.) je pravděpodobně nejrozšířenějším postupem, jak modelovat časově posloupná morfometrická data (McNulty *et al.* 2006). Rozdíly mezi různými časově závislými trendy lze vyjádřit hodnotou úhlu mezi vektory podle vztahu:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\sum a_n b_n}{\sqrt{\sum a_n^2} + \sqrt{\sum b_n^2}}\right)$$

Nulová hypotéza o shodě úhlů je testována metodou bootstrappingu, permutačním testem nebo tzv. „randomizací reziduí“ (Adams, Collyer 2007, Adams, Collyer 2009). Nicméně, jak udávají McNutty *et al.* (2006) hodnota pravděpodobnosti shody závisí na způsobu, jakým jsou vstupní data permutována, a rozdílné přístupy mohou poskytovat rozdílné hodnoty pravděpodobnosti. Záleží například, zda jsou data permutována uvnitř hierarchicky uspořádaného faktoru nebo zda jsou zahrnuta všechna data bez ohledu na příslušnost k vývojovému stupni.

Amplituda vývojového trendu ve tvaru je určena délkou vektoru mezi počátečním a koncovým tvarem. V praxi může být zastoupena hodnotou euklidovské vzdálenosti mezi konfigurací na začátku a konci chronologické řady (Adams, Collyer 2009) nebo může být vyjádřena podobně jako tvarové rozdíly libovolných dvou konfigurací, tj. hodnotou prokrústovské vzdálenosti. Rychlost ontogenetického trendu je přírůstek tvarové změny za jednotku času a lze ji vyjádřit velikostí vícerozměrného vektoru tvarových proměnných nebo hodnotou prokrústovské vzdálenosti mezi tvary dvou vývojových stadií.

Tvar ontogenetického trendu tvarových proměnných je nejčastěji modelován lineárními regresními modely. Nicméně je známo, že použití lineárních modelů je zjednodušením vývojové změny a že lineární průběh nastává pouze v některých obdobích ontogeneze. Používány jsou proto také složitější regresní modely (Bulygina *et al.* 2006, Scandrett *et al.* 2006, Schernaum *et al.* 2007).

Cílem této pilotní studie bylo prozkoumat užitečnost metody analýzy význačných bodů v procesu fotokomparace dětí současné české populace ve věkovém rozpětí od narození do 18 let v podobě, jež by mohla sloužit jako základ pro vytvoření metodické pomůcky, např. počítačové aplikace pro usnadnění identifikace nedospělých jedinců v české forenzní praxi anebo být metodickým návodem pro odborníky při využití běžně dostupných nástrojů geometrické morfometrie.

MATERIÁL A METODY

Zkoumaný soubor se skládal z fotografií a digitálních snímků obličeje nedospělých jedinců ve frontálním pohledu ve věku od narození do 18 let. S ohledem na původ a charakter dat tvořily snímky dvě základní skupiny. První skupina, dále označovaná jako longitudinální data, byla tvořena fotodokumentací obličejů nedospělých jedinců získaných v pravidelných časových intervalech v průběhu od narození do dospělosti. Každý jedinec byl v souboru zastoupen více než jednou fotografií. Druhá skupina snímků, dále označovaná jako průřezová data, dokumentovala obličeje nedospělých jedinců současné české populace. Každý jedinec byl v této skupině zastoupen pouze jednou fotografií.

Longitudinální data

Materiál byl ke studiu zapůjčen z rozsáhlé Brněnské longitudinální studie (BLS), která probíhala od 60. let do poloviny 80. let 20. století na Výzkumném pracovišti preventivní a sociální pediatrie, Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně pod vedením doc. MUDr. Marie Bouchalové, CSc. Studie byla zaměřena na sledování růstu a vývoje dětí a v rámci vyšetření psychosomatického vývoje. Děti byly vyšetřovány v pravidelných věkových termínech od narození do dovršení dvaceti někdy dvaceti jedna let. V prvním roce života byly termíny měření tříměsíční ± 7 dní od data narození, po prvním roce života pak půlroční ± 14 dní od data narození (Bouchalová 1987, 1981, 1980, 1983). Při každém vyšetření účastníků BLS byla získána fotodokumentace dítěte. Celkem bylo pro každého jedince v souboru k dispozici maximálně 42 černobílých fotografií, které zobrazovaly celou vzpřímenou stojící postavu ve frontálním pohledu. U dětí ve věku do jednoho roku věku byla fotografována postava ležící na zádech. Fotografie byly archivovány přilepené na A4 papírových kartách, vždy po 4 kusech na stránku. Postrádají měřítko a jedinou vizuální informaci o velikosti poskytuje rám dveří.

Do analýzy tvaru obličeje bylo zařazeno 325 jedinců z BLS. Použity byly pouze fotografie v rozsahu od narození do 18 let (vyřazeny byly fotografie získané poté, co jedinec dosáhl 19 let). Ideální kontinuita snímků byla v řadě případů narušena odstoupením od studie, vynecháním vyšetření nebo komplikacemi s fotografickým filmem. Ze zkoumaného souboru byly dále vyřazeny snímky, které nesplňovaly následující podmínky: obličej dítěte byl zaznamenán ve frontálním pohledu, hlava byla držena vzpřímeně a obličej byl bez výrazu nebo náznaku mimiky. Mírný úklon hlavy na stranu byl akceptován. Vyřazeny však byly snímky, na kterých má vyšetřovaný hlavu v záklonu nebo je pootočená na pravou nebo levou stranu. Konečný počet fotografií v souboru čítal 2951 položek.

Karty s nalepenými fotografiemi byly skenovány pomocí stolního skeneru Mikrotek ScanMaker 9800 XL + TMA. Skenovaná oblast fotografie byla omezena výhradně na obličej probanda. Rozlišení výsledného skenu bylo nastaveno na konstantní hodnotu 1000 dpi.

Průřezová data

Materiál pocházel ze studií nedospělých jedinců, které probíhaly nebo v současnosti probíhají na Ústavu antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity a na Výzkumném pracovišti preventivní a sociální pediatrie, Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně.

Fotografie 109 jedinců (50 chlapců a 59 dívek) byly získány v rámci projektu ELSPAC (*European Longitudinal Study of Pregnancy and Childhood*), který probíhá na Výzkumném pracovišti preventivní a sociální pediatrie, Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně pod vedením doc. MUDr. Lubomíra Kukly, CSc. a svým charakterem navazuje na předchozí BLS (http://www.med.muni.cz/elspac/Pages/index_tcz.html, 15.5.2010). Soubor zahrnoval jedince ve věku 18 let.

Do souboru byla dále zařazena fotodokumentace 226 žáků (111 chlapců a 115 dívek) ze Základní školy a MŠ T. G. Masaryka v Hovoranech (okr. Hodonín) získána v průběhu antropologické studie zaměřené na výzkum sexuálního dimorfismu tělesných rozměrů prováděné Ústavem antropologie PŘF MU v období prosinec 2006 až únor 2007 (Duda 2007). Věková struktura probandů se pohybovala od 6 do 16 let.

Třetí část souboru pocházela ze studie studentů prvních až čtvrtých ročníků gymnázia v Ústí nad Labem, prováděné Ústavem antropologie PŘF MU v únoru roku 2007 (Duda 2007). Celkem bylo zahrnuto 96 jedinců, z toho 48 chlapců a 48 dívek ve věku od 15-19 let.

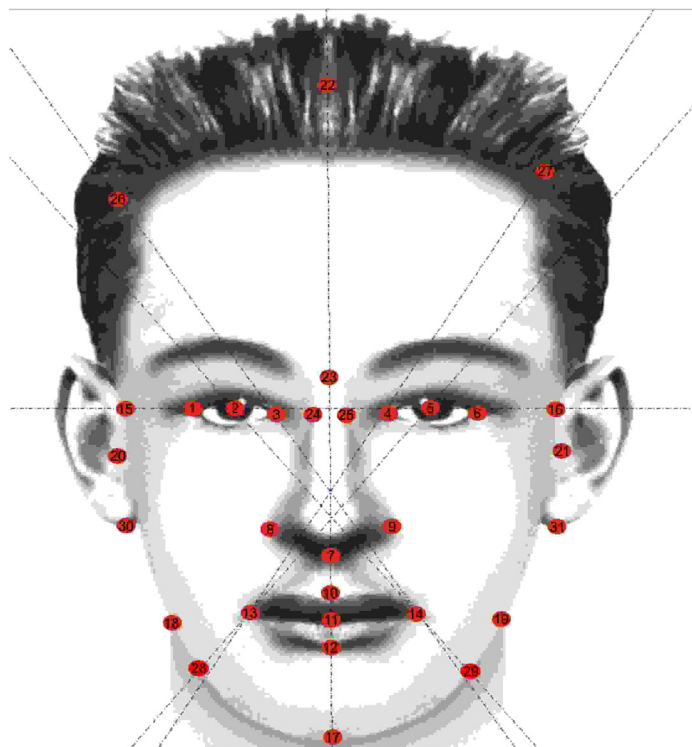
Soubor celkem představoval 431 položek, z toho 209 chlapců a 222 dívek.

