

# Geometrická a klasická morfometria

## Interdisciplinárny prístup

Stanislav Katina

<sup>1</sup>Ústav matematiky a statistiky  
Přírodovědecká fakulta  
Masarykova Univerzita v Brně

Prednášky z analýzy tvaru [blok 1], ZS 2011



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Obsah

- 1 Úvod
  - Úvodné definície a vymäzenie pojmov
  - Príklady z antropológie a zoológie
- 2 Klasifikácia (semi)landmarkov
  - Klasifikácia (semi)landmarkov v 2D
  - Klasifikácia (semi)landmarkov v 3D
- 3 Meranie súradníc (semi)landmarkov v 2D a v 3D
  - (Polo)automatické meranie súradníc (semi)landmarkov
  - Porovnanie merania v 2D a 3D prístupe
  - Reliabilita merania

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Prečo KM na opis nestačí?

- **geometrická morfometria (GM) a klasická morfometria (KM)** umožňujú pochopiť tvarovú rozmanitosť objektov na základe matematického opisu a modelovania ich tvaru
- opis tvaru pomocou *absolútnych rozmerov* (lineárnych – dĺžky, výšky, šírky, tetivy, kolmice; oblúkových a obvodových mier, obsahov a objemov) a
- *relatívnych rozmerov* (indexov)
- **tradičnými morfometrickými metódami nie je možné jednoducho graficky znázorniť tvar objektu, pretože medzi jednotlivými prvkami nie je zachovaný geometrický vzťah, a rozmery alebo uhly bez súradníc nestačia k zachyteniu geometrického tvaru objektu ako takého**

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Prečo KM na opis nestačí?

- **v dvojdimenzionálnom priestore (2D)** dve na seba kolmé dĺžkové miery, ktoré môžu byť súčasťou objektu:
  - 1 kruhu, trojuholníka, štvorca, kosoštvorca, lichobežníka alebo deltoidu
  - 2 elipsy, trojuholníka, obdĺžnika, kosodĺžnika, lichobežníka alebo deltoidu
- **v trojdimenzionálnom priestore (3D)** sú to tri na seba kolmé dĺžkové miery, ktoré môžu byť súčasťou objektu
  - 1 kocky, rovnoobežnostenu a kvapky vody
- dochádza tak k strate informácií o tvare ako celku

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Prečo KM na opis nestačí?

- **rekonštrukcia tvaru** by bola možná len vtedy, keby boli merané dĺžkové miery na objekte **komplexne triangulované**, triangulácia dopredu navrhnutá, *takže objekt by bolo možné takto z jednotlivých strán trojuholníkov spätne poskladať*
- takáto situácia je však prakticky nerealizovateľná pri takom komplexnom objekte ako je ľudská lebka
- za zjednodušenej situácie to však možné je

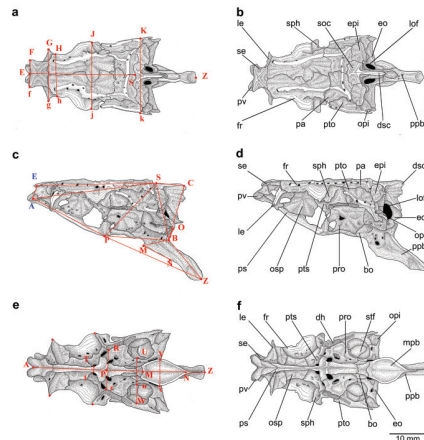
## GM vs KM

GM neurokránia rýb z rodu *belica*

- neurocrania–**roaches** *Rutilus rutilus* and *Rutilus virgo* (*Actinopterygii: Cyprinidae*)
- *R. rutilus* ( $n_{rr} = 30$ ) and *R. pigus* neurocrania ( $n_{rp} = 50$ ), 27 measurements

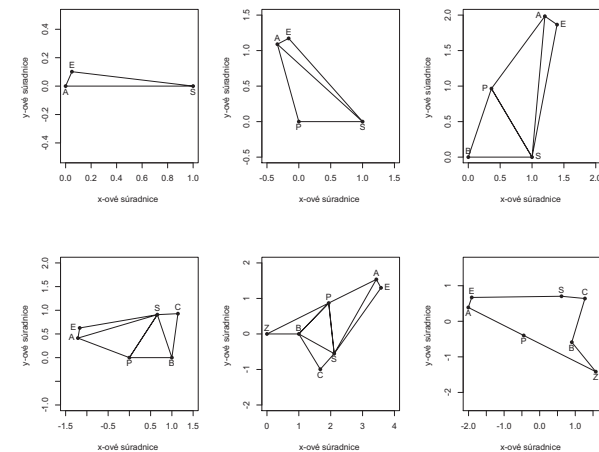
## GM vs KM

GM neurokránia rýb z rodu *belica*



## GM vs KM

GM neurokránia rýb z rodu *belica*



## GM vs KM

Prečo KM na opis nestačí?

- GM má teda oproti KM výhodu v tom, že poskytuje dobrú predstavu nielen o veľkosti objektu, ale najmä o jeho tvare
- **tvár** je pritom možné zobraziť **nezávisle na polohe, orientácii a veľkosti skúmaného objektu**
- v KM **nie je možné tvarovú zložku úplne oddeliť od veľkostnej**, skúmať ich oddelene, resp. dať ich do vzájomnej súvislosti, *lebo tradičné tvarové premenné sú vždy viac-menej závislé na inej premennej, ktorá určuje veľkosť daného objektu*
- v minulosti sa pri štandardizácii dĺžkových rozmerov (štandardizácii na veľkosť) používali mnohé z týchto mier

## GM vs KM

Prečo KM na opis nestačí?

- v KM každá dĺžková miera, na ktorú sa štandardizuje, dáva iné výsledky a konsenzus vzhľadom na to nebol možný
- v GM sa za tento konsenzus považuje **centroidová veľkosť** (Bookstein 1997)
- predstavuje aproximáciu obsahu (2D) alebo objemu (3D) opísaného objektu
- vypočíta sa ako suma euklidovských vzdialeností od súradníc (semi)landmarkov k súradniciam ich centroidu (aritmetickému priemeru súradníc)

## GM vs KM

Prečo KM na opis nestačí?

- ďalšia nevýhoda KM súvisí so **závislosťou meraných rozmerov**, lebo mnohé rozmery sa začínajú v rovnakom bode alebo sa čiastočne prekrývajú, preto sú silne závislé (korelované)
- navyše **dĺžkové miery** merané ako euklidovská vzdialenosť ich koncových bodov v podobe (semi)landmarkov **nemusia byť biologicky a/alebo geometricky homologické**, keďže ani niektoré (semi)landmarky nie sú biologicky a/alebo geometricky homologické
- KM má tiež **problém rozpoznať podstatu skutočnej variability**, najmä ak je k dispozícii len hodnota vzdialenosti medzi dvoma krajnými bodmi zisťovaného rozmeru

## GM vs KM

Prečo KM na opis nestačí?

- GM naopak umožňuje získať **podstatne väčší počet premenných** na sledovanom objekte, a to aj v prípade, keď je tvar daného objektu komplikovaný a KM sa lineárne rozmery nedajú získať
- lineárne rozmery je však možné vypočítať zo súradníc (semi)landmarkov
- z dĺžkových mier súradnice (semi)landmarkov získať možné nie je (s výnimkou komplexnej triangulácie objektu)

## GM vs KM

### Smery pokračujúcej diskusie

- 1 **klasifikovať chyby** súvisiace s meraním v geometrickej morfometrii
- 2 matematicky zadefinovať **Frankfurtskú horizontálu** a **mediánnu rovinu**
- 3 teoreticky diskutovať **reliabilitu** a **homológiu 3D merania súradníc** (semi)landmarkov na ľudskej lebke vo vzťahu k 2D a 3D klasifikácii (semi)landmarkov a vo vzťahu k lineárnym mieram na lebke, ktorých koncové body sú (semi)landmarky
- 4 klasifikovať **vybrané anatomické krivky a plochy** na ľudskej lebke,
- 5 sumarizovať **poloautomatizované a automatizované možnosti merania** rozmerov na ľudskej lebke
- 6 zjednotiť antropologickú, štatistickú a geometrickú terminológiu.

## GM vs KM

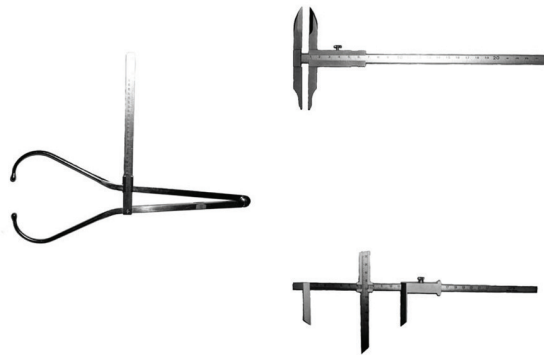
### Spôsoby merania a typy chýb

V KM sa na meranie používajú

- 1 **pomocné prístroje** – **kraniofor** (na nastavenie a držanie lebky orientovanej vo Frankfurtskej horizontále), **kovové ihlice** (na nastavenie príslušných priamok na lebke)
- 2 **meracie prístroje** – **dotykové meradlo (cefalometer)**, na meranie lineárnych rozmerov, napr. M1 – dĺžka lebky), **posuvné meradlo** (na meranie lineárnych rozmerov, napr. M52 – výška očnice), **koordinátové (hĺbkové) meradlo** (na meranie projekčných mier a hĺbok na lebke, napr. M20 – nadušná bregmatická výška), **uhlomer** (na meranie uhlov, napr. M73 – uhol profilu nosa), **mandibulometer** (na meranie rozmerov sánky, napr. M68 – dĺžka sánky), **pásové meradlo** (na meranie oblúkových a obvodových mier, napr. M27 – mediánny parietálny oblúk alebo M23 – horizontálny obvod lebky cez glabellu)

## GM vs KM

### Meracie prístroje



## GM vs KM

### Systematické chyby súvisiace s meraním

- A. **chyby spôsobené externými/environmentálnymi faktormi** – denná doba, intenzita svetla, vlhkosť prostredia a oblečenie
- B. **chyby prístroja** – presnosť merania prístroja
- C. **chyby merania** – chyby z odlišnej aplikácie techniky merania (rôzne pochopenie definície meranej miery), intraindividuálna a interindividuálna chyba (iné držanie prístroja, iný tlak aplikovaný pri meraní, iná orientácia lebky pri meraní a pod.)
- D. **chyby registrácie** – chyby z odčítania hodnôt z meracieho prístroja, chyby zo zápisu hodnôt do protokolu, chyby z prenosu hodnôt z protokolu do PC
- E. **chyby kalibrácie meracieho prístroja** (často sa používa aj anglický pojem „zero error“), napr. MicroScribe® G2.

