

# Dialogové systémy

Luděk Bártek

Laboratoř vyhledávání a dialogu, Fakulta Informatiky Masarykovy Univerzity,  
Brno

jaro 2016

# Cíl a náplň předmětu

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Cíl – seznámení s oblastí dialogových systémů.
- Obsah kurzu:
  - Úvod do dialogových systémů, historie
  - Základní technologie:
    - digitální zpracování zvuku
    - rozpoznávání řeči
    - porozumění rozpoznané řeči
    - syntéza řeči
    - přenos hlasu prostřednictvím počítačové sítě

# Cíl a náplň předmětu

## pokračování

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Obsah kurzu:
  - Dialogové systémy:
    - formální modely dialogu
    - analýza dialogu, kooperativní a nekooperativní dialog
    - dialogové strategie
    - information retrieval DS
    - simulace DS
    - multimodalita
    - nástroje pro tvorbu dialogových systémů – W3C Voice Browser Activity
    - aplikace.

# Ukončení předmětu

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Možná ukončení:
  - zkouška
  - kolokvium
  - zápočet
- Požadavky:
  - zkouška + kolokvium – dobrá orientace v probírané problematice
    - zkouška – písemka + ústní dozkoušení
    - kolokvium – nástin řešení problémové úlohy a detailnější rozbor některé z použitých technologií.
  - zápočet – zápočtová písemka současně se zkouškou.

# Doporučená literatura

## Knihy

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- J. Psutka, Komunikace s počítačem mluvenou řečí, Academia, Praha, 1995
- Z. Kotek, V. Mařík, Metody rozpoznávání a jejich aplikace, Academia, Praha, 1993
- T. Dutoit, An Introduction to Text-to-Speech Synthesis, Kluwer Academic Publishing, 1996
- A. Kobsa, W. Wahlster, User Models in Dialog System, Springer 1989
- D. B. Roe, J. G. Wilpon (editors), Voice Communication Between Humans and Machines, National Academy Press, Washington D.C., 1994
- F. Jelinek, Statistical Methods for Speech Recognition, MIT Press 1997

- Nuance Dragon
- Odkazy na dialogové systémy (DS) – Odkazy na dialogové systémy (DS)
- Různé projekty z oblasti počítačové sémantiky na Stanford University
- Stránky W3C Voice Browser Activity
- ...

# Co je dialogový systém?

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Dialogový systém – systém komunikující s uživatelem pomocí dialogu v přirozeném jazyce
  - většinou se jedná o dialogové rozhraní ke klasickému IS.
- Častá komunikace mluvenou řečí.
- Alternativně:
  - komunikace pomocí DTMF
  - textová komunikace přirozenou řečí
  - multimodální komunikace:
    - řeč + obraz (simulace lidské tváře, titulky ve znakové řeči, ...)
    - řeč + text
    - ...

# Výhody a nevýhody dialogových systémů

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

## ■ Výhody:

- + Přirozenější způsob komunikace.
- + Přístupnost:
  - zrakově a motoricky postižení uživatelé
  - další uživatelé, kterým činí problémy ovládání počítače standardním způsobem
  - možnost podrobnějšího vedení uživatele krok za krokem celým procesem
  - dalším krokem k lepší přístupnosti – multimodální rozhraní.
  - ...



# Výhody a nevýhody dialogových systémů

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

## ■ Výhody:

+ Větší množství potenciálních uživatelů:

- počet uživatelů počítačů a Internetu vs. počet uživatelů telefonu.

+ ...

## ■ Nevýhody:

- rychlost komunikace

- sekvenční vnímání zvuku vs. paralelní vnímání obrazu
- lze částečně eliminovat pomocí vhodné dialogové strategie

- Laboratoře:
  - LSD – doc. Kopeček
    - zaměřuje se na:
      - dialogové systémy a zpracování zvuku
      - sociální sítě
      - sociální informatika
  - NLP – doc. Pala
    - zaměřuje se na:
      - korpusy
      - slovníky
      - morfologii
      - syntaktickou analýzu
      - sémantiku

# Aktuální práce v oblastech souvisejících s dialogovými systémy

Výzkum Česká republika

Dialogové systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do dialogových systémů

Historie zpracování zvuku

Fyzikální akustika

Fyziologická akustika

- FIT VUT Brno
  - analýza signálu
  - rozpoznávání řeči
  - systém pro automatizované zpracování konferencí
  - ...
- ZČU v Plzni
  - rozpoznávání řeči
  - dialogové systémy
  - ...
- ČVUT – syntéza řeči

# Aktuální práce v oblastech souvisejících s dialogovými systémy

Komerční sféra - Česká republika

Dialogové systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do dialogových systémů

Historie zpracování zvuku

Fyzikální akustika

Fyziologická akustika

- FROG Systems s.r.o. – CS-voice 97
- OptimSys s.r.o – VoiceXML platforma OptimTalk
- ...

# Aktuální práce v oblasti dialogových systémů

## Výzkum a práce ve světě

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- W3C Voice Browser Working Group
  - IBM
  - Nuance Communication
  - Lucent Technologies
  - Motorola
  - ScanSoft
  - Tellme Networks
  - Vocalocity
  - ...
- MIT
- OGI
- EPF Lausane
- ...

# European Masters in Language and Speech

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Evropské navazující studium v oblastech zpracování řeči a přirozeného jazyka (na FI během magisterského studia).
- Zapojeny VŠ např. v Dánsku, Řecku, Španělsku, Belgii, Německu, Velké Británii, Nizozemí, ...
- Více informací:
  - Stránka o EuroMasters na FI
  - doc. Pala, doc. Kopeček.



# Komponenty dialogového systému

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Uživatel – koncové zařízení, které uživateli umožňuje komunikovat s dialogovým systémem:
  - telefon – komunikace prostřednictvím PSTN přes VoIP gateway – VoIP gateway převádí hlas na data a zpět
  - VoIP klient – komunikace prostřednictvím VoIP protokolu přímo s dialogovým systémem (SIP, H.323, Skype, ...)
  - textový klient – komunikace prostřednictvím protokolů DTMF+VoIP protokol, telnet, ssh, XMPP, ...
- Rozpoznávání řeči:
  - převádí mluvené slovo na text
  - využívá se:
    - rozpoznávání plynulé řeči
    - rozpoznávání izolovaných slov
  - pro zvýšení úspěšnosti se používají gramatiky popisující množinu očekávaných vstupů.



# Komponenty dialogového systému

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Sémantický analyzátor
  - získává relevantní údaje z rozpoznaného textu
  - využívají se např. atributové gramatiky.
- Dialogový manažer
  - konečný automat
  - na základě aktuálního stavu a vstupu od uživatele rozhoduje o dalším průběhu dialogu.
- Generátor