Pro účely studie byly fotografie rozděleny do 13 věkových kategorií podle věku probanda v době zhotovení snímku:

Kategorie 1: do 1 roku	Kategorie 8: 10 – 11,49 roku
Kategorie 2: 1-2,49 roku	Kategorie 9: 11,5 – 12,99 roku
Kategorie 3: 2,5 – 3,99 roku	Kategorie 10: 13 – 14,49 roku
Kategorie 4: 4-5,49 roku	Kategorie 11: 14,5 – 15,99 roku
Kategorie 5: 5,5 – 6,99 roku	Kategorie 12: 16 – 17,49 roku
Kategorie 6: 7 – 8,49 roku	Kategorie 13: 17,5 – 18,99 roku
Kategorie 7: 8,5 – 9,99 roku	

Záznam vstupních dat

U každého snímku byla získána 2D prostorová data 31 bodů na obličeji (Tabulka 1, Obr. 1). Body byly vybrány tak, aby pokrývaly obličej jako celek a současně zachytily nejdůležitější individuálně a věkově specifické krajiny obličeje, tj. obočí, oči, nos, ústa, uši. Dalším kritériem při výběru počtu a typů bodů byla náročnost a pracnost jejich vyhledávání. Digitalizace dat probíhala samostatně pro každého jedince v náhodném pořadí snímků pomocí sady programů TPS (Rohlf 2005). Tvar obličeje byl zastoupen 2 konfiguracemi bodů: kompletní konfigurace zahrnující všech 31 bodů a konfigurace bez bodů umístěných na uchu (lalůček a tragon) a čítající celkem 27 bodů.



Obr. 1. Vstupní význačné body na obličeji, definice bodů jsou uvedeny v tabulce 1.

Standardizace

Data zastupující tvar obličeje byla standardizována s pomocí pilotní verze programu STANDARD (Urbanová *et al.* 2010, viz Appendix) vytvořeného pro úpravu prostorových dat na portrétních fotografiích. Algoritmus postupu zahrnoval standardizaci polohy konfigurace bodů na její centroid (1), změnu velikosti konfigurací bodů na jednotnou velikost $CS=1$ (2), ustavení význačných bodů ležících v mediánní rovině podél osy y (3), ustavení ideální symetrie bilaterálních bodů (4). Odlišný způsob prostorové standardizace byl zvolen pro longitudinální a průřezová data. Longitudinální data byla superponována tak, aby hodnoty Y-souřadnice bodů všech konfigurací měly hodnotu 0, tj. byly umístěny na X-ose kartézského systému souřadnic. Ve výsledku byl pro každou studovanou fotografii získán vektor vstupních dat o $N-9$ rozměrech, kde N je počet bodů konfigurace.

Průřezová data byla standardizována stejným způsobem, pouze zarovnání konfigurací na základnu, bylo nahrazeno přesunem konfigurací na centroid. Ve výsledku byla každá studovaná fotografie popsána vektorem o $N-7$ rozměrech, kde N je počet bodů konfigurace.

Analýza tvaru

Hodnoty prokrústovské vzdálenosti se staly základními tvarovými proměnnými pro hodnocení podobnosti a rozdílnosti tvarů mezi jedinci i zvolenými skupinami. Tímto způsobem byly vyjádřeny tvarové rozdíly v longitudinálních i průřezových datech. U longitudinálních dat byly dále zahrnuty hodnoty prokrústovských reziduí definované jako hodnoty vektoru mezi danou konfigurací jedince a odpovídající konfigurací v kategorii do 1 roku života. Z pohledu geometrické morfometrie se ve skutečnosti nejedná o prokrústovskou vzdálenost ani o prokrústovská rezidua, protože v průběhu standardizace dat nebyla použita prokrústovská superpozice. Nicméně matematický vztah pro výpočet obou proměnných se shoduje s postupem u prokrústovské superpozice, proto bude zachována tato terminologie. Pro každou z definovaných skupin byly také určeny hodnoty konsensů.

Číslo bodu	Název	Definice	31L	27L
1,6	Ektokanthion (pravý, levý)	bod na laterální straně oka na spojnici obou víček	*	*
2,5	Pupila (pravá, levá)	střed zornice oka, v případech, kdy panenky jedince směřují do strany, byl tento bod umístěn ve středu oční štěrbiny	*	*
3,4	Entokanthion (pravý, levý)	bod ve vnitřním koutku oka, kde se stýká horní a dolní víčko vnitřního koutku oka	*	*
7	Subnasale	bod ležící v úhlu, který svírá obrys nosní přepážky a horního rtu, nejnižší viditelný bod nosu v mediální rovině	*	*
8,9	Alare (pravé, levé)	bod ležící nejvíce laterálně na nosním křídle	*	*
10	Labrale superius	průsečík tangenty proložené horním okrajem hranice červeně rtu a mediální roviny	*	*
11	Stomion	bod ležící v průsečíku ústní štěrbiny a přímky procházející body labrale superius a labrale inferius	*	*
12	Labrale inferius	bod ležící na dolní hranici červeně dolního rtu nejdále od přímky procházející body chelion pravý a levý	*	*
13,14	Cheilion (pravý, levý)	bod ležící v koutku úst v místě styku hranice červeně horního a dolního rtu	*	*
15,16	Zygion II (pravý, levý)	nejlaterálnější viditelný bod obličeje ležící na přímce procházející středy obou zornic	*	*
17	Gnathion	bod ležící v mediální rovině na dolním okraji mandibuly	*	*
18,19	Gonion II (pravý, levý)	nejlaterálnější viditelný bod na dolní čelisti ležící na přímce procházející bodem stomion kolmo k mediální rovině	*	*
20,21	Tragion (pravý, levý)	bod ležící ve středu tragu	*	
22	Vertex	nejkranialnější bod hlavy umístěný ve střední rovině	*	*
23	Ophryon	průsečík mediálního okraje obočí s mediální rovinou	*	*
24,25	Radix nasi (pravý, levý)	bod na laterálním okraji kořene nosu	*	*
26,27	Euryon II (pravý, levý)	průsečík spojnic bodů 13-4 a 14-3 s okrajem hlavy	*	*
28,29	Ramus mandibulae (pravý, levý)	průsečík spojnic bodů 2-14 a 5-13 se spodním okrajem mandibuly, respektive měkkých částí spodního okraje obličeje	*	*
30,31	Lalůček ucha (pravý, levý)	nejkaudálnější bod lalůčku ucha	*	

Tabulka 1. Seznam a definice digitalizovaných významných bodů na obličeji.

Statistické zpracování

Longitudinální data

Variabilita tvarových proměnných byla studována na těchto úrovních: 1) mezi vytvořenými věkovými skupinami, 2) mezi jednotlivci stejné věkové skupiny (inter-individuální variabilita), 3) mezi jednotlivci různých věkových skupin (inter-individuální věkem podmíněná variabilita), 4) mezi fotografiemi stejného jedince v různých fázích ontogenetického vývoje (intra-individuální věkem podmíněná variabilita), 4) mezi pohlavími.

Tvarové rozdíly vyjádřené hodnotami prokrústovské vzdálenosti byly obecně testovány neparametrickými testy založenými na testování matice s libovolným vyjádřením vzdálenosti – NPMANOVA, ANOSIM (pokud není uvedeno jinak). Statistická významnost testů byla určena na základě 10 000 permutací. Individuální rozdíly mezi jedinci a rozdíly mezi různými fotografiemi stejného jedince v průběhu ontogeneze byly vyjádřeny hodnotami deskriptivní statistiky prokrústovských vzdáleností. Rozdíly mezi fotografiemi stejného jedince uvnitř věkových kategorií byly testovány na pomoci vícefaktorové vícerozměrné analýzy rozptylu (MANOVA).

Rozdíly mezi 13 věkovými kategoriemi byly testovány na matici prokrústovských vzdálenosti pomocí neparametrické analýzy rozptylu (NPMANOVA). Vliv pohlaví na rozdíly mezi věkovými kategoriemi byl testován na matici prokrústovských vzdálenosti pomocí dvoufaktorové analýzy podobnosti (ANOSIM). Statistická významnost post-hoc párové srovnání mezi skupinami byla určena s Bonferroniho korekcí na 5% hladině významnosti.

Analýza ontogenetického vývoje

Trajektorie ontogenetických změn ve tvaru obličeje byla vyjádřena koeficienty lineární regresní analýzy. Jako závislé proměnné byly brány prokrústovská rezidua (vektory posunu bodů vůči konfiguraci ve věkové kategorii 1). Nezávislou proměnnou byl věk jedince v době zhotovení fotografie, respektive věková kategorie.

Samostatné regresní modely byly vytvořeny pro soubor chlapců a dívek. Rozdíly mezi průběhem vývoje u dívek a chlapců byl vyjádřen úhlem, který vektory ontogenetické změny svírají ve vícerozměrném prostoru. Statistická významnost úhlu byla určena na základě permutačního testu s permutacemi nastavenými na hodnotu 1000. Velikost tvarové změny v průběhu od 1 roku do 18 let života byla vyjádřena hodnotou prokrústovské vzdálenosti mezi odpovídajícími konfiguracemi. Rozdíly hodnot prokrústovských vzdáleností mezi věkovými kategoriemi a mezi pohlavími byly testovány analýzou rozptylu (ANOVA) a vnořenou analýzou rozptylu (*nested design* ANOVA). Rychlost tvarových změn v průběhu ontogeneze byla vyjádřena rozdílem průměrné prokrústovské vzdálenosti mezi po sobě následujícími věkovými kategoriemi.

Úspěšnost sestaveného modelu byla vyjádřena srovnáním matic prokrústovských vzdáleností pozorovaných a predikovaných konfigurací Mantelovým testem (Mantel 1967) a srovnáním kartézských souřadnic obou souborů párovým Hotellingovým τ^2 testem.