## GM vs KM

### Faktory spôsobujúce chyby súvisiace s meraním

- pri systematických chybách v GM rozlišujeme skupiny (A) až (E), ale chyby registrácie sú minimalizované (registrácia nameraných hodnôt prebieha automaticky priamo z meracieho prístroja **MicroScribe® G2** do tabuľky v PC)
- v prípade merania v 3D geometrickom softvéri (napr. **Landmark, Amira, Edgewarp, EVAN Toolbox** a pod.) z (D) skupiny prichádza v GM do úvahy len jedna možnosť, a to iné poradie (semi)landmarkov pri rôznych lebkách, ktorú je možné tiež kontrolou odstrániť
- zmiešaním chýb (A) až (E) vzniká tzv. **kombinovaná systematická chyba**, ktorú nie je možné objektívne hodnotiť

## GM vs KM

### Faktory spôsobujúce chyby súvisiace s meraním

- problematické tiež je, keď sa **kombinujú miery** (na výpočet indexov ako aj v štatistických výpočtoch) **merané inými meracími prístrojmi s rôznou presnosťou merania** (zvyčajne od zlomku milimetra do 3 milimetrov)
- základným predpokladom zovšeobecnenej Procrustovskej analýzy (semi)landmarkov je **rovnaká chyba merania v smere všetkých troch osí (x, y a z)** v 3D
- **chyby registrácie** je možné minimalizovať manuálnou (vizuálnou) kontrolou zápisov alebo automatickou kontrolou v PC

## GM vs KM

### Faktory spôsobujúce chyby súvisiace s meraním

- pri meraniach všeobecne môžeme hovoriť aj o **náhodnej chybe**, ktorá je dôsledkom nesprávneho náhodného výberu, avšak pri antropologických meraniach na historických populáciách ide o špecifický problém, nakoľko pri pohrebiskách sa merajú všetky nájdené lebky
- keďže tento výber nie je možné ovplyvniť, **nemôžeme hovoriť o náhodnom výbere** v pravom slova zmysle
- výber je potom ovplyvnený len **dostatočnou zachovanosťou lebiek** a **veľkosťou kostrovej série**

## GM vs KM

### Biologická a geometrická homológia

#### Theorem (definícia; biologický kontext)

Dve morfologické štruktúry sú **biologicky homologické**, ak reprezentujú biologicky korešpondujúce časti organizmu vytvorené podľa rovnakého telesného plánu, boli vyvinuté z podobných embryonálnych substancií, a teda majú podobné základné štrukturálne a vývinové zákonitosti reflektujúce spoločný genetický fond a evolučné vzťahy.

## GM vs KM

Biologická a geometrická homológia

### Theorem (definícia; biometrický kontext)

**Homológia** je chápaná ako funkcia, ktorá dáva do vzťahu skôr bod s bodom radšej ako časť ku časti organizmu. Potom hovoríme o **biologicky homologických polohách bodov**, kde body sú súčasťou určitej časti organizmu korešpondujúce medzi organizmami. Tieto body sa nazývajú **význačné body (landmarky)** a je možné ich biologicky zmysluplne opísať pomocou matematickej deformácie bodu do iného bodu prostredníctvom nejakej funkcie (zvyčajne ide o Thin-Plate Splajn, TPS, metódu tenkých ohybných plátok).

## GM vs KM

Biologická a geometrická homológia

### Theorem (definícia; biometrický kontext)

Landmarky sú **geometricky homologické**, ak reprezentujú geometricky a matematicky korešpondujúce body.

Landmarky teda spájajú

- 1 geometriu meraných častí organizmu
- 2 matematickú deformáciu
- 3 biologickú interpretáciu

## Rudolf Martin's classification

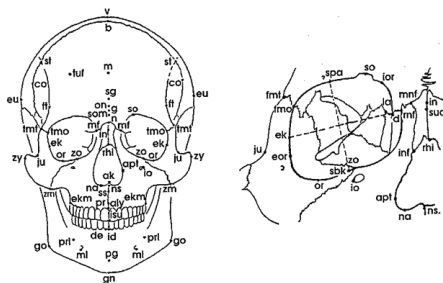
- classic system – nearly a century ago
- mainly list of endpoints for conventional distance or angle measurements
- planes and lines
- standardized views (frontalis, lateralis, verticalis, basilaris, occipitalis, sagittalis)
- lengths, widths, heights
- circumferences and surface arc length
- angles
- volumes and weights
- radii (distances of points to curves)
- indices (ratios)

## Rudolf Martin's classification

- a great diversity of points (landmarks) in one or more of those standardized views
- total number of different points – 68 [Figs 286–292]
- nowadays – 158 (including some synonyms)

## GM vs KM

### Norma frontalis

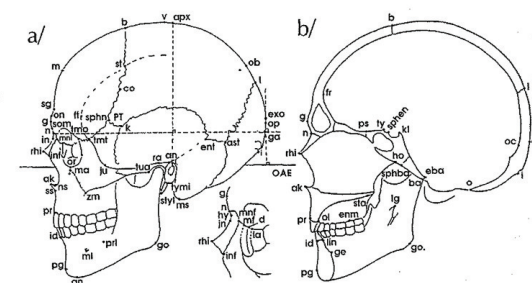


Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

### Norma lateralis



Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Skulls

### Předmostí skulls

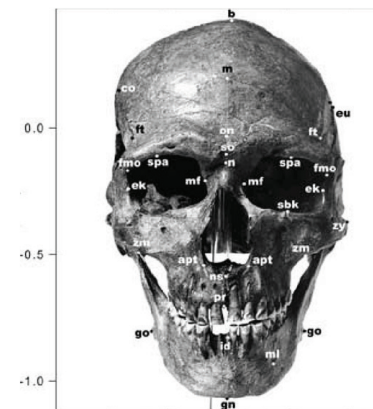
- professionally digitised glass plate negatives of fossil skulls (Předmostí 1 – P1, Předmostí 3 – P3, Předmostí 4 – P4, Předmostí 9 – P9, Předmostí 10 – P10)
- in the accessible norms: frontal, lateral sin., occipital, basal, and vertical views
- the skulls in question are those determined by Matiegka to have been females (P1, P4, P10) and males (P3, P9)
- **Katina, S., Šefčáková, A., Velemínská, J., Bružek, J., Velemínský, P., 2004: A Geometric approach to cranial sexual dimorphism in the upper palaeolithic skulls from Předmostí (Upper Palaeolithic, Czech Republic). *Journal of the National Museum, Natural History Series 173*, 1–4:133–144**

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Skulls

### Norma frontalis

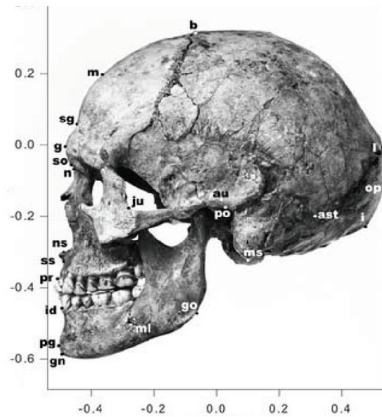


Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Skulls

### Norma lateralis



Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## UCLP

### Lateral x-rays of the UCLP patients heads

- lateral x-rays of the patients heads—**complete unilateral cleft of lip and palate (UCLP)**
- Velemínská J., **Katina, S.**, Šmahel, Z., Sedláčková, M., 2006: Analysis of facial skeleton shape in patients with complete unilateral cleft lip and palate: Geometric morphometrics. *Acta Chirurgiae Plasticae*, **48,1**: 26–32
- Velemínská J., Šmahel, Z., **Katina, S.**, 2006: Development prediction of sagittal intermaxillary relations in patients with complete unilateral cleft lip and palate during puberty. *Acta Chirurgiae Plasticae*, **49,2**: 41–46

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## UCLP

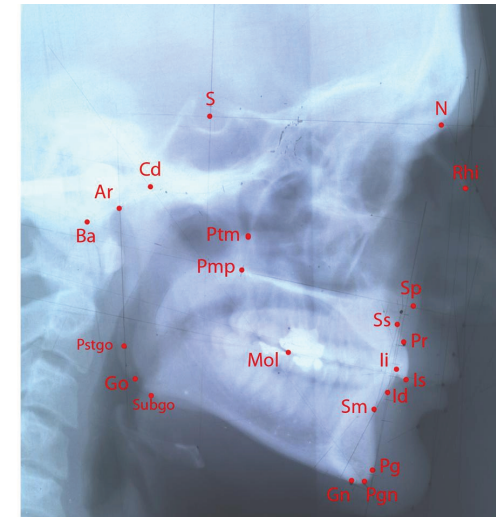
- 48 boys, **complete unilateral cleft of lip and palate (UCLP)**, without symptoms of other associated malformations, Clinic of Plastic Surgery in Prague
- **homogenously operated by the same team of surgeons** (cheiloplasty according to Tennison, periosteoplasty without the nasal septum repositioning)
- patients monitored during puberty, at the **ages of 10 and 15** (born between 1972 and 1978)
- **22 landmarks** (x-rays of the patients' heads, under standard conditions, SigmaScan Pro 5 software)

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## UCLP

### Norma lateralis



Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

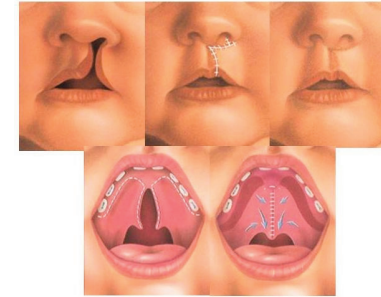


## UCLP Examples



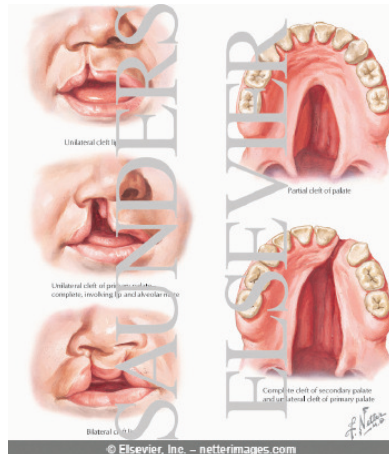
Obrázok: [www.craniofacial.net](http://www.craniofacial.net)

## UCLP Examples



Obrázok: <http://www.plasticsurgery.org>

## UCLP Examples



Obrázok: UCLP example

## Skulls

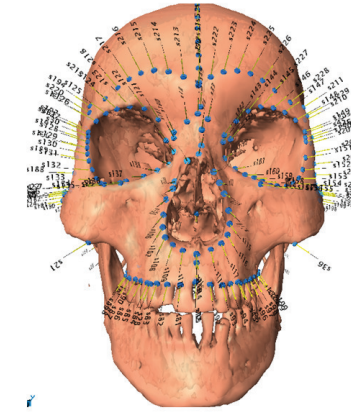
- example re-uses *part of a Vienna data set of 372 skulls from various collections*
- **106 human crania** (38 adult females, 54 males, 3 juvenile females, 11 juvenile males, 14 unknown sex; from newborns to adults)
- Dept. of Archaeological Biology and Anthropology, Natural History Museum, Vienna, Austria
- Dept. of Anthropology, University of Vienna, Vienna, Austria
- **Weisbach collection** - acquired and exhumed skeletons of soldiers of the Austro-Hungarian monarchy, sex and age of these crania are known from military records
- **Hallstatt collection** from ossuary in Hallstatt, sex and age are known from the church-books

## Skulls

- data – 347 landmarks and semilandmarks – 32 landmark points, 7 ridge curves totalling 161 semilandmarks and 154 surface semilandmarks [5 – base, 184 – face, 158 – neurocranium]
- landmark points on **both sides** of every cranium and semilandmarks (on curves and surface) **on the left side** of every cranium were digitalized using a MicroScribe 3DX (Mitteroecker et al, 2004, Gunz, 2005)
- **Katina, S.**, Bookstein, FL., Gunz, P., Schaefer, K., 2007: Was it worth digitizing all those curves? A worked example from craniofacial primatology. *American Journal of Physical Anthropology* Suppl. **44**: 140.