Průřezová data

Rozdíly v tvaru obličeje mezi jedinci v průřezových datech byly vyjádřeny hodnotami deskriptivní statistiky prokrústovských vzdálenosti. Variabilita mezi podsoubory průřezových dat (ELSPAC, Hovorný, Ústí) byla zkoumána vícerozměrnou analýzou kovariance (MANCOVA), ve které věk působil jako kovariát a vícerozměrnou neparametrickou analýzou rozptylu (NPMANOVA).

Předpoklady pro zmíněné testy, především homogenita rozptylu a normalita rozložení vstupních proměnných byla testována Levenovým a Shapirovým-Wilksovým testem.

Variabilita tvarových proměnných

Variabilita morfometrických dat v rámci definovaných skupin byla vyjádřena hodnotami objemu elipsoidu o 10 rozměrech. Vlastnosti elipsoidu byly definovány podle směru, kterým probíhají osy hlavních koordinát vypočítané na matici prokrústovských vzdáleností popisovaných dat. Velikost os elipsoidu byla stanovena jako rozdíl kladné a záporné hodnoty tří směrodatných odchylek příslušné hlavní koordináty.

Statistické zhodnocení dat bylo provedeno s pomocí programů PAST 2.4, Statistica 9.0 a NTSYSpc.

VÝSLEDKY

Longitudinální data

Intra-individuální a inter-individuální variabilita

Statisticky významná korelace mezi průměrnými hodnotami prokrústovské vzdálenosti snímků stejného jedince a věkovou kategorií naznačuje, že velikost tvarových změn v obličeji stejného jedince klesá s narůstajícím věkem (Obr. 2, zelená barva). Tento trend byl zachycen u obou studovaných konfigurací význačných bodů ($R = -0,237$, $p < 0,05$ pro 31L $R = 0,253$, $p < 0,05$ pro 27L). Průměrné rozdíly mezi jedinci mají složitější průběh během ontogeneze. Variabilita mezi jedinci klesá v průběhu do čtvrté věkové kategorie (věk 5,5 let), poté stoupá v průběhu páté a šesté věkové kategorie, vykazuje stabilitu v rozsahu mezi šestou až desátou kategorií a poté opět narůstá až do 18 let. Tento trend je zřetelný jak z průměrných hodnot prokrústovské vzdálenosti, tak i z hodnot objemu elipsoidu (Obr. 2 - červená barva, Obr. 3).

Variabilita mezi skupinami

Na základě výsledků neparametrické analýzy rozptylu bylo zjištěno, že existují statisticky významné rozdíly mezi skupinami ve všech zkoumaných konfiguracích význačných bodů. Post-hoc srovnání ukázalo, že variabilita tvarů sousedících věkových skupin se překrývá natolik, že na 5% hladině významnosti není možné jednoznačně oddělit dvě po sobě následující věkové skupiny. Tento výsledek platí pro věkové kategorie 1-9. Kategorii 9 (do 13 let) lze odlišit od starších dětí, ale kategorie 10-14 již neposkytly důkazy o statisticky významných rozdílech mezi věkovými skupinami.

Hodnotíme-li prokrústovské vzdálenosti odděleně pro obě pohlaví, zjistíme, že u dívek je možné odlišit kategorii 8 (10 – 11,49 let) od ostatních věkových skupin a u chlapců kategorie 8 a 9 (10 – 11,49 a 11,5 – 12,99). Naopak kategorie 11-12-13 u dívek, 10-11-12 u chlapců a 12-13-14 u obou pohlaví nelze na základě konfigurací 31 ani 27 bodů odlišit.

Analýza ontogenetického vývoje obličeje

Jak se patrně z grafického znázornění průměrných hodnot první hlavní koordináty počítaných na matici prokrústovských vzdáleností pro jednotlivé věkové kategorie (Obr. 5), změny ve tvaru obličeje v průběhu ontogeneze jsou do 13. roku (kategorie 10) téměř lineární. Mírný nárůst změn lze pozorovat v období mezi 10. až 13. rokem (věková kategorie 8-10). V následujících letech se směr vývojových změn mění a změny se ustalují. Podle předpokladu se největší změny v obličeji ve střední a dolní části obličeje. Obličej s věkem zvyšuje výškové rozměry, narůstá výška nosu, snižuje se poloha vnějšího koutku očního víčka (Obr. 4).

Analýza rozptylu a vnořená analýza rozptylu poskytly statisticky významné rozdíly ve velikosti tvarové změny (vyjádřené prokrústovskou vzdáleností mezi tvarem obličeje v první a v každé následující kategorii) mezi věkovými skupinami (Tabulka 5). Výsledek potvrzuje nárůst tvarových změn v celém průběhu vývoje. Stejně hodnoty byly testovány mezi pohlavími. Rozdíly mezi pohlavími uvnitř věkových kategorií nebyly statisticky pro žádnou z věkových kategorií. Přírůstek v průběhu ontogeneze i celkový rozsah tvarové změny od narození do 18 let je v případě zvolených konfigurací stejný pro obě pohlaví.

věková kategorie	31L					27L				
	průměr	SD	maximum	minimum	5%	průměr	SD	maximum	minimum	5%
1	0,0899	0,0309	0,2454	0,0327	0,0502	0,0859	0,0292	0,2524	0,0228	0,0473
2	0,0812	0,0260	0,2108	0,0000	0,0460	0,0761	0,0236	0,2109	0,0227	0,0443
3	0,0797	0,0246	0,1966	0,0224	0,0462	0,0737	0,0223	0,1657	0,0000	0,0429
4	0,0806	0,0274	0,2188	0,0000	0,0454	0,0731	0,0260	0,2385	0,0000	0,0410
5	0,0825	0,0244	0,2077	0,0000	0,0488	0,0757	0,0230	0,2110	0,0216	0,0443
6	0,0842	0,0236	0,1987	0,0240	0,0504	0,0764	0,0224	0,1958	0,0242	0,0452
7	0,0831	0,0248	0,2002	0,0280	0,0486	0,0780	0,0245	0,2188	0,0229	0,0446
8	0,0864	0,0256	0,2199	0,0257	0,0505	0,0783	0,0243	0,2115	0,0196	0,0450
9	0,0818	0,0261	0,2010	0,0314	0,0473	0,0787	0,0250	0,2260	0,0198	0,0446
10	0,0802	0,0220	0,1381	0,0393	0,0476	0,0768	0,0237	0,2143	0,0181	0,0446
11	0,0889	0,0297	0,2113	0,0383	0,0484	0,0779	0,0239	0,2043	0,0189	0,0457
12	0,0877	0,0251	0,1753	0,0339	0,0519	0,0797	0,0237	0,1847	0,0000	0,0463
13	0,0899	0,0239	0,1559	0,0340	0,0528	0,0816	0,0242	0,1803	0,0272	0,0476
14	0,0980	0,0401	0,2310	0,0407	0,0508	0,0836	0,0329	0,2443	0,0289	0,0469

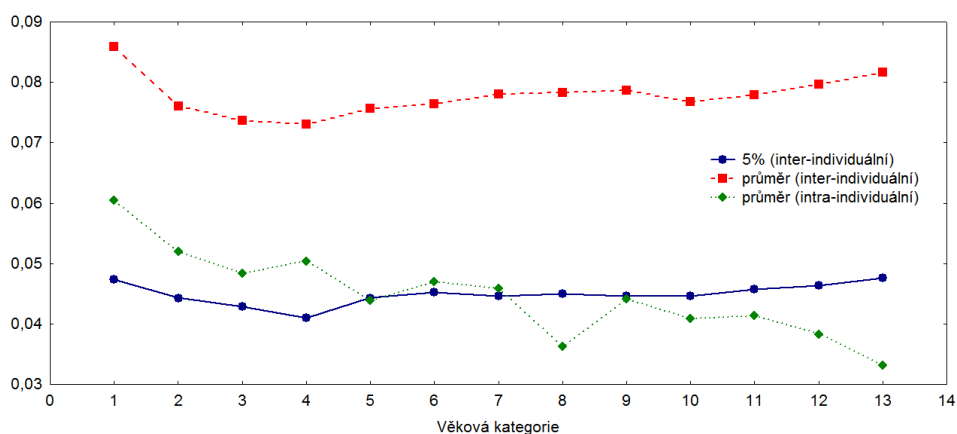
Tabulka 2. Popisná statistika hodnot prokrústovské vzdálenosti studovaných konfigurací bodů vyjadřující rozdíly mezi jedinci.