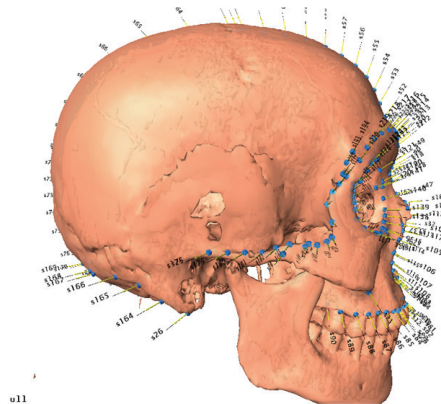
## Skulls

### Norma frontalis



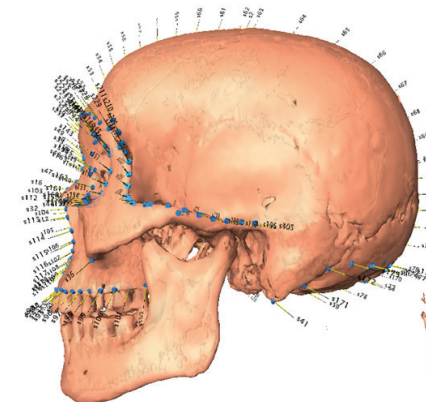
## Skulls

### Norma lateralis dex.



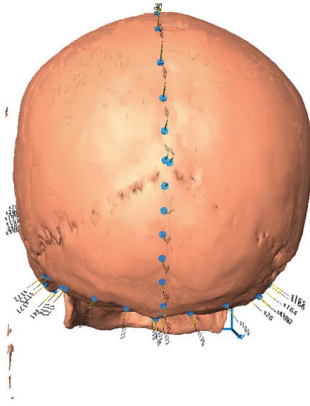
## Skulls

### Norma lateralis sin.



## Skulls

### Norma occipitalis

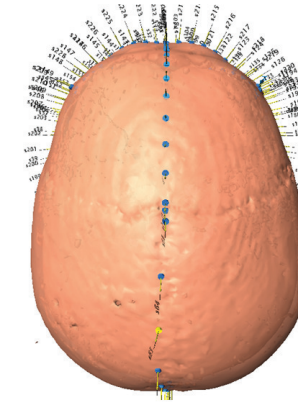


Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Skulls

### Norma verticalis

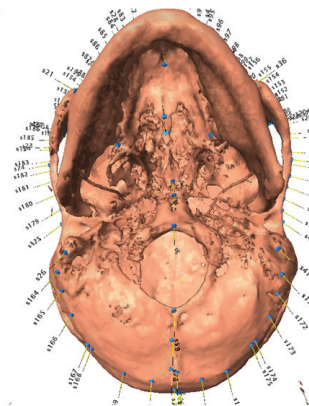


Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Skulls

### Norma basilaris



Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Growth of modern human mandible—3D, CTs

- CTs of **151 modern humans** (78 females and 73 males) of mixed ethnicity, living in France, from birth to adulthood [Pellegrin Hospital (Bordeaux), Necker Hospital (Paris) and Clinique Pasteur (Toulouse)]
- **each mandibular surface was reconstructed from the CT-scans** via the software package **Amira** (Mercury Computer Systems, Chelmsford, MA)
- open-source software **Edgewarp3D** (Bookstein & Green 2002), a **3D-template of 415 landmarks and semilandmarks** was created to measure the mandibular surface and was warped onto each mandible

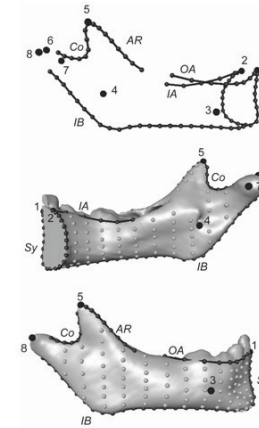
Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Growth of modern human mandible—3D, CTs

- Coquerelle, M., Bayle, P., Bookstein, F.L. Braga, J., Halazonetis, D.J., **Katina, S.**, Weber, G.W., 2010: Covariation between dental development and mandibular form changes: a study combining additive conjoint measurement and geometric morphometrics. *Journal of Anthropological Sciences* **88**: 129-150

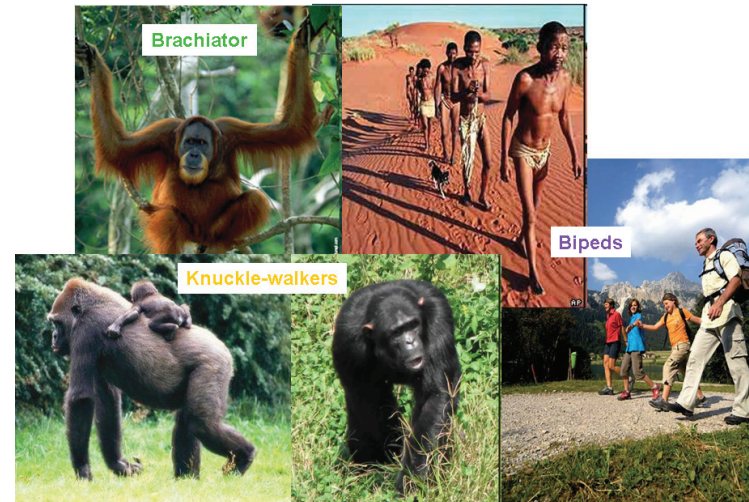
## Growth of modern human mandible—3D, CTs



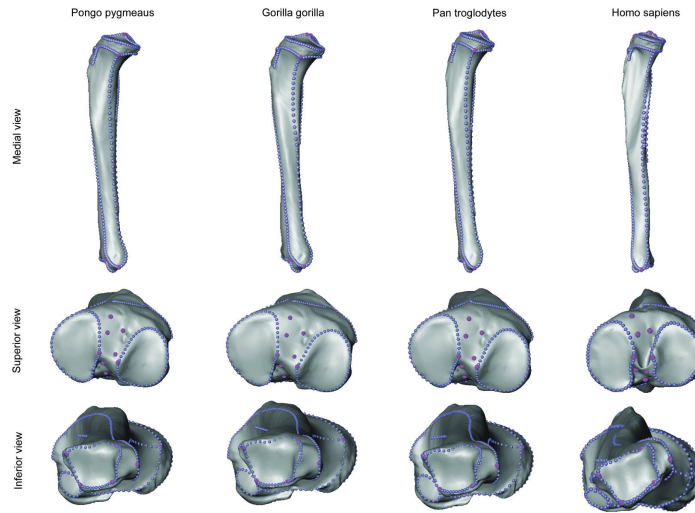
## Tibial shape analysis—3D, CTs

- 77 tibiae** of four extant primate species: *Homo sapiens*, *Gorilla gorilla*, *Pan troglodytes*, *Pongo pygmaeus*
- each tibial surface was reconstructed from the CT-scans** via the software package **Rapidform 2006**
- 15 landmarks and 500 semilandmarks**
- Frelat, M., **Katina, S.**, Weber, G.W., Bookstein, F.L., 2010: An affine-adjusted analysis of tibial shape in hominoids. *Journal of Anatomy*(accepted)

## Tibial shape analysis—3D, CTs



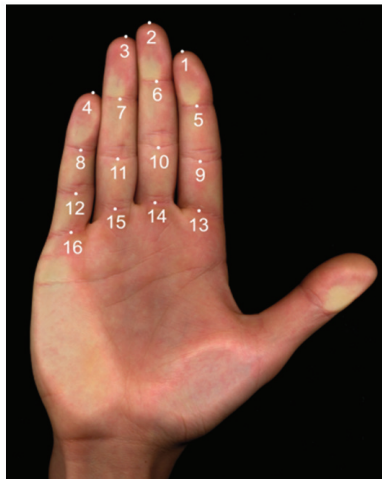
## Tibial shape analysis—3D, CTs



## Morphology of human hand

- two-dimensional morphology of **human hand in palmar view**
- hands recorded as **digital images** (TIFF format, 24 colours, 150dpi, 100)
- subjects—**100 females and 75 males**—recruited predominantly from population of college students of cities Brno and Ostrava (Czech Republic)
- **16 landmarks**
- Králik, M., **Katina, S.**, 2011: Distal Part of the Human Hand: Study of Form Variations and Sexual Dimorphism using Geometric Morphometrics. *Journal of Anatomy* (draft before submission)

## Morphology of human hand



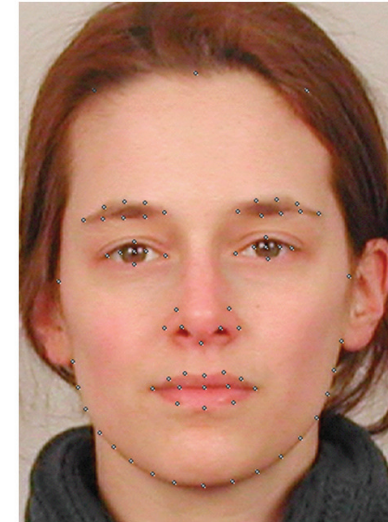
## Human faces in 2D

- Oberzaucher, E., **Katina, S.**, Holzleitner, I.J., Schmehl, S.F., Mehu-Blantar, I., Grammer, K., 2011: The myth of hidden ovulation: Shape and texture changes in the face during the menstrual cycle. *PNAS* (submitted)
- Pflüger, L.S., Oberzaucher, E., **Katina, S.**, Holzleitner, I.J., Mehu-Blantar The Signal of Fertility. Evidence from a Rural Sample. *Evolution and Human Behaviour* (accepted)

## Human faces in 2D

- **20 young women** (aged between 19 and 31) who reported to have a regular menstrual cycle and did not take any hormonal contraceptives
- **standardized facial photographs**—one taken in the **ovulatory** and one in the **luteal phase**
- in a **forced choice task**, **50 male and 50 female subjects** were presented with these photographs of each participant—to pick out the **more attractive, healthy, sexy, and likeable**, of the two
- **skin patches sized  $150 \times 150$  pixels** from the **cheek** and subjected them to the same forced choice task with slightly modified adjectives

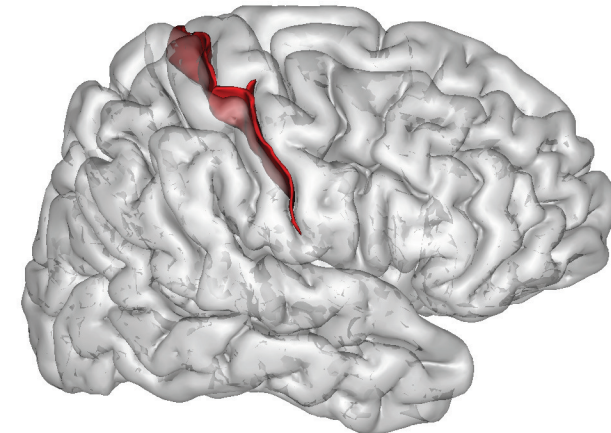
## 'Hidden' ovulation signals—2D, facial photographs



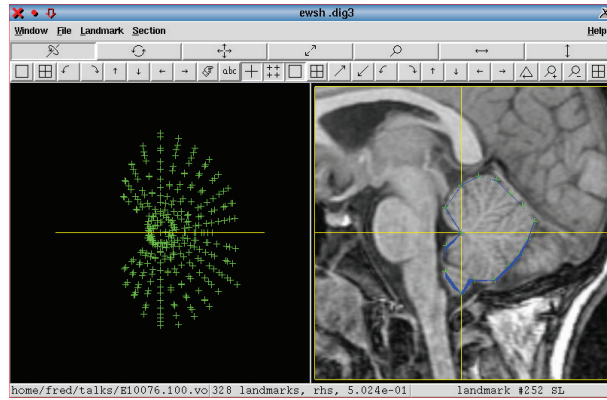
## Folding of human cortex

- **MRI and BrainVisa software**
- human brain folding patterns – cortical folds of **central sulcus**
- **62 left and right curves** following the bottom of central sulcus
- from **35 to 149 semilandmarks** on the curves

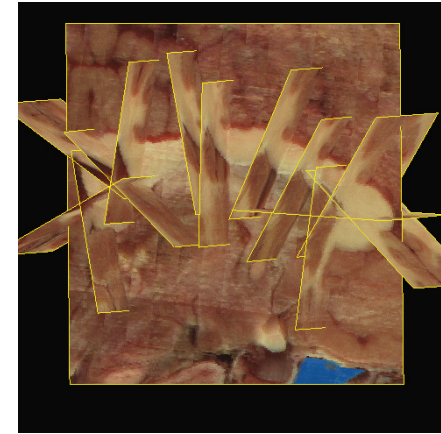
## Folding of human cortex



## Human brain again



## Human brain again

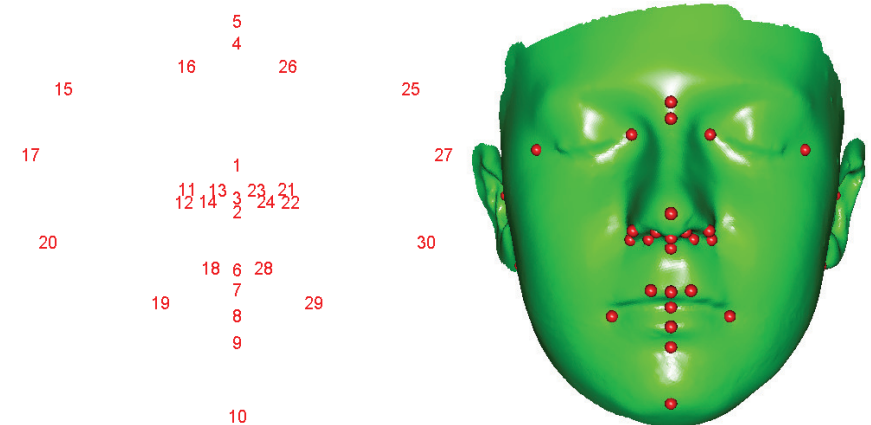


## 3D facial laser-scans – velocardiofacial syndrome

- 72 laser-scans of human faces
- 45 **velo-cardio-facial syndrome (VCFS)**; chromosome 22 deletion syndrome associated with very high risk of schizophrenia-like psychosis; 25 females and 20 males)
- 27 **controls** (14 females and 13 males; siblings or closed relatives of similar age)
- from these, after coupling, it remains 42 **pairs** (also after exclusion of several laser-scans with low quality)
- 23 **biologically homologous anatomical landmarks** and 1664 **geometrically homologous semilandmarks on curves and surface patches**
- **mesh** of 59242 points triangulated by 117386 **faces (triangulated mesh)**

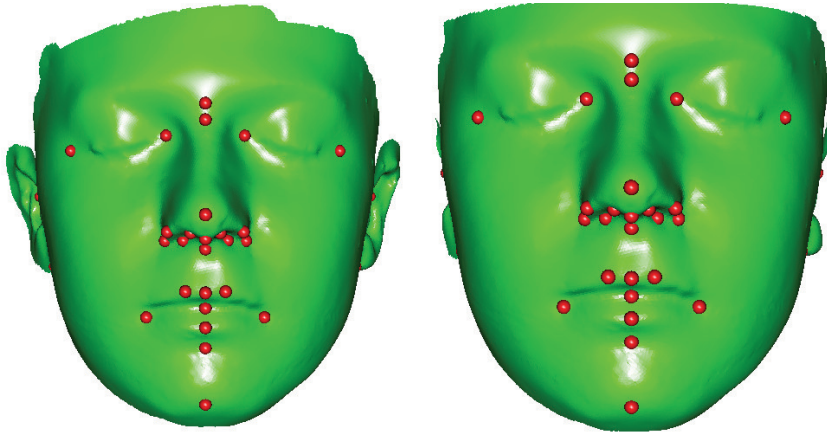
## 3D facial laser-scans

VCFS - -Royal College of Surgeons, Dublin, Ireland



## 3D facial laser-scans

VCFS - -Royal College of Surgeons, Dublin, Ireland

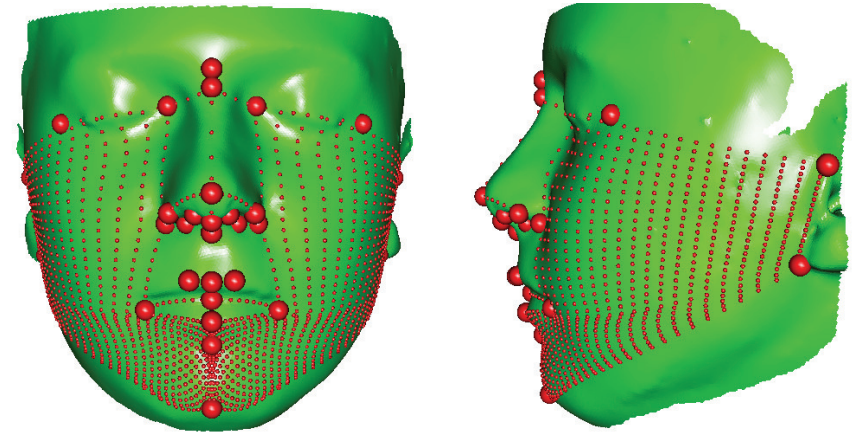


Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## 3D facial laser-scans

VCFS - -Royal College of Surgeons, Dublin, Ireland



Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## 3D face – stereo-camera capture

Control data – Dental clinic, The University of Glasgow, UK



Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## Eco-morphology of fishes

- Tomeček, J., Kováč, V., **Katina, S.**, 2005: Ontogenetic variability in external morphology of native (Canadian. and nonnative (Slovak. populations of pumpkinseed (*Lepomis gibbosus*, Linnaeus 1758. *Journal of Applied Ichthyology* **21**: 335 – 344
- Zahorská, E., Kováč, V, Falka, I., Beyer, K., **Katina, S.**, Copp, G.H., Gozlan, R., 2009: Morphological variability of the Asiatic cyprinid, topmouth gudgeon *Pseudorasbora parva*, in its introduced European range. *Journal of Fish Biology* **74**: 167 – 185
- Čápková, M., Zlatnická, I., Kováč, V., **Katina, S.**, 2008. Ontogenetic variability in external morphology of monkey goby, *Neogobius fluviatilis* (Pallas, 1814) and its relevance to invasion potential. *Hydrobiologia* **607**: 17-26
- Novomeská, A., **Katina, S.**, Copp, G.H., Pedicillo, G., Lorenzoni, M., Pompei, L., Cucherousset, J., Kováč, V., 2011: Morphological variability of black bullhead *Ameiurus melas* (Rafinesque, 1820) in its non-native European populations. *Journal of Fish Biology* (submitted)

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria



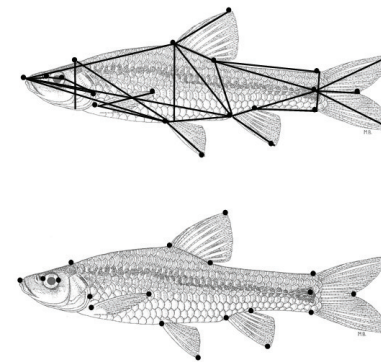
## Eco-morphology of fishes

Definície vybraných landmarkov – laterálny pohľad

1. total length (1–2)
2. standard length (1–3)
3. head length (1–4)
4. preorbital distance (1–5)
5. eye diameter (5–6)
6. postorbital distance (6–4)
7. head depth (7–8)
8. predorsal distance (1–9)
9. preventral distance (1–10)
10. preanal distance (1–11)
11. postdorsal distance (12–3)
12. V–A distance (10–11)
13. D–A distance (9–11)
14. D–adip distance (9–13)
15. adipA distance (13–11)
16. adip – post. A distance (13–14)
17. post. adip – C fin base (15–3)
18. C peduncle length (14–3)
19. C peduncle depth (14–16)
20. minimum body depth (17–18)
21. body depth (9–19)
22. D-fin depth (9–20)
23. V-fin depth (10–21)
24. A-fin depth (22–23)
25. C-fin depth (24–25)
26. D-fin length (9–12)
27. adip length (13–15)
28. A-fin length (11–14)
29. C-fin length (2–3)
30. P-fin length (26–27)
31. interorbital distance (28–29)
32. head width (30–31)