$4/3\pi*a*b*c...$	31L	27L	31L chlapci	31L dívky	27L chlapci	27L dívky
1	1,00E+05	8,06E+04	1,05E+05	8,14E+04	6,86E+04	8,81E+04
2	4,51E+04	5,81E+04	6,47E+04	2,24E+04	7,16E+04	3,95E+04
3	3,98E+04	3,95E+04	3,14E+04	5,56E+04	3,48E+04	3,94E+04
4	3,24E+04	3,47E+04	2,85E+04	2,48E+04	3,20E+04	3,68E+04
5	6,21E+04	5,64E+04	4,90E+04	8,74E+04	4,05E+04	6,86E+04
6	1,17E+05	8,49E+04	1,01E+05	1,22E+05	7,40E+04	8,13E+04
7	9,77E+04	7,72E+04	9,09E+04	7,26E+04	6,40E+04	7,00E+04
8	1,02E+05	8,27E+04	7,55E+04	8,53E+04	5,93E+04	9,38E+04
9	6,30E+04	7,30E+04	2,74E+04	9,29E+04	5,23E+04	8,38E+04
10	5,27E+04	7,75E+04	3,44E+04	3,63E+04	6,33E+04	8,28E+04
11	5,74E+04	6,97E+04	3,28E+04	4,05E+04	7,34E+04	5,53E+04
12	1,58E+05	9,72E+04	1,71E+05	6,92E+04	1,13E+05	6,92E+04
13	9,69E+04	1,31E+05	9,13E+04	5,41E+04	1,56E+05	8,06E+04

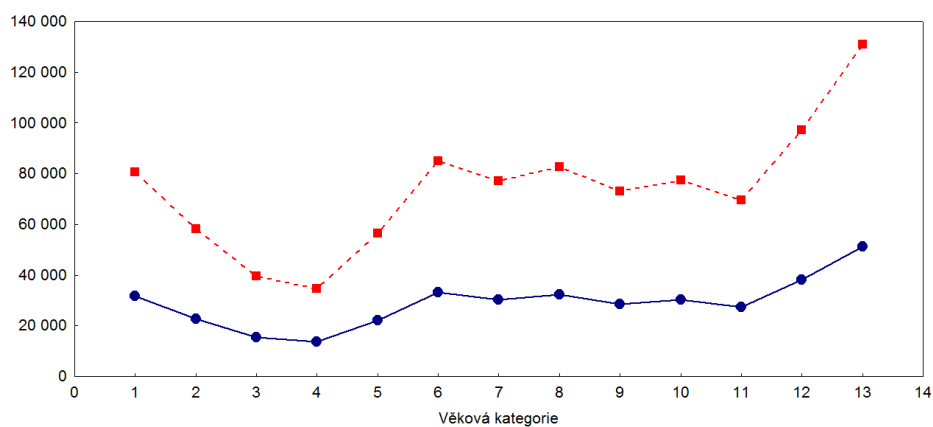
Tabulka 3. Hodnoty objemu n-rozměrného elipsoidu vyjadřující variabilitu morfometrických dat.

	31L				27L			
	průměr	max	min	SD	průměr	max	min	SD
1	0,0715	0,1113	0,0345	0,0215	0,0604	0,1115	0,0123	0,0230
2	0,0483	0,0801	0,0241	0,0158	0,0520	0,0882	0,0184	0,0178
3	0,0548	0,0835	0,0276	0,0172	0,0484	0,0816	0,0039	0,0191
4	0,0614	0,1020	0,0254	0,0208	0,0504	0,0866	0,0172	0,0189
5	0,0482	0,0765	0,0278	0,0137	0,0439	0,0830	0,0029	0,0185
6	0,0554	0,0957	0,0263	0,0184	0,0470	0,0945	0,0037	0,0184
7	0,0528	0,0889	0,0296	0,0181	0,0459	0,0877	0,0036	0,0174
8	0,0468	0,0760	0,0201	0,0147	0,0363	0,0988	0,0000	0,0212
9	0,0495	0,0826	0,0230	0,0225	0,0441	0,0933	0,0024	0,0177
10	0,0587	0,0587	0,0587	0,0000	0,0409	0,0848	0,0035	0,0143
11	0,0566	0,0832	0,0382	0,0156	0,0414	0,0873	0,0034	0,0146
12	0,0463	0,0725	0,0217	0,0137	0,0383	0,0934	0,0019	0,0177
13	0,0443	0,1113	0,0201	0,0186	0,0331	0,1115	0,0000	0,0185

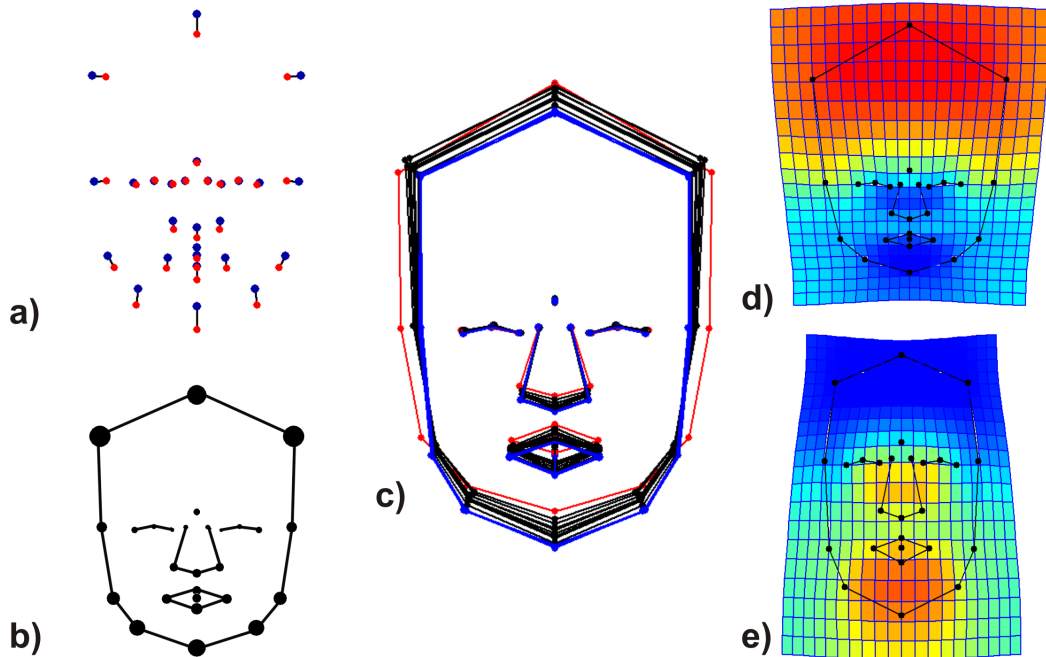
Tabulka 4. Popisná statistika hodnot prokrústovské vzdálenosti studovaných konfigurací bodů vyjadřující rozdíly mezi různými fotografiemi jednoho jedince.



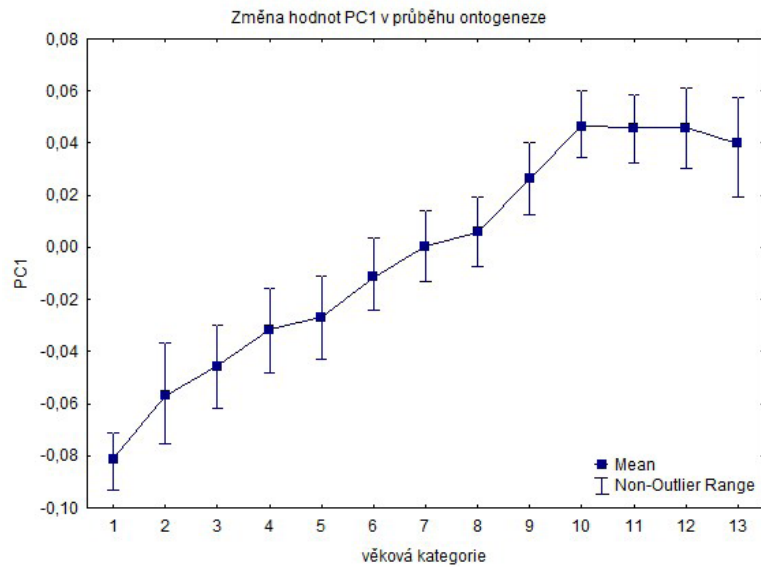
Obr. 2. Bodové grafy vyjadřující změny inter a intraindividuálních rozdílů v průběhu ontogeneze.



Obr. 3. Bodové grafy vyjadřující změny variability v ontogenezi vyjádřené hodnotami objemu elipsoidu parametrů variability.



Obr. 4. Různé formy vyjádření tvarové změny v obličeji od narození do 18 let, a) pomocí vektorů přesunu význačného bodu v prostoru, b) bublinkovým grafem, kde velikost „bubliny“ označuje velikost tvarové změny, c) drátovými modely, červený model značí kategorii 1, modré kategorie 10-13, d) a e) barevnou deformační mřížkou.

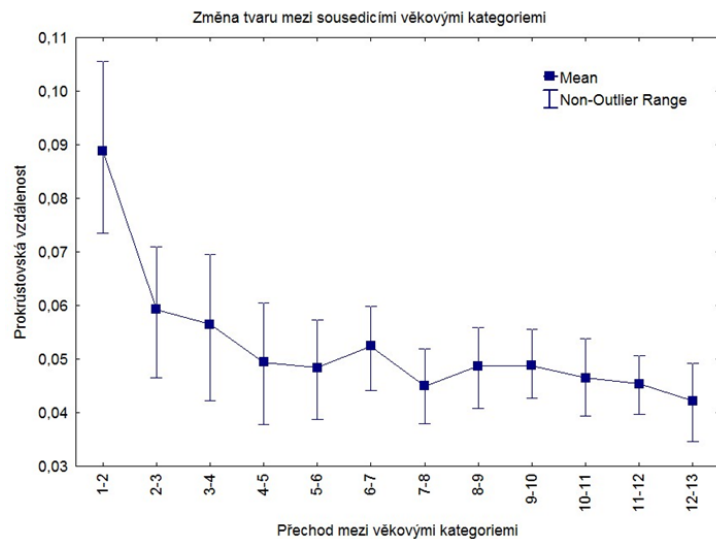


Obr. 5. Průměrné hodnoty první hlavní koordináty popisující 94% variability souboru longitudinálních dat.