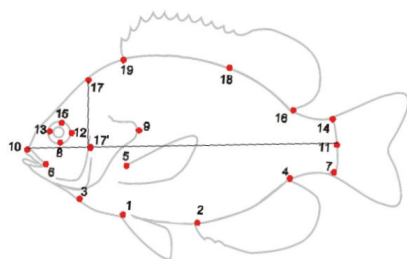
## Eco-morphology of fishes

Topmouth gudgeon (*Pseudorasbora parva*) – hrúzovec sieťovaný



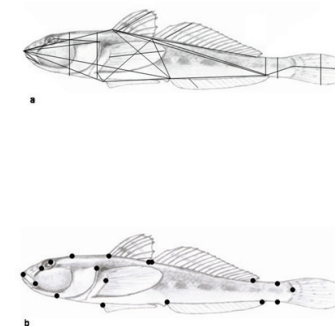
## Eco-morphology of fishes

Pumpkinseed (*Lepomis gibbosus*) – slnečnica pestrá



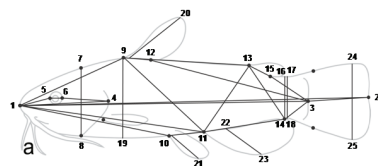
## Eco-morphology of fishes

Monkey goby (*Neogobius fluviatilis*) – býček hlavatý



## Eco-morphology of fishes

Black bullhead (*Ameiurus melas*) – sumček čierny

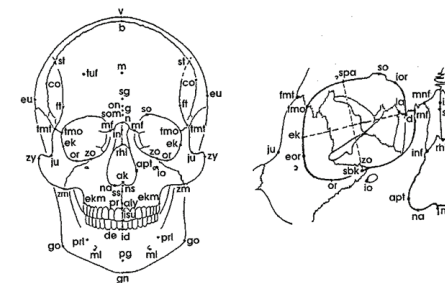


Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Norma frontalis

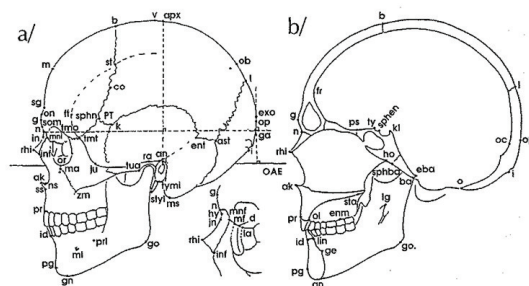


Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Norma lateralis



Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Definície vybraných landmarkov v mediálnej rovine (1)

- pr** – *prosthion* (1,3a) – bod na alveolárnom výbežku čeluste, ktorý vystupuje najviac dopredu medzi strednými rezákmi v mediálnej rovine.
- ss** – *subspinale* (1,2) – bod v mieste, kde predná dolná hrana *spina nasalis anterior* prechádza na prednú stenu *processus alveolaris* čeluste;
- ns** – *nasospinale* (1,6) – najhlbší bod spodného okraja *apertura piriformis* premietnutý do mediálnej roviny;
- rhi** – *rhinion* (1,1) – bod ležiaci na spodnom konci sutura internasalis;
- n** – *nasion* (1,3b) – priesečník *sutura nasofrontalis* s mediálnou rovinou;
- g** – *glabella* (3,6) – vpred vystupujúce miesto na okraji čelovej kosti, ktoré leží nad koreňom nosa (*sutura frontonasalis*) medzi *arcus superciliares*;
- m** – *metopion* (3,6) – bod na priesečníku spojnice najvyšších bodov čelových hrbolov s mediálnou rovinou;
- b** – *bregma* (1,1) – bod, v ktorom sa stretáva *sutura sagittalis* so *sutura coronalis*.

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

### Definície vybraných landmarkov v mediánnej rovine (2)

9. ***l*** – *lambda* (1,1) – bod, v ktorom sa stretávajú obe ramená *sutura lambdaidea* so *sutura sagittalis*;
10. ***i*** – *inion* (1,3b) – bod ležiaci v mieste, v ktorom sa obe *lineae nuchae superiores* spájajú;
11. ***op*** – *opisthocranium* (3,4) – najposteriórnejší bod na záhlavnej kosti ležiaci v mediánnej rovine;
12. ***o*** – *opisthion* (2,3a) – bod na zadnom okraji *foramen magnum* v mieste, kde ním prechádza mediánna rovina;
13. ***ba*** – *basion* (2,3a) – bod na prednom okraji *foramen magnum* v mieste, kde ním prechádza mediánna rovina;
14. ***sphba*** – *sphenobasion* (1,3b) – priesečník *synchondrosis sphenoccipitalis* s mediánnou rovinou;
15. ***ho*** – *hormion* (1,6) – priesečník miesta, kde nasadá zadný okraj *vomeru* na telo klinovej kosti s mediánnou rovinou medzi *ala vomeris*;
16. ***sta*** – *staphylion* (1,6) – bod v zadnej časti tvrdého podnebia, v ktorom sa kríži priamka spájajúca v najužšom mieste zadné okraje obidvoch podnebných kostí s mediánnou rovinou;

## GM vs KM

### Definície vybraných landmarkov v mediánnej rovine (3)

17. ***sr*** – *saurian (palate)* (1,1) – bod na priesečníku *sutura palatina mediana* a *sutura palatina transversa*;
18. ***fi*** – *foramen incisivum* (1,3a) – priesečník *sutura palatina mediana* a zadného okraja *foramen incisivum*;
19. ***ol*** – *orale* (3,3b) – bod ležiaci na prednom okraji tvrdého podnebia, v ktorom sa kríži priamka spájajúca zadné okraje alveol oboch horných stredných rezákov s mediánnou rovinou;
20. ***id*** – *infradentale* (1,3b) – bod medzi strednými rezákmi sánky, v ktorom sa kríži predná hrana alveolárneho výbežku s mediánnou rovinou;
21. ***gn*** – *gnathion* (3,4) – najinferiornejší bod na dolnom okraji sánky v mediánnej rovine;
22. ***pg*** – *pogonion* (3,4) – najvyšší bod (najanteriórnejší) bod *protuberantia mentalis* v mediánnej rovine;
23. ***me*** – *menton* (3,3b) – najposterioro-inferiornejší bod na symfýze sánky v mieste dotyku línie vychádzajúcej z bodu *go*.

## GM vs KM

### Definície vybraných bilaterálnych landmarkov (1)

1. ***psa*** – *pseudoalare* (1,3c) – bod, kde sa stretáva *sutura nasomaxillaris* s *apertura piriformis*;
2. ***mnf*** – *maxillonasofrontale* (1,1) – bod ležiaci v miestach, kde sa stretávajú švy – *sutura frontonasalis*, *sutura frontomaxillaris* a *sutura nasomaxillaris*;
3. ***mf*** – *maxillofrontale* (1,3c) – bod na vnútornom okraji očnice (*crista lacrimalis anterior* – jej predĺženie), ktorým prechádza *sutura frontomaxillaris*;
4. ***d*** – *dakryon* (1,1) – bod na vnútornom okraji očnice, v ktorom sa spája čelová kosť s čelovým výbežkom hornej čeluste a slznej kosti;
5. ***fmo*** – *frontomalare orbitale* (1,3c) – bod na laterálnom okraji očnice, v ktorom ho pretína *sutura frontozygomatica*;
6. ***fmt*** – *frontomalare temporale* (1,3c) – najlaterálnejší bod *sutura frontozygomatica*, v mieste, kde bočná plocha *processus zygomaticus* čelovej kosti prechádza do zadnej plochy;
7. ***zo*** – *zygoorbitale* (1,3c) – priesečník dolného okraja očnice so *sutura zygomaticomaxillaris*;

## GM vs KM

### Definície vybraných bilaterálnych landmarkov (2)

8. ***or*** – *orbitale* (3,4) – najnižší bod spodného okraja očnice;
9. ***ek*** – *ektokonchion* (3,4) – bod na laterálnom okraji očnice v mieste, kde ho pretína priamka vychádzajúca z bodu *mf* a rovnobežná s horným okrajom očnice;
10. ***zm*** – *zygomaxillare* (1,3c) – najvyššie položený bod *sutura zygomaticomaxillaris*;
11. ***ju*** – *jugale* (2,4) – bod v uhle, ktorý zviaza *processus frontalis* a *processus temporalis* jarmovej kosti;
12. ***zy*** – *zygion* (3,5) – najlaterálnejšie položený bod na jarmovom oblúku;
13. ***sz*** – *superior zygomaticum* (1,3c) – najsuperiórnejší bod ležiaci na *sutura zygomaticotemporalis*;
14. ***ft*** – *frontotemporale* (3,4) – bod nad *processus zygomaticus* čelovej kosti v najhlbšom mieste konkávneho prehnutia *linea temporalis (superior)*;
15. ***st*** – *stephanion* (1,3c) – bod, v ktorom *sutura coronalis* kríži *linea temporalis*;

## GM vs KM

### Definície vybraných bilaterálnych landmarkov (3)

16. **au** – *auriculare* (3,4) – najlaterálnejší bod ležiaci na koreni jarmového oblúka, kolmo nad stredom *porus acusticus externus*;
17. **po** – *porion* (1,6) – bod v strede *porus acusticus externus*;
18. **eu** – *euryon* (3,5) – najlaterálnejší bod mozgovne;
19. **ast** – *asterion* (1,1) – bod v mieste dotyku švov *sutura lambdoidea*, *sutura occipitomastoidea* a *sutura parietomastoidea*;
20. **ms** – *mastoideale* (2,2) – bod ležiaci najnižšie na vonkajšej strane hrotu *processus mastoideus*;
21. **pa** – *postalveolare* (3,4) – bod ležiaci na najposteriórnejšom konci alveolárneho hrebeňa;
22. **cb** – *canine base* (3,4) – bod ležiaci v strede alveol.okraja očného zuba;
23. **ekm** – *ektomolare* (3,5) – najlaterálnejší bod na vonkajšej ploche alveolárneho hrebeňa čeľuste;
24. **ml** – *mentale* (3,4) – najnižší bod na obvode *foramen mentale*;
25. **go** – *gonion* (3,4) – bod na uhle sánky, v ktorom sa spája spodný okraj tela a zadný okraj ramena sánky, orientovaný najviac inferiórne, posteriórne a laterálne.

## GM vs KM

### Klasifikácia landmarkov v 2D (1)

- Typ 1** – **diskrétna juxtapozícia štruktúr** – význačné body, kde sa tri štruktúry stretávajú; body rozvetvenia stromovitých (konárovitých) štruktúr; centrá alebo centroidy „dostatočne malých“ inklúzií (pokiaľ možno konvexné); priesečníky predĺžení kriviek s rovinami symetrie, landmarky typu 1 môžu byť aj hybridy s typom 3
- Typ 2** – **maximá krivosti alebo iné lokálne morfometrické štruktúry** – hroty výbežkov a pod., landmarky typu 1 môžu byť aj hybridy s typom 2 ako špička rezáka a pod.
- Typ 3** – **extrémne body** – koncové body dĺžkových mier, centroidy, prieniky medzi landmarkových segmentov, body najvzdialenejšie od týchto segmentov, konštrukcie zahŕňajúce kolmé projekcie a rovnako vzdialené radiálne úseky, landmarky na obryse môžu byť hybridy typu 2 a typu 3

## GM vs KM

### Klasifikácia landmarkov v 2D (2)

- Typ 1** – **diskrétna juxtapozícia štruktúr** – *prosthion*, *subspinale*, *nasospinale*, *rhinion*, *nasion*, *bregma*, *lambda*, *inion*, *sphenobasion*, *hormion*, *staphylion*, *saurian (palate)*, *foramen incisivum*, *pseudoalare*, *maxillonasofrontale*, *maxillofrontale*, *dakryon*, *frontomalare orbitale*, *frontomalare temporale*, *zygoorbitale*, *zygomaxillare*, *superior zygomaticum*, *stephanion*, *porion*, *asterion* a *infradentale*
- Typ 2** – **maximá krivosti alebo iné lokálne morfometrické štruktúry** – *opisthion*, *basion*, *jugale* a *mastoideale*
- Typ 3** – **extrémne body** – *gnathion*, *pogonion*, *menton*, *glabella*, *metopion*, *opisthocranion*, *orale*, *orbitale*, *ektokonchion*, *frontotemporale*, *zygion*, *euryon*, *auriculare*, *orale*, *postalveolare*, *canine base*, *ektomolare*, *mentale* a *gonion*

## GM vs KM

### Klasifikácia (semi)landmarkov v 3D (1)

#### Theorem (definícia)

Landmarky ako súčasť anatomických kriviek a plôch sú nazývané **semilandmarky**, t.j. landmarky medzi landmarkami (pojmem (semi)landmark zahŕňa v sebe landmark aj semilandmark).

## GM vs KM

Klasifikácia (semi)landmarkov v 3D (2)

- Typ 1** – *diskrétna juxtapozícia štruktúr*;
- Typ 2** – *extrémny krivosti charakterizujúce jednoduché štruktúry*;
- Typ 3** – *landmarky charakterizované lokálne ako priesečníky dvoch alebo viacerých anatomických kriviek a plôch a symetriou* –
  - Typ 3a* – *priesečníky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a mediánnej roviny na tej istej ploche*;
  - Typ 3b* – *priesečníky nejakej pozorovanej krivky (alebo priamky) a mediánnej roviny*;
  - Typ 3c* – *priesečníky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a nejakej pozorovanej krivky na tej istej ploche*;
- Typ 4** – *(semi)landmarky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a symetrickej krivky (v mediánnej rovine)*;
- Typ 5** – *(semi)landmarky na plochách*;
- Typ 6** – *skonštruované (semi)landmarky* .

## GM vs KM

Klasifikácia (semi)landmarkov v 3D (3)

- Typ 1** – *diskrétna juxtapozícia štruktúr* – *rhinion, bregma, lambda, saurian (palate), maxillonasofrontale, dakryon a asterion*;
- Typ 2** – *extrémny krivosti charakterizujúce jednoduché štruktúry* – *subspinale a mastoideale*;
- Typ 3** – *landmarky charakterizované lokálne ako priesečníky dvoch alebo viacerých anatomických kriviek a plôch a symetriou* –
  - Typ 3a* – *priesečníky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a mediánnej roviny na tej istej ploche* – *prosthion, opisthion, basion a foramen incisivum*;
  - Typ 3b* – *priesečníky nejakej pozorovanej krivky (alebo priamky) a mediánnej roviny* – *nasion, inion, sphenobasion, orale, infradentale a menton*;
  - Typ 3c* – *priesečníky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a nejakej pozorovanej krivky na tej istej ploche* – *pseudoalare, maxillofrontale, frontomolare orbitale, frontomolare temporale, zygoorbitale, zygomaxillare, stephanion a superior zygomaticum*;

## GM vs KM

Klasifikácia (semi)landmarkov v 3D (4)

- Typ 4** – *(semi)landmarky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a symetrickej krivky (v mediánnej rovine)* – *opisthocranion (hybrid, typ 6), orbitale, ektokonchion (hybrid, typ 6), jugale (hybrid, typ 2), frontotemporale, auriculare (hybrid, typ 6), postalveolare, canine base, gnathion (hybrid, typ 5), pogonion (hybrid, typ 5), mentale a gonion (hybrid, typ 2)*;
- Typ 5** – *(semi)landmarky na plochách* – *zygion, euryon a ektomolare*;
- Typ 6** – *skonštruované (semi)landmarky* – *nasospinale (hybrid, typ 3a), glabella, metopion, hormion, staphylion a porion (hybrid, typ 1)*.

## GM vs KM

Klasifikácia anatomických kriviek v 3D (1)

### Theorem (definícia)

**Pozorovaná krivka** je krivka, ktorá vzniká ako prienik dvoch hladkých anatomických plôch alebo ako prienik hladkej analytickej plochy s rovinou (napr. s rovinou symetrie).

### Theorem (definícia)

**Chrbtová (hrebeňová) krivka** je krivkou, ktorej zakrivenie kolmé na jej smer je maximálne v tomto smere.

### Theorem (definícia)

**Symetrická krivka** je krivka, ktorej odhad pomocou metódy najmenších štvorcov (MNS) patrí do mediánnej roviny.

## GM vs KM

### Klasifikácia anatomických kriviek v 3D (2)

- **pozorované krivky** – lebečné švy, symfýza sánky a obrys lebky v 2D projekcii;
- **chrbtová (hrebeňová) krivky** – hrana *arcus superciliaris*, hrana *apertura piriformis*, hrana orbity, alveolárny hrebeň, hrana sánky;
- **symetrické krivky** – symfýza sánky a *sutura sagittalis*

## GM vs KM

### Klasifikácia anatomických kriviek v 3D (3)

- **alveolárna krivka** (sin./dex.) – krivka pozdĺž vonkajšieho okraja alveolárneho oblúka, začínajúca sa v bode *prosthion*, pokračujúca cez *canine base* do *postalveolare*;
- **krivka hruškovitého otvoru**, sin./dex.) – krivka pozdĺž okraja/hrany *apertura piriformis*, začínajúca sa v bode *rhinion* a končiaca sa v bode *nasospinale*;
- **očnicová krivka** (sin./dex.) – krivka pozdĺž hrany očnice, začínajúca sa v *maxillofrontale*, pokračujúca cez *frontomalare orbitale*, *zygoorbitale* a končiaca sa opäť v *maxillofrontale*;
- **krivka arcus superciliaris (krivka obočného oblúka)**, sin./dex.) – krivka začínajúca v bode *glabella*, pokračujúca pozdĺž *torus superciliaris* do *frontomalare temporale*;

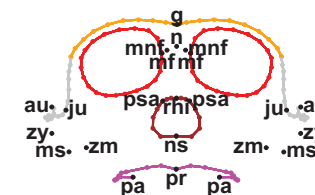
## GM vs KM

### Klasifikácia anatomických kriviek v 3D (4)

- **zygomatická krivka (krivka jarmového oblúka)**, sin./dex.) – krivka z bodu *auriculare*, pokračujúca po hornej hrane *arcus zygomaticus* a cez *jugale* do koncového bodu *frontomalare temporale*;
- **nuchálna krivka** (sin./dex.) – krivka začínajúca sa v bode *mastoideale*, pokračujúca po *lineae nuchae superiores* a končiaca v bode *inion*;
- **mediánna krivka** – krivka prieniku mediánnej roviny s plochou lebky začínajúca sa v bode *rhinion*, potom prechádzajúca cez body *nasion*, *glabella*, *metopion*, *bregma* a *inion*, končiaca sa v bode *opisthion*.

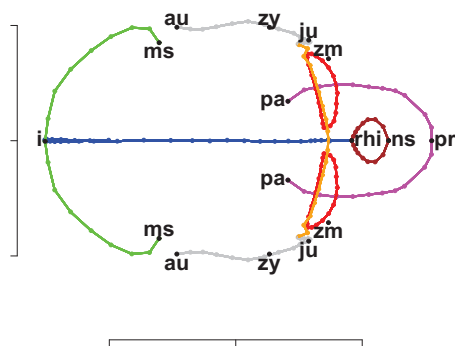
## GM vs KM

### Norma frontalis



## GM vs KM

Norma verticalis

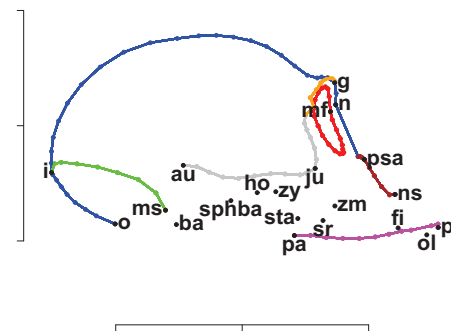


Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Norma lateralis dex.



Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Klasifikácia anatomických kriviek v 3D (5)

- očnévová krivka patrí medzi **uzavreté krivky**
- ostatné sú **otvorené krivky**, kde sú koncové body buď *fixované* alebo *otvorené* v závislosti od toho, či je optimalizácia (relaxácia) polohy koncových bodov povolená alebo nie
- mediánna krivka je typom **nepárovej krivky**
- všetky ostatné sú **párové krivky**

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

Klasifikácia anatomických plôch v 3D (1)

### Theorem (definícia)

**Anatomická plocha** je plocha na objekte (lebký) definovaná dostatočným množstvom geometricky homologických semilandmarkov.

Stanislav Katina

Geometrická a klasická morfometria

## GM vs KM

### Klasifikácia anatomických plôch v 3D (2)

#### Theorem (definícia)

**Hranice uzavretej (úplne ohraničenej) anatomickej plochy** tvoria výhradne (semi)landmarky, anatomické krivky alebo prienik plochy s rovinou symetrie.

#### Theorem (definícia)

**Hranice čiastočne otvorenej (čiastočne ohraničenej) anatomickej plochy** musia obsahovať aspoň jednu časť definovanú len semilandmarkami na ploche, kde nie je hranicou ani krivka a ani rovina symetrie.

## GM vs KM

### Klasifikácia anatomických plôch v 3D (3)

- **Klasická plocha** (softvér Landmark), je plocha, kde je možné súradnice bodov na ploche pomocou deviatich kontrolných bodov merať a navyše určiť množstvo rovnomerne rozdelených bodov medzi kontrolnými bodmi.
- **Flexibilná plocha** je plocha, kde je možno hranice plochy modifikovať pomocou ďalších kontrolných bodov medzi deviatimi bodmi z klasickej plochy.

## GM vs KM

### Klasifikácia anatomických plôch v 3D (4)

- **čelová plocha** – ohraničená *torus superciliaris* krivkou, *linea temporalis* a *sutura coronalis*
- **nosová plocha** (plocha nosových kostí) (sin./dex.) – ohraničená *sutura internasalis*, *sutura frontonasalis* a *suturae nasomaxillares*
- **maxilárna plocha** (sin./dex.) – ohraničená krivkou hrany *apertura piriformis*, *sutura frontomaxillare*, očnicovou krivkou, *sutura zygomaticomaxillaris*, alveolárnou krivkou a prienikom plochy *os maxillare* s mediánnou rovinou
- **zygomatická plocha** (sin./dex.) – ohraničená *sutura zygomaticomaxillaris*, očnicovou krivkou, *sutura frontozygomatica*, zygomatickou krivkou a *sutura zygomaticotemporalis*

## GM vs KM

### Klasifikácia anatomických plôch v 3D (5)

- **parietálna plocha** (sin./dex.) – ohraničená *linea temporalis*, *sutura coronalis*, prienikom plochy neurokránia s mediánnou rovinou, nuchálnou krivkou
- **temporálna plocha** (sin./dex.) – plocha *os temporale*
- **okcipitálna plocha** (sin./dex.) – plocha *os occipitale*
- **plocha podnebných kostí** (sin./dex.) – plocha *os palatinum*
- **plocha sánky** – plocha mandibuly



## GM vs KM

### Klasifikácia anatomických plôch v 3D (6)

- plocha čelovej kosti a sánky sú **nepárovými plochami**, ale dajú sa rozdeliť mediánou rovinou na dve párové časti, v prípade sánky symfýzou)
- ďalšie plochy sú **plochy párové**
- čelová, nosová, maxilárna, zygomatická, parietálna plocha, plocha podnebia a plocha sánky sú **plochy uzavreté**
- okcipitálna a temporálna sú **plochy čiastočne otvorené**
- plochy môžeme získať použitím **MicroScribe® G2** ako oblak alebo sieť bodov, ktorý je potrebné následne matematicky spracovať
- alebo z **CT**, kde je nutné na segmentáciu kosti použiť špecifický „threshold“ alebo kosť manuálne segmentovať napr. v programe **Amira**; výstupom je potom napr. súbor „.obj“, ktorý obsahuje plochu lebky v podobe súradníc bodov, popisuje trianguláciu tejto plochy, príp. normály v bodoch a pod.