Na základě Krustal-Wallisova testu nebyly zjištěny významné rozdíly v rychlosti tvarové změny v průběhu vývoje. Rychlost vyjádřena jako rozdíl prokrústovské vzdálenosti mezi sousedícími věkovými kategoriemi (Tabulka 6) ukázala, že přírůstek tvarové změny je v průběhu ontogeneze rovnoměrný s výjimkou tvarové změny mezi první a druhou věkovou kategorií. „Rychlostní“ křivka má obecně mírně sestupný charakter. Po prudkém propadu mezi první a druhou kategorií jsou změny relativně rovnoměrné s mírným nárůstem rychlosti mezi kategoriemi 6 a 7 (okolo 8. roku života) a mezi kategoriemi 8 až 10 (10-13 rokem) (Obr. 6).

kategorie	N	průměr	SD
1-2	46	0,088	0,028
1-3	63	0,096	0,034
1-4	53	0,095	0,035
1-5	57	0,096	0,027
1-6	74	0,101	0,034
1-7	84	0,104	0,032
1-8	87	0,108	0,029
1-9	90	0,115	0,032
1-10	89	0,125	0,031
1-11	89	0,128	0,029
1-12	88	0,124	0,028
1-13	55	0,126	0,034

Tabulka 5. Průměrné hodnoty prokrústovských vzdáleností mezi tvary první a následujících věkových kategorií. Hodnoty zobrazují aditivní nárůst tvarové změny od narození do 18 let.



Obr. 6. Průměrné hodnoty prokrústovských vzdáleností mezi tvary dvou sousedících věkových kategorií. Hodnoty zobrazují rychlost tvarové změny od narození do 18 let.

Modely ontogenetických změn v obličeji

Vícerozměrná regresní analýza poskytla predikční model pro přesun význačných bodů v závislosti na věku jedince (Tabulka 8). Predikční modely byly získány dohromady pro obě pohlaví a odděleně pro dívky a chlapce (data nejsou prezentována). Rozdíl ve směru vývojových změn u dívek a chlapců se rovnal hodnotě $5,953^\circ$, ale tento rozdíl nebyl statisticky významný ($p=0,35$).

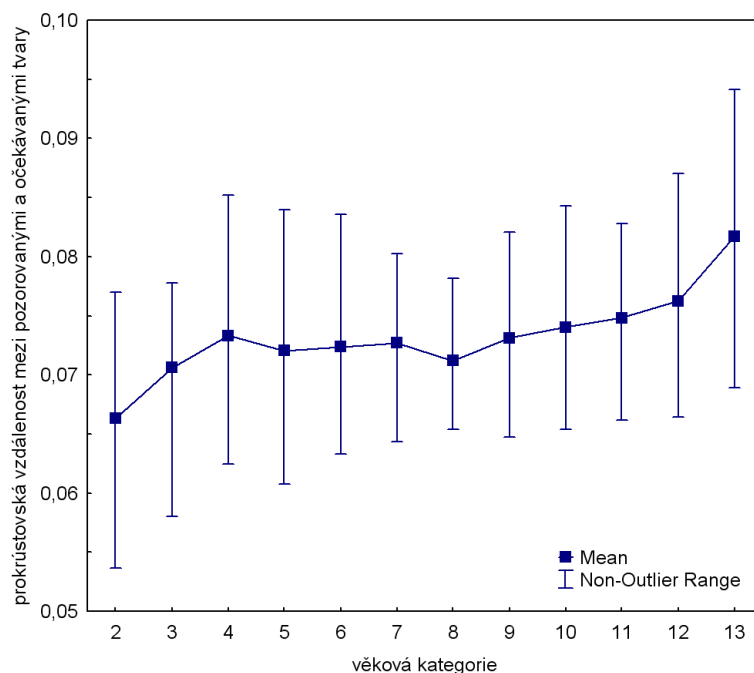
Nebyly zjištěny žádné statisticky významné rozdíly mezi hodnotami prokrústovské vzdálenosti mezi pozorovanými a predikovanými konfiguracemi pro jednotlivé věkové kategorie. Průměrné hodnoty pro věkové kategorie však naznačují mírný nárůst rozdílů s věkem (Obr. 7).

Predikční model pro věkové přizpůsobení tvarových konfigurací má obecný tvar $X_n = X + a + br$, kde X je hodnota standardizované souřadnice pozorované konfigurace obličeje, a je hodnota konstanty, b je hodnota predikčního koeficientu a r je hodnota rozdílu mezi kategoriemi pozorovaného a predikovaného tvaru (tzn. počet o kolik kategorií věku je konfigurace upravena). Mantelův test srovnávající matice prokrústovských vzdáleností očekávaných a pozorovaných tvarů poskytl statisticky významnou hodnotu $R=0,322$ na 5% hladině významnosti určenou z 1000 permutací. Hodnoty kartézských souřadnic očekávaných a pozorovaných tvarů byly dále srovnány párovým Hotellingovým testem s následujícími výsledky: $\tau^2 = 6,5 \cdot 10^{-6}$, $F = 2,43 \cdot 10^{-3}$, $p > 0,05$.

Průřezová data

Rozdíly mezi podsoubory

Analýza kovariance s faktory pohlaví a podsouboru a věkem jako kovariátem poskytla statisticky významné výsledky pro oba zkoumané faktory (Tabulka 9). V případě, že byla analýza omezena pouze na jedince starší než 13 let, nebyly prokázány žádné statisticky významné rozdíly mezi úrovněmi faktorů. Z obou testů je patrná statisticky významná interakce mezi faktory a kovariátem, jež odkazuje na rozdílné vývojové trendy u zkoumaných skupin (Tabulka 10). Výsledky neparametrické analýzy rozptylu potvrdily statisticky významné rozdíly mezi podsoubory i věkovými skupinami. Nicméně párové srovnání ukázalo, že rozdíly mezi kategoriemi 5-9 nejsou statisticky významné.



Obr. 7. Průměrné hodnoty prokrústovských vzdáleností mezi tvary pozorovanými a predikovanými na základě lineární regrese.

	31L					27L				
	průměr	SD	maximum	minimum	5%	průměr	SD	maximum	minimum	5%
ELSPAC	0,0785	0,0253	0,2176	0,0274	0,0460	0,0654	0,0178	0,1635	0,0210	0,0402
HOVORANY	0,0865	0,0294	0,2603	0,0244	0,0480	0,0755	0,0237	0,2053	0,0218	0,0428
ÚSTÍ	0,0808	0,0269	0,2172	0,0220	0,0454	0,0730	0,0215	0,1890	0,0182	0,0427

Tabulka 6. Průměrné hodnoty prokrústovských vzdáleností pro soubory průřezových dat.

věková kategorie	31L					27L				
	průměr	SD	maximum	minimum	5%	průměr	SD	maximum	minimum	5%
5	0,0976	0,0334	0,2073	0,0442	0,0549	0,0770	0,0270	0,1600	0,0410	0,0457
6	0,0838	0,0272	0,1862	0,0351	0,0462	0,0762	0,0249	0,1823	0,0324	0,0426
7	0,0796	0,0252	0,1590	0,0342	0,0453	0,0683	0,0214	0,1384	0,0308	0,0395
8	0,0812	0,0234	0,1543	0,0338	0,0476	0,0726	0,0197	0,1280	0,0278	0,0436
9	0,0868	0,0333	0,2342	0,0274	0,0457	0,0745	0,0244	0,1651	0,0236	0,0411
10	0,0844	0,0289	0,2294	0,0305	0,0466	0,0722	0,0217	0,1633	0,0266	0,0417
11	0,0871	0,0299	0,2406	0,0254	0,0486	0,0735	0,0214	0,1685	0,0236	0,0434
12	0,0856	0,0286	0,2159	0,0248	0,0480	0,0697	0,0192	0,1427	0,0257	0,0420
13	0,0906	0,0336	0,2853	0,0220	0,0484	0,0713	0,0206	0,1727	0,0207	0,0425
14	0,0818	0,0266	0,1912	0,0311	0,0465	0,0700	0,0202	0,1433	0,0265	0,0412

Tabulka 7. Průměrné hodnoty prokrústovských vzdáleností pro soubory průřezových dat.

	konstanta	koeficient		konstanta	koeficient
	a	b		a	b
1x	0,006363	-0,000179	1y	0,000915	-0,000476
2x	0,004053	-0,000317	2y	0,004416	-0,000285
3x	0,004480	-0,000152	3y		
4x	-0,004480	0,000152	4y		
5x	-0,004053	0,000317	5y	0,004416	-0,000285
6x	-0,006363	0,000179	6y	0,000915	-0,000476
7x			7y	-0,009526	-0,001463
8x	0,006638	-0,000416	8y	-0,009489	-0,001139
9x	-0,006638	0,000416	9y	-0,009489	-0,001139
10x			10y	-0,007942	-0,001764
11x			11y	-0,009722	-0,001700
12x			12y	-0,012041	-0,001901
13x	0,001590	-0,000385	13y	-0,006544	-0,001742
14x	-0,001590	0,000385	14y	-0,006544	-0,001742
15x	0,018464	0,000866	15y	0,003806	-0,000326
16x	-0,018464	-0,000866	16y	0,003806	-0,000326
17x			17y	-0,011923	-0,003968
18x	0,024821	-0,000845	18y	-0,009897	-0,001686
19x	-0,024821	0,000845	19y	-0,009897	-0,001686
22x			22y	0,005502	-0,004738
23x			23y	-0,004312	0,000036
24x	0,001181	-0,000023	24y	0,000261	0,000025
25x	-0,001181	0,000023	25y	0,000261	0,000025
26x	0,009111	0,002282	26y	0,021459	-0,002486
27x	-0,009111	-0,002282	27y	0,021459	-0,002486
28x	0,009520	-0,001223	28y	-0,004322	-0,003032
29x	-0,009520	0,001223	29y	-0,004322	-0,003032

Tabulka 8. Hodnoty konstant a koeficientů pro odhad konfigurace prostorových dat na obličejích nedospělých jedinců.

	λ	F	Effect	Error	p
intercept	0,266	51,732	30	562,000	0,000
pohlaví	0,942	1,143	30	562,000	0,276
podsubor	0,730	1,538	120	2236,693	0,000
pohlaví*podsubor	0,772	1,252	120	2236,693	0,036
pohlaví*podsubor*věk	0,363	2,014	300	5371,803	0,000

Tabulka 9. Výsledky analýzy kovariance průřezových dat.

	λ	F	Effect	Error	p
intercept	0,253	40,361	30	410,000	0,000
pohlaví	0,918	1,221	30	410,000	0,200
podsubor	0,750	1,022	120	1632,458	0,419
pohlaví*podsubor	0,705	1,248	120	1632,458	0,040
pohlaví*podsubor*věk	0,443	1,170	300	3926,218	0,027

Tabulka 10. Výsledky analýzy kovariance průřezových dat jedinců starších než 13 let.

DISKUZE A ZÁVĚRY

Fotografie nebo sekvence videozáznamu obličeje jsou cenným zdrojem informace o vnějších somatických znacích jedince a jsou proto běžně používané k určení biologického profilu nebo totožnosti jedince ve forenzní praxi i biometrických systémech (Thompson, Black 2007). Teoretické základy pro potřeby osobní identifikace, odhadu věku nebo simulaci věkových změn na obličeji patří mezi neaktuálnější výzkumné trendy v současnosti. O tom, že výzkum v oblasti identifikace a verifikace osob na základě vnějších znaků obličeje je jednou z priorit současného technologického vývoje ve forenzních vědách svědčí sestavení výzkumného centra Federálního úradu pro vyšetřování (FBI) pro koordinaci vývoje v oblasti biometrických systémů (*Biometric Center of Excellence*, <http://www.fbi.gov/news/pressrel/press-releases/west-virginia-university-named-national-leader-for-fbi-biometrics-research/>, 9.12.2010). Z pochopitelných důvodů je výzkum orientován především na dospělé jedince. Hlavní oblastí zájmu u nedospělých jedinců je kladena na rozvoj aplikací pro věkové přizpůsobení portrétních fotografií.

Tato pilotní studie řeší variabilitu morfometrických znaků obličeje nedospělých jedinců české populace na základě dat o individuálním vývoji jedinců i na základě plošného výzkumu populace. Ontogenetický vývoj kraniofaciální oblasti je intenzivně a dlouhodobě zkoumaným problémem v biologických i klinických vědách. Nicméně v oblasti geometrické morfometrie se sekvenčnímu vývoji tvaru věnuje výrazně menší množství prací (např. Adams, Collyer 2009) a z doposud publikovaných je většina orientována spíše na fylogenetický vývoj organismů (MacLeod, Forey 2004). Jen zlomek prací se věnuje vývojovým trendům ve tvaru u člověka, které by byly založeny na pravých longitudinálních datech (Lestrel, Brown 1976, Lestrel, Roche 1986, Bulygina *et al.* 2006). Na jednu stranu studium růstové a vývojové změn tělesných znaků je organizačně, finančně i metodicky náročné. Ačkoliv kvalita fotografického záznamu longitudinálních dat zdaleka nedosahuje úrovně dosažitelné současným technickým vybavením, představuje soubor z Brněnské longitudinální studie, jež mimochodem svým počtem zkoumaných probandů výrazně převyšuje ostatní práce založené na analýze tvaru longitudinálních dat, velmi cenný studijní materiál.

Není vyloučené, že snížená kvalita záznamu mohla ovlivnit výsledky studie, ale ve vztahu k vlastnostem fotodokumentace, jež bývá předmětem fotokomparační expertízy v kriminalistické praxi, můžeme studovaný materiál stále hodnotit jako akceptovatelný. Fotokomparace portrétních fotografií ve forenzní praxi je založena především na morfoskopických znacích, protože u metrických znaků je využití kompromitováno rozdílnými měřítky na fotografii, fotografickou distorzí vlivem odlišné vady čoček optických soustav fotoaparátů, odlišnými světelnými podmínkami během záznamu i nestandardní pozicí hlavy. Morfometrické znaky v podobě tvarových proměnných jsou nezávislé na měřítku, ale stejně jako rozměry jsou citlivé na kvalitu předloženého snímku, míru distorze fotografie i úhel otočení hlavy. Otočení hlavy (úklon, pootočení do strany) může být nicméně efektivně upraveno afinními transformacemi (Turaga *et al.* 2010) nebo ortogonální projekcí na vektor tvarové změny spojený s nechtěným zdrojem variability (Gharaibeh 2005). Podobně i úprava distorze vhodným predikčním modelem, např. na základě neafinní komponenty metody tenkých plátků může být zahrnuta do algoritmu standardizace dat před vlastním hodnocením tvarových rozdílů.

Podobný nechtěný zdroj variability může být přítomen i ve výsledcích této studie, především s ohledem na fotodokumentaci z BLS. Z dokumentace pořízené během vyšetření není zcela jasné, jakým způsobem probíhalo vlastní fotografování. Z fotografií je zřejmé, že byly pořizovány za různých světelných podmínek a snad i různými vyšetřujícími. Z pozadí za stojícími probandy můžeme usuzovat, že byla používána stejná část místnosti. Také neexistují záznamy, jakým fotoaparátem nebo fotoaparáty byly snímky pořízeny. S ohledem na dostupnou kvalitu však soubor prošel přísnou selekcí a do vlastní analýzy byly zahrnuty pouze ty fotografie, jež naplňovaly kritéria o kvalitě a standardní pozici probanda.

Studium individuálních vývojových trendů metodami analýzy tvaru je na rozdíl od průřezových dat popisující variabilitu tvaru uvnitř nebo mezi zvolenými skupinami metodicky náročnější. Odlišnosti nalézáme již ve standardizačních postupech. V pracích podobného zaměření jsou longitudinální data na obličej standardizována obvykle obecnou prokrústovskou analýzou (Bulygina *et al.* 2006). V této studii byla data standardizována nově vytvořeným algoritmem, který se odlišoval od standardních postupů především úpravou chybějících dat, nápravou stranové asymetrie a přemístěním konfigurací na základnu procházející středem mezočnicové vzdálenosti (entokanthion-entokanthion) a současně kolmou na mediosagitální rovinu obličeje. V postnatálním vývoji lebky člověka je nejstabilnějším prvkem lebeční báze. Ačkoliv se stále vedou diskuze o tom, zda a jakým způsobem dochází ke změnám ve tvaru báze (Swennen 2005), oblast nasia a mezočnicová vzdálenost jsou udávány jako relativní konstanty ontogenetického vývoje kraniofaciální oblasti a nasion brán jako jeden z fixních indikátorů pro zobrazení změn v obličejí (Sforza *et al.* 2009). Tato forma standardizace význačných bodů konfigurace přinesla ještě další odlišnosti. Standardizovaná data tvoří Kendallův prostor tvarových proměnných, což zjednodušuje použití některých statistických metod, kterými jsou longitudinální data obvykle posuzována. Například Mitteroecker, Gunz (2009) varují, že použitím lineární regrese v zakřiveném prostoru tvarových proměnných u dat, jejíž variabilita směřuje výrazně jedním směrem jako v případě ontogenetického trendu, mohou ve výsledcích vznikat vážné artefakty.

Nevýhodou aspektivního hodnocení vnějších znaků, jež je standardním a preferovaným postupem při fotokomparaci, je absence číselného vyjádření o stupni shody nebo rozdílů dvou a více fotografií. Může se stát, že znalec bude u soudu nebo během vyšetřování požádán, aby procentuálně vyjádřil míru podobnosti dvou portrétů. Ačkoliv je možné určit důležitost znaků, přiřadit jim pořadí nebo hodnoty vah, případně vypočítat pravděpodobnost shody výskytu pozorovaných znaků na základě frekvence v populaci, stále se nejedná o objektivní číselné vyjádření podobnosti. Prokrústovská vzdálenost morfometrických dat poskytuje dobré předpoklady pro tyto případy. Umožní například, abychom na základě vzdálenosti dvou jedinců s hodnotou 0,04 určili, že pouze 5% dvou různých portrétů má hodnotu menší než je hodnota získaná pro srovnávané portréty. A tato hodnota může být vodítkem v kombinaci s dalšími posuzovanými znaky.

Použití prokrústovské souřadnice pro vyjádření míry odlišnosti má své nepopiratelné výhody. Jedná se o parametr číselný, jednorozměrný, a tudíž snadno interpretovatelný, a současně v sobě zahrnuje variabilitu ze všech bodů dané konfigurace tvaru. Tím se mohou kompenzovat drobné rozdíly způsobené sníženou kvalitou snímku. Číselná podstata tohoto vyjádření poskytuje také dobrý základ pro rozvoj počítačové podpory identifikačního procesu. Počítačová podpora vnáší do identifikačního postupu možnosti zpracování velkého množství informací. Poskytuje nástroj pro vyčíslení spolehlivosti metody na základě statistického hodnocení. Obě tyto informace jsou žádanými informacemi v průběhu vyšetřování nebo v soudním řízení. Na druhé straně je prokrústovská vzdálenost parametr, který je velmi citlivý na kvalitu vstupních dat. Pokud bude jeden z bodů na obličeji nesprávně umístěn, dojde ke vzniku Pinocchiova efektu, který ovlivní všechny ostatní body konfigurace a současně hodnotu prokrústovské vzdálenosti.