## GM vs KM

### Poloautomatické a automatické meranie (1)

Je možné merania poloautomatizovať alebo úplne automatizovať?

- **poloautomatické meranie súradníc** je meranie vykonávané v PC v nejakom 3D softvéri (napr. *Landmark*, *Amira*, *Edgewarp* a *EVAN Toolbox*)
- toto meranie môže byť spresnené
  - pohľadom na viaceré 2D normy súčasne (*Edgewarp* a *EVAN Toolbox*)
  - rotáciou 3D objektu v rovine rovnobežnej s pohľadom (*Landmark*),
  - zobrazovaním normál meraných bodov (*Landmark*) alebo
  - možnosťou pridania jednej dimenzie v podobe napr. farebne rozlíšeného znamienka krivosti (*Landmark*)
- možnosť práce s krivkami (*Landmark*), kde je možné súradnice bodov na krivke pomocou troch kontrolných bodov merať, ako aj určiť množstvo ekvidistantných bodov na krivke, resp. v prípade potreby časti kriviek spájať do jednej krivky

## GM vs KM

### Poloautomatické a automatické meranie (2)

- **Automatizované meranie súradníc** je meranie vykonávané v PC len pomocou nejakého matematického algoritmu, kde automatizácia striktné závisí od toho, či je matematický algoritmus presnejší a či je ho možné vôbec použiť.
- použiteľnosť – závisí aj od toho, nakoľko je 3D rekonštrukcia (použitím MicroScribe® G2, laser-skenera, stereogrametrického kamerového systému alebo CT a pod.) vierohodná, teda ako sa podobá originálu lebky
- dôležitým kritériom je, či sa dá výpočtom doceliť **geometrickú homológiu (semi)landmarkov** na anatomických krivkách a plochách v celom náhodnom výbere – **zovšeobecnenie geometrickej homológie landmarkov na krivky a plochy** definované pomocou (semi)landmarkov

## GM vs KM

### Poloautomatické a automatické meranie (3)

#### Theorem (definícia)

**Geometrická homológia (semi)landmarkov na krivke** – v zmysle minimalizácie nejakého matematického kritéria (ohybovej energie TPS alebo Procrustovskej vzdialenosti), kde sa bod posúva po krivke dovtedy, pokiaľ jeho poloha (ako argument minimalizácie) nebude v zmysle kritéria optimálna. Preto hovoríme aj o optimalizácii polohy bodu na krivke.

- **ekvidistantne vzdialené body na krivke nie sú geometricky homologické**
- aj napriek tomu však krivky ako celky môžu byť **biologicky homologické** (napr. lebečné švy)

## GM vs KM

Poloautomatické a automatické meranie (4)

Optimalizácia polohy bodov na krivke na nejakom objekte sa deje vždy **vo vzťahu k nejakej referenčnej krivke** a ide o **iteračný proces**:

- 1 **zovšeobecnená Procrustovská superimpozícia** (ZPS; Generalized Procrustes Analysis, GPA)
- 2 nájdu sa optimálne polohy bodov všetkých kriviek vo vzťahu k **prvému odhadu Procrustovského priemeru**
- 3 ďalšia ZPS atď. až dovtedy, pokiaľ rozdiel predposledného a posledného kroku je menší (v zmysle poklesu matematického kritéria) ako nejaké dostatočne malé číslo (prah, threshold)

Podobný algoritmus sa aplikuje aj na **body na ploche**

## GM vs KM

Porovnanie pozitív a negatív merania v 2D a 3D prístupe (1)

Metodika merania súradníc (semi)landmarkov a výpočtu ich reliability na 2D fotografiách ako projekciách šiestich pohľadov (frontálny, laterálny sin. a dex., bazálny, vertikálny, sagitálny a okcipitálny) je problematická z viacerých uhlov pohľadu

- rotácia lebky o uhol  $\pm 5^\circ$  od jednej z vyššie spomenutých šiestich rovín kolmých na rovinu pohľadu vedie k umelým optickým deformáciám, ktoré skutočnú variabilitu merania značne skresľujú
- z toho dôvodu nie je možné hovoriť o kolmých (ortogonálnych) projekciách lebky do rovín kolmých na rovinu pohľadu
- je možné tieto roviny približne odhadnúť len z 3D rekonštrukcie lebky pomocou (semi)landmarkov, teda **striktne matematicky**, ako roviny najbližšie k množine vybraných (semi)landmarkov v zmysle metódy najmenších štvorcov (MNS)

## GM vs KM

Porovnanie pozitív a negatív merania v 2D a 3D prístupe (2)

### Theorem (definícia)

**Frankfurtská horizontála** – MNS rovina štatisticky odhadnutá zo súradníc štyoch bodov *porion sin. a dex. a bodov orbitale sin. a dex.*

### Theorem (definícia)

**Mediánna rovina** – MNS rovina štatisticky odhadnutá zo súradníc všetkých nepárových (semi)landmarkov.

## GM vs KM

Porovnanie pozitív a negatív merania v 2D a 3D prístupe (3)

Nepresnosť manuálneho stanovenia **Frankfurtskej horizontály** vyplýva z porušenia teoretického predpokladu geometrie štyroch bodov v rovine, kde úsečky *porion sin. – orbitale sin. a porion dex. – orbitale dex.* nemusia ležať v jednej rovine (a spravidla neležia, čo sa dá preveriť jedine matematicky, nakoľko nie je možné nastaviť lebku kranioforom presne do Frankfurtskej horizontály a ani asymetriu lebky presne ohodnotiť vizuálne), čo vedie k nepresnosti merania mnohých mier.

Podobne manuálne stanovenie **mediánnej roviny** vedie k ďalším nepresnostiam, ktoré sú skomplikované hlavne veľkým počtom nepárových (semi)landmarkov.

**Chyby stanovenia mediánnej roviny sú potom v praxi kombinované s nepresným stanovením Frankfurtskej horizontály.**

## GM vs KM

### Porovnanie pozitív a negatív merania v 2D a 3D prístupe (4)

- nenzávisle na tom, či je lebka v normách nasnímaná správne alebo nesprávne, **lineárne rozmery projektované do roviny (normy) budú kratšie, ak ich koncové body neležia v jednej rovine rovnobežnej s normou**
- rotácia lebky o nejaký uhol od normy túto chybu ešte zväčší
- ak máme nejakú **nepriamu lineárnu mieru**, teda mieru dopočítanú z dvoch priamo zmeraných lineárnych mier, táto nepriama miera bude akceptovateľná len vtedy, ak všetky koncové body ležia v jednej rovine

**Príklad:** neplatí, keď zoberieme sumu vzdialeností *nasion* a *prosthion* plus výšku prvého horného rezáka M91 (ekvivalentná približne vzdialenosti *nasion* a *stomion* u živého človeka, teda ekvivalentná M48c) plus výšku mandibuly (výška prvého dolného rezáka M81(2)) plus výšku brady *infradentale* – *gnathion* M69), ktorá nie je rovná výške tváre M47

## GM vs KM

### Porovnanie pozitív a negatív merania v 2D a 3D prístupe (5)

- vlastné snímanie lebky v jednotlivých normách by malo byť vykonané tak, aby **os objektívu fotoaparátu bola kolmá na rovinu stanovenú príslušnou normou a navyše bola na kolmici vychádzajúcej z centroidu lebky** (tento je možné odhadnúť len približne)
- pri manuálnom 3D meraní je nutné, aby bol **uhol pohľadu merajúceho človeka na malú oblasť lebky, v ktorej sa landmark nachádza, kolmý**
- tento pohľad je dobré **kombinovať s pohľadom z iných uhlov**, čo je možné **len sekvenčne** za sebou
- v 2D takýto postup nahrádza kolmý pohľad na malú oblasť fotografie lebky okolo landmarku
- pri poloautomatickom 3D meraní je možné nahliadnúť na oblasť okolo landmarku **z troch rôznych rovin pohľadu simultánne**, ako aj priamo v 3D
- 3D obraz je možné rotovať podľa potreby, čo je veľkou výhodou oproti 2D meraniu a manuálnemu 3D meraniu

## GM vs KM

### Porovnanie pozitív a negatív merania v 2D a 3D prístupe (6)

Meranie alebo vypočítanie hodnoty skutočného alebo **antropometrického rozmeru** (tu lineárneho) je možné len v 3D, keď jej výpočtovo zodpovedá **euklidovská vzdialenosť dvoch bodov** – tri podzložky mier, ktoré predstavujú **dekompozíciu antropometrickej miery na komponenty x, y a z** za predpokladu, že lebka je orientovaná do Frankfurtskej horizontály a mediánnej roviny súčasne

- 1 **komponent mediánno-laterálny** (x-komponent), rovný absolútnej hodnote rozdielu x-ových súradníc dvoch bodov;
- 2 **komponent inferio-superiórny** (y-komponent), rovný absolútnej hodnote rozdielu y-ových súradníc dvoch bodov;
- 3 **komponent posterio-anteriórny** (z-komponent), rovný absolútnej hodnote rozdielu z-ových súradníc dvoch bodov.

## GM vs KM

### Porovnanie pozitív a negatív merania v 2D a 3D prístupe (7)

- zoznam je modifikovaný podľa Farkasa (1994), ktorý uvádza komponenty y a z opačne a nehovorí o komponentoch, ale o pozíciách v zmysle relatívnej polohy bodov z pohľadu **anatomického súradnicového systému**
- náš systém vychádza z konvencie používanej v **počítačovej grafike**, kde
  - 1 x-os je horizontálna (orientovaná zľava – doprava, s pozitívnou poloosou vpravo od nuly)
  - 2 y-os vertikálna (orientovaná zdola – hore, s pozitívnou poloosou nad nulou)
  - 3 z-os je orientovaná v smere kolmom na xy-rovinu (rovinu obrazovky, s pozitívnou poloosou pred obrazovkou)
- na rozdiel od Farkasa (1994) je logickejšie hovoriť **inferio-superiórny** a nie **superio-inferiórny** (podobne **posterio-anteriórny** a nie **anterio-posteriórny**) v zmysle jednotnej orientácie jednotlivých komponent (smere od negatívnej k pozitívnej poloosi).