Jak bylo zjištěno, v průběhu ontogeneze nejsou hodnoty prokrústovské vzdálenosti mezi různými jedinci konstantní, ale kolísají s ohledem na průběh ontogenetických změn. Podle zjištění Evisona *et al.* (2010) se variabilita obličeje mění a zvyšuje se s věkem. Naproti tomu výsledky pozorované na vývoji lebky v laterálním pohledu (Bulygina *et al.* 2006), ukázaly, že variabilita tvarových proměnných zůstává konstantní. Z výsledků analýzy probandů BLS je patrné, že nejmenší rozdíly mezi jedinci byly získány pro věkovou kategorii 4, tzn. děti ve věku 4 a 5 let. To je období, kdy je plně ukončen doznívající růst ovlivněn prenatální hormonální regulací (I-složka Karlbergova modelu). Dokončena je také velká část růstu obličeje. Základní rozměry obličeje (jako je morfologická výška obličeje, šířka obličeje, hloubka obličeje) dosahují v tomto věku od 79,7% do 94,0% dospělých hodnot (Farkas *et al.* 1992). Po tomto ontogenetickém minimu pozorujeme nárůst rozdílů ve tvaru obličeje mezi jedinci, které se ustaluje okolo sedmého roku. Ve vývoji se plně rozvíjí dětská složka Karlbergova růstového modelu, jež je ovlivněna genetickým potenciálem a regulována růstovým hormonem. Odlišný nástup růstu jednotlivých komponent obličeje, akcelerace nebo retardace jsou zdroje nárůstů tvarových rozdílů mezi jedinci. Období přibližně po 7. roce života je charakterické relativně konstantními rozdíly a to až do období okolo 14. roku života, kde nastupuje další nárůst tvarových rozdílů mezi jedinci.

Naopak průměrné rozdíly ve tvaru obličeje jednoho jedince s přibývajícím plynule klesají. Pro možné využití výsledků při fotokomparaci dětí je tento závěr velmi důležitý, neboť naznačuje, že pravděpodobnost nesprávného potvrzení identity dvou dětských portrétů na základě tvaru obličeje bude vyšší u mladších dětí než u adolescentů a tudíž kritéria pro míru podobnosti a rozdílnosti by měla odpovídat způsobem přizpůsobena.

Vlastní ontogenetický vývoj obličeje tak jak byl zachycen 31 body na obličeji je v souladu s obecnými závěry, které byly učiněny na základě tradičních postupů (Enlow, Hans 1996). Po rychlých změnách v první fázi života, nastupuje období s pravidelným přírůstkem tvarové změny, které končí po 13. roce života. Poté se směr i jejich rychlost výrazně snižuje a směr vektoru ontogenetické změny mění směr. Predikce věkových změn při věkovém přizpůsobení fotografií ve forezních či jiných aplikacích obvykle vychází z lineárních modelů. Podobně i v této studii byl vytvořen predikční model na základě lineární regresní analýzy prokrústovských reziduí. Scherbaum *et al.* (2007) navrhuje použití nelineárních modelů, např. polynomů. Také Bulygina *et al.* (2006) modelovali změny tvaru kraniofaciální oblasti v laterálním pohledu kvadratickou regrení analýzou. Vysoké hodnoty tvarových rozdílů mezi očekávanými a pozorovanými konfiguracemi naznačují, že vytvořený predikční lineární model pravděpodobně nebude nejvhodnějším řešením predikce tvarových proměnných a pro praktickou aplikaci bude muset být nahrazen složitějším modelem. Jako nejvhodnější se jeví tzv. modely „šité na míru“, které sestavují individuálně specifický algoritmus na základě referenční databáze (anglicky *piecewise methods*) (Scandrett *et al.* 2006).

Je zajímavé, že shodně v longitudinálních i průřezových datech nebyly pozorovány pohlavní rozdíly ve tvaru ani vývojovém trendu obličeje. Podle Enlowa (1968) je vývoj obličeje do věku okolo 13 let shodný pro obě pohlaví a největší podíl pohlavně odlišných znaků na obličeji získává jedinec až v průběhu puberty a adolescence. Absence sexuálně dimorfních rozdílů byla v těchto věkových kategoriích potvrzena metodami geometrické na obličeji jako celku (Duda 2007) i na izolovaných částech, např. rty (Kotulánová 2010) nebo zubní oblouk (Dadejová 2010). Naopak Bulygina *et al.* (2006) dokumentuje statisticky významné rozdíly již v raných fázích vývoje lebky včetně obličeje. Modely, které byly vytvořeny odděleně na datech dívek a chlapců ukazují rozdíl 5% ve směru ontogenetického vektoru, nicméně tyto rozdíly nebyly statisticky významné. V této práci však byly zkoumány věkové změny pouze v rozsahu od narození do 18. roku. Nesmíme zapomínat na to, že zatímco u žen je vývoj obličejové části ukončen brzy po dosažení pohlavní zralosti, u mužů pokračuje strukturální přestavba až do pozdějšího období adolescence, což označujeme jako prodloužená maturace (Burke, Beard 1979). Pokud se v dalším výzkumu potvrdí absence pohlavních rozdílů, pak to pro identifikaci nedospělých jedinců to znamená, že nebude potřeba vytvářet pohlavně specifické predikční modely.

Na závěr je potřeba zmínit, že vedle vyjádření podobnosti, lze morfometrická data velmi úspěšně kombinovat s warpingem a TPS transformacemi a využít v oblasti věkového přizpůsobení fotografií (viz příklady Obr. 8). Dole uvedené příklady byly vytvořeny na základě zde použité konfigurace 31 bodů. Vytvořený algoritmus je v tomto případě založen na predikci věkových změn pomocí lineární regrese (ačkoliv jak bylo uvedeno, tento postup nebude nejvhodnějším řešením).



Obr. 8. Ukázka věkového přizpůsobení portrétní fotografie dvou jedinců ve věku 7 let (vlevo). Vpravo je zobrazena fotografie s věkovým přizpůsobením na věk 16 let na základě lineární regresní analýzy a metody warpingu pomocí TPS transformací. Výstupy byly vytvořeny pomocí vlastního algoritmu jako součást studia využití geometrické morfometrie ve forenzní praxi.



CITOVANÁ LITERATURA

- Adams, D.C. - Collyer, M.L. (2007): Analysis of Character Divergence along Environmental Gradients and Other Covariates. *Evolution* 61/3: 510 – 515.
- Adams, D.C. – Collyer, M.L. (2009): A General Framework for the Analysis of Phenotypic Trajectories in Evolutionary Studies. *Evolution* 63/5: 1143–1154
- Bouchalová, M. (1980): Růst dětí za různých sociálních a biologických podmínek. *Česko-slovenská pediatrie* 35/8: 437 – 443.
- Bouchalová, M. (1981): Biologické a sociální podmínky růstu dětí. *Pokroky v pediatrii* 6/7: 215 – 254.
- Bouchalová, M. (1983): Nemocnost z kojeneckého věku jako základ dlouhodobých rozdílů v nemocnosti do puberty. *Československé zdravotnictví* 31/1:10 – 18.
- Bouchalová, M. (1987): Vývoj během dětství a jeho ovlivnění. Praha: Avicenum.
- Bulygina, E. – Mitteroecker, P. – Aiello, L. (2006): Ontogeny of Facial Dimorphism and Patterns of Individual Development Within One Human Population. *American Journal of Physical Anthropology* 131:432 – 443.
- Burke, P.H. – Beard, L.F.H. (1979): Growth of soft tissues of the face in adolescence. *British Dental Journal* 146/8: 239-246.
- Dalal, A.B. – Phadke S.R. (2007): Morphometric analysis of face in dysmorphology. *Computer methods and programs in biomedicine* 85: 165 – 172.
- Dadejová, V. (2010): Pohlavní dimorfismus morfologie alveolárního oblouku nedospělých jedinců. Magisterská diplomová práce, Masaryk University, Brno.
- Duda, J. (2007): Pohlavní dimorfismus lidského obličeje: morfometrická studie (využití archivních materiálů Katedry antropologie). Magisterská diplomová práce, Masaryk University, Brno.
- Enlow, D.H. (1968): The human face. An account of the postnatal growth and development of the craniofacial skeleton. Hoeber Medical Division, Harper & Row, Publisher.
- Enlow, D.H. – Hans, M.G. (1996): *Essentials of Facial Growth*. W.B. Saunders Company.
- Evison, M. – Dryden, I. – Fieller, N. – Mallett, X. – Morecroft, L. – Schofield, D. – Bruegge, R. V. (2010): Key Parameters of Face Shape Variation in 3D in a Large Sample. *Journal of Forensic Sciences* 55/1: 159 – 162.
- Farkas, L.G., Posnick, J.C., Hreczko, T.M. (1992): Growth patterns of the face: a morphometric study. *Cleft Palate-Craniofacial Journal* 29/4: 308 – 315.
- Ferrario, V.F. – Sforza, C. – Schmitz, J.H. - Ciusa, V. – Colombo, A. (2000): Normal growth and development of the lips: a 3-dimensional study from 6 years to adulthood using a geometric model. *Journal of Anatomy* 196/3: 415 – 423.
- Fetter, V. et al. (1967): *Antropologie*. Academia, Praha.
- Footo, M. (1997): The evolution of morphological diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28: 129 – 52.
- Footo, M. (1992). Rarefaction analysis of morphological and taxonomic diversity. *Paleobiology* 18: 1 – 16.
- Gharaibeh, W. (2005): Correcting for the Effect of Orientation in Geometric Morphometric Studies of Side-View Images of Human Heads. In: D. Slice (ed.): *Modern Morphometrics in Physical Anthropology*. Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, pp. 117 – 142.
- Goldstein, M.S. (1936): Changes in dimensions and form of the face and head with age. *American Journal of Physical Anthropology (old series)* 22: 37 – 89.