## GM vs KM

### Reliabilita merania, biologická a geometrická homológia (1)

- landmarky typu 1 sú vždy biologicky a geometricky homologické
- landmarky ostatných typov nie sú skoro nikdy biologicky homologické, ale vždy sú geometricky homologické
- landmarky digitalizované v 2D z jednotlivých noriem obsahujú najmenej dve tretiny informácie obsiahnutej v 3D
- z tohto dôvodu je presnejšie digitalizovať (semi)landmarky priamo v 3D alebo v zrekonštruovanom 3D z niekoľkých projekcií (noriem)
- z tohto hľadiska je 2D možné používať len vtedy, keď 3D nie je k dispozícii
- definície mnohých landmarkov sú vytvorené za predpokladu orientácie lebky vo *Frankfurtskej horizontále* a obsahujú v sebe orientácie – anteriórnu, posteriórnu, inferiórnu, superiórnu, mediálnu a/alebo laterálnu
- mnohé landmarky sú definované ako prienik nejakej krivky (príp. štruktúry) s *mediálnou rovinou*

## GM vs KM

### Reliabilita merania, biologická a geometrická homológia (2)

- obe tieto roviny však nie je možné v praxi objektívne pred meraním určiť, len subjektívne odhadnúť ich polohu
- preto landmarky, ktorých **definície sú závislé od orientácie alebo prieniku s mediálnou rovinou, môžu mať teoreticky horšiu reliabilitu ako landmarky s definíciou od týchto rovín nezávislou** (napr. *glabella*, *orbitale*, *zygion*, *gnathion* a *menton*)
- je možné predpokladať, že (semi)landmarky na krivkách môžu mať **reliabilitu horšiu v smere krivky ako v smere na ňu kolmom** [všetky (semi)landmarky okrajov očníc, napr. *orbitale* a *ektokonchion*]
- **torzia krivky** by na reliabilitu vplyv mať nemala
- reliabilita (semi)landmarkov na ploche je závislá na jej krivosti, kde **menej zakrivená plocha môže prinášať horšie možnosti na určenie súradníc (semi)landmarkov ako plocha viac zakrivená** (napr. *gnathion*, *euryon*)

## GM vs KM

### Reliabilita merania, biologická a geometrická homológia (3)

- **zachovanosť štruktúr** na ploche lebky, ako napr. švov (*sutura lambdoidea*, *s. occipitomastoidea* a *s. parietomastoidea*) alebo pozorovaných a chrbových (hrebeňových) kriviek (*lineae temporales* a ich možné rozdelenie a následná nutná modifikácia definície polohy bodov) hrá tiež dôležitú úlohu pri meraní súradníc (napr. *asterion* a *frontotemporale*)
- **neprítomnosť štruktúr** (napr. odlomený dolný okraj nosových kostí) takisto znemožňuje spoľahlivo zmerať súradnice niektorých (semi)landmarkov (napr. *nasospinale* a *rhinion*)
- reliabilitu merania môže tiež negatívne ovplyvniť „**manuálna**“ **konštrukcia** (napr. *opisthocranion*, *staphylion*, *ektokonchion* a *auriculare*)
- do kategórie „**manuálnych**“ („**vizuálnych**“) **výpočtov patrí aj meranie súradníc (semi)landmarkov ako extrémov zakrivenia** (porovnaj napr. *subspinale*, *mastoideale*, *gnathion* a *gonion*)

## GM vs KM

### Reliabilita merania, biologická a geometrická homológia (4)

- **matematickým výpočtom v PC je možné „manuálne“ merania spresniť alebo nahradiť**
  - 1 priesečníky s mediálnou rovinou (napr. *pogonion*, *glabella*, *opisthion* a *basion*)
  - 2 (semi)landmarky závislé na orientácii (napr. *gnathion*, *menton*, *glabella*, *orbitale* a *zygion*)
  - 3 skonštruované (semi)landmarky (napr. *staphylion*, *ektokonchion* a *auriculare*)
  - 4 (semi)landmarky ako lokálne extrémne zakrivenia (napr. *mastoideale*, *gonion*, *gnathion* a *subspinale*)
  - 5 koncové body dĺžkových mier (napr. *opisthocranion*, *zygion* a *euryon*)

## GM vs KM

### Definície vybraných mier a indexov (1)

- M1 – **najväčšia dĺžka mozgovne** – euklidovská vzdialenosť *glabella* – *opisthocranion*;
- M5 – **dĺžka bázy lebky** – euklidovská vzdialenosť *nasion* – *basion*;
- M8 – **najväčšia šírka mozgovne** – euklidovská šírka mozgovne kolmá na mediánnu rovinu, vzdialenosť *euryon sin.* – *euryon dex.*;
- M9 – **najmenšia šírka čela** – euklidovská vzdialenosť *frontotemporale sin.* – *frontotemporale dex.*;
- M11 – **biaurikulárna šírka** – euklidovská vzdialenosť *auriculare sin.* – *auriculare dex.*;
- M17 – **basion-bregmatická výška lebky** – euklidovská vzdialenosť *basion* – *bregma*;
- M40 – **dĺžka tváre** – euklidovská vzdialenosť *basion* – *prosthion*;
- M45 – **bizygomatická šírka tváre** – euklidovská vzdialenosť *zygion sin.* – *zygion dex.*;
- M47 – **výška tváre** – euklidovská vzdialenosť *nasion* – *gnathion*;
- M48 – **výška hornej časti tváre** – euklidovská vzdialenosť *nasion* – *prosthion*;

## GM vs KM

### Definície vybraných mier a indexov (2)

- M51 – **šírka očnice** – euklidovská vzdialenosť *maxillofrontale* – *ektokonchion*;
- M52 – **výška očnice** – euklidovská vzdialenosť horného a dolného okraja očnice kolmo na M51;
- M54 – **šírka nosa** – najväčšia šírka *apertura piriformis*;
- M55 – **výška nosa** – euklidovská vzdialenosť *nasion* – *nasospinale*;
- M61 – **maxilloalveolárna šírka** – euklidovská vzdialenosť *ektomolare sin.* – *ektomolare dex.*;
- I1 – **dĺžko-širokový index** – M8/M1;
- I2 – **dĺžko-výškový index** – M17/M1;
- I3 – **široko-výškový index** – M17/M8;
- I13 – **transverzálny frontoparietálny index** – M9/M8;
- I38 – **index tváre** – M47/M45;
- I39 – **index hornej časti tváre** – M48/M45;

## GM vs KM

### Definície vybraných mier a indexov (3)

- I42 – **index očnice** – M52/M51;
- I42(1) – **index orbitofacialis transversalis** – M51/M45;
- I42(2) – **index orbitofacialis verticalis** – M52/M48;
- I48 – **index nosa** – M54/M55;
- I55 – **index platofacialis transversalis** – M61/M45;
- I60 – **celustný index** – M40/M5;
- I69 – **dĺžkový kraniofaciálny index** – M40/M1;
- I71 – **transverzálny kraniofaciálny index** – M45/M8;
- I73(a) – **jugofrontálny index** – M9/M45.

## GM vs KM

### Miery a indexy a ich geometrická homológia

V KM je známych približne 120 mier a 80 indexov na lebke, dĺžkové miery sú definované pomocou (semi)landmarkov

- 1 **biologickú homológiu** mnohých vyššie spomenutých lineárnych mier a indexov je náročné zabezpečiť, nakoľko **miery nie sú definované pomocou biologicky homologických landmarkov** (napr. M1, M8, M9, M11, M45, M47, M51, M52, M54 a M61; potom aj I1, I2, I3, I13, I38, I39, I42, I48, I55, I69, I71 a I73(a))
- 2 **geometrickú homológiu** však zabezpečiť možné je, avšak len matematicky

## GM vs KM

### Výpočet reliability (1)

- **intraindividuálne a interindividuálne chyby** možno objektívne matematicky hodnotiť buď zvlášť pre  $x$ - a  $y$ -súradnice
  - ① ako **výberový rozptyl** ( $x$ - a  $y$ -súradníc) alebo
  - ② simultánne ako **celkový rozptyl** (stopa kovariančnej matice príslušného landmarku)
- **lineárny zmiešaný regresný model**
  - ① so strednou hodnotou  $x$ - a  $y$ -súradníc ako *fixnými efektmi*
  - ② identifikačné číslo osoby, ktorá meria, a poradia opakovania ako *náhodnými efektmi*

## GM vs KM

### Výpočet reliability (2)

- **chyby** sú počítané v
  - ① **absolútnej škále** v milimetroch
  - ② **relatívnej škále** škálované výberovým rozptylom  $x$ - a  $y$ -súradníc každého landmarku, resp. *celkovým výberovým rozptylom*
- **miery reliability** – rozsah výberu pre výpočet reliability rovný minimálne  $10 = 1 \times 5 \times 2$  (optimálne  $125 = 5 \times 5 \times 5$ )
  - ① merania na minimálne jednej lebke (optimálne piatich)
  - ② je potrebné opakovať aspoň päťkrát
  - ③ pri účasti aspoň dvoch (optimálne päť) osôb merajúcich pri štandardizovaných podmienkach
  - ④ opakované snímanie toho istého objektu (lebky) aspoň dvakrát laser-skenerom, stereogrametrickým kamerovým systémom alebo CT (podľa použitého prístroja)

## GM vs KM

### Záver

- ① použitie 2D fotografií (napr. sklenených negatívov) na meranie je možné z hľadiska reliability použiť len v prípadoch, keď nie je originálna lebka v 3D k dispozícii
- ② ak máme k dispozícii lebku alebo jej časti v 3D, použitie medzilandmarkových vzdialeností na analýzu nepostačuje
- ③ na opis tak komplexného objektu, ako je ľudská lebka alebo nejaká jej časť, nestačí len použitie landmarkov, ale je nutné použiť okrem landmarkov aj anatomické krivky
- ④ optimálne je doplniť ich aj o anatomické plochy

## GM vs KM

### Záver

- ① tam, kde sa končí práca **antropológa**, začína sa práca z oblasti **počítačovej geometrie** a **fyziky** s cieľom získať počítačovú rekonštrukciu objektu, po ktorej nasleduje práca **numerického matematika** alebo **štatistika**; tú môže potom doplniť štúdia z oblasti **diferenciálnej geometrie** a pod.
- ② je zrejmé, že **GM je interdisciplinárna veda** na pomedzí niekoľkých prírodovedných odborov, ktoré by mali v záujme objektívnych vedeckých poznatkov spolupracovať

## Conclusions

- $2D \mapsto 3D$  (fundamental for understanding of 'cranium complexity', 'landmark spatial relationships', 'integration', 'modularity')
- combination of distances/indices and GMM (statistical quantification of association of 'spatial effects of cranium variability' and internal/external measurement(s))
- extension of landmark shape information by semilandmarks on curves and surfaces increases the relative weights of shape within the form space (crucial increase of biological information)
- remarkable semilandmark 'visualization effect' in contrary to landmarks or indexes application only
- **CT-scans, laser-scans, stereo-camera image capture, MicroScribe**
- **Edgewarp, AMIRA** and/or **Landmark; R-software** ([cran.r-project.org](http://cran.r-project.org))