- Hennessy, R.J. – Moss, J.P. (2001): Facial growth: separating shape from size. *European Journal of Orthodontics* 23/3: 275-285.
- Karlberg, J. (1987): Modeling of human growth. Goeteborg: Universitas regia Gothoburgensis.
- Lestrel, P.E. – Brown, H.D. (1976): Fourier Analysis of Adolescent Growth of the Cranial Vault: A Longitudinal Study. *Human Biology* 48: 517 – 528.
- Kotulánová, Z. (2010): Morfometrie lidských rtů: studie sexuálního dimorfismu. Magisterská diplomová práce, Masaryk University, Brno.
- Lestrel, P. E. – Roche. A. F. (1979): The cranial thickness in Down's Syndrome: Fourier analysis. *Proceedings of the 1st International Congress on Auxology* 1:108 – 118.
- Lu, K.H. (1965): Harmonic Analysis of the Human Face. *Biometrics* 21: 491 – 505.
- Mitteroecker, P. – Gunz, P. (2009): Advances in Geometric Morphometrics. *Evolutionary Biology* 36: 235 – 247.
- Mantel, N.A. (1967): The detection of disease clustering and a generalized regression approach. *Cancer Research* 27: 209-220.
- McNulty, K.P. – Frost, S.R. – Strait, D.S. (2006): Examining affinities of the Taung child by developmental simulation. *Journal of Human Evolution* 51: 274 – 296.
- MacLeod, N. – Forey, P.L. (2004): Morphology, Shape and Phylogeny. Taylor & Francis.
- Rohlf, F.J. (2005): TPS series,. N.Y.: State University at Stony Brook.
- Rosas, A. – Bastir, M. (2002): Thin-plate spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology* 117/3: 236 – 245.
- Sedlak, P. – Bláha, P. (2007): The endocrine regulation of growth and development. In P. Bláha, C. Susanne, E. Rebato (eds.): *Essentials of Biological Anthropology*. Prague: Charles University in Prague, The Karolinum Press, pp. 217 – 230.
- Scandrett, C. – Solomon, C. – Gibson, S.J. (2006): A person-specific, rigorous aging model of the human face. *Pattern Recognition Letters* 27/15: 1176 – 1787.
- Schernaum, K. – Sunkel, M. – Seidel, H.-P. – Blanz, V. (2007): Prediction of Individual Non-Linear Aging Trajectories of Faces. *Eurographics* 26/3: 1 – 10.
- Sforza, C. - Grandi, G. – Catti, F. – Tommasi, D.G. – Ugolini, A. – Ferrario, V.F. (2009): Age- and sex-related changes in the soft tissues of the orbital region. *Forensic Science International* 185: 115 - 123.
- Swennen, G.R.J. (2005): Three-dimensional cephalometric reference system. In: G.R.J. Swennen, F. Schutyser, J.E. Hausamen (eds.): *Three-dimensional cephalometry. A color atlas and manual*. Heidelberg: Springer, pp. 94 – 112.
- Thompson, T. – Black, S. (2007): *Forensic Human Identification. An Introduction*. CRC Press. Taylor & Francis Group, LLC.
- Turaga, P. – Veeraraghavan, A. – Srivastava, A. – Chellappa, R. (2010): Statistical Computations on Grassmann and Stiefel Manifolds for Image and Video based Recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (in press).
- Urbanová, P. – Králík, M. – Mořkovský, T. – Čuta, M. (2010): Standard ver. 1.0. Masarykova univerzita. (v přípravě).
- Wills, M.A. – Briggs, D.E.G. – Fortey, R.A. (1994): Disparity as an evolutionary index: A comparison of Cambrian and Recent arthropods. *Paleobiology* 20: 93 – 130.
- Woodward, J.D. – Orlans, N.M. – Higgins, P.T. (2003): *Biometrics*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Zelditch, M.L. – Sheets, H.D. – Fink, W.L. (2003): The ontogenetic dynamics of shape disparity. *Paleobiology* 29: 139 – 156.

APPENDIX

Algoritmus úpravy longitudinálních dat

1) Výpočet polohy centroidu, souřadnice \bar{x} a \bar{y}

2) Výpočet velikosti centroidu (CS)

$$CS = \sqrt{\sum_{j=1}^k [(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2]}$$

3) Úprava velikostí konfigurací na CS=1

$$x_j' = \frac{x_j}{CS}$$

$$y_j' = \frac{y_j}{CS}$$

4) Superpozice bodů konfigurací na bod ležící v polovině vzdálenosti mezi body 3 a 4 (pravý a levý entokan-thion) umístěném v počátku soustavy souřadnic

$$x_j'' = x_j' - \frac{x_3 + x_4}{2}$$

$$y_j'' = y_j' - \frac{y_3 + y_4}{2}$$

5) Výpočet úhlu otočení vůči ose y

$$\alpha = \arccos\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

6) Otočení souřadnic podle úhlu α

$$x_j''' = x_j'' \cos \alpha + y_j'' \sin \alpha$$

$$y_j''' = -x_j'' \sin \alpha + y_j'' \cos \alpha$$

7) Standardizace stran

a) jednostranné význačné body ležící ve střední rovině

$$x_j^* = 0$$

$$y_j^* = y_j'''$$

b) oboustranné význačné body

$$x_j^* = \pm \frac{x_j + x_j}{2} \quad y_j^* = \frac{y_j + y_j}{2}$$

8) **Postup v případě výskytu chybějících dat**

1) Výpočet CS bez chybějících hodnot

2) Standardizace stran – viz bod 7 – výpočet poměru původních otočených x-souřadnic bodů 1 a 6 – x_1/x_6 – absolutní hodnota

3) Pokud chybí bod 20, pak
$$x_{20} = - \frac{x_{21} \left(\left| \frac{x_{18}}{x_{19}} \right| + 1 \right)}{2}$$

4) Pokud chybí bod 21, pak
$$x_{21} = \frac{x_{20} \left(\left| \frac{x_{19}}{x_{18}} \right| + 1 \right)}{2}$$

5) Pokud chybí bod 30, pak
$$x_{30} = - \frac{x_{31} \left(\left| \frac{x_{18}}{x_{19}} \right| + 1 \right)}{2}$$

6) Pokud chybí bod 31, pak
$$x_{31} = \frac{x_{30} \left(\left| \frac{x_{19}}{x_{18}} \right| + 1 \right)}{2}$$

y-souřadnice zůstávají stejné, tj. $y_{20} = y_{21}$, $y_{30} = y_{31}$

Výpočet nové hodnoty velikosti centroidu a úprava podle nové hodnoty

Missing	Missing	Missing
Odhad	Missing	Y-opačné strany
Missing	Odhad	X – výpočet poměru, doplněn
Odhad	Odhad	Průměr obou stran
OK	OK	Průměr obou stran
Odhad	OK	Y-opačné strany
OK	Odhad	X- průměr obou stran
Missing	OK	Y-opačné strany
OK	Missing	X – výpočet poměru, doplnění

Algoritmus úpravy průřezových dat

1) Výpočet polohy centroidu, souřadnice \bar{x} a \bar{y}

2) Výpočet velikosti centroidu (CS)

$$CS = \sqrt{\sum_{j=1}^k [(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2]}$$

3) Úprava velikostí konfigurací na CS=1

$$x_j' = \frac{x_j}{CS}$$

$$y_j' = \frac{y_j}{CS}$$

4) Superpozice bodů konfigurací na bod ležící v polovině vzdálenosti mezi body 3 a 4 (pravý a levý entokanthon) umístěném v počátku soustavy souřadnic

$$x_j'' = x_j' - \frac{x_3 + x_4}{2}$$

$$y_j'' = y_j' - \frac{y_3 + y_4}{2}$$

5) Výpočet úhlu otočení vůči ose y

$$\alpha = \arccos\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

6) Otočení souřadnic podle úhlu α

$$x_j''' = x_j'' \cos \alpha + y_j'' \sin \alpha \quad y_j''' = -x_j'' \sin \alpha + y_j'' \cos \alpha$$

7) Standardizace stran

a) jednostranné význačné body ležící ve střední rovině

$$x_j^* = 0 \quad y_j^* = y_j'''$$

b) oboustranné význačné body

$$x_j^* = \pm \frac{x_j + x_j}{2} \quad y_j^* = \frac{y_j + y_j}{2}$$

8) Výpočet polohy nového centroidu

9) Přesun konfigurací na společný centroid umístěný v počátku soustavy souřadnic

$$x_j^\# = x_j^* - \bar{x}$$

$$y_j^\# = y_j^* - \bar{y}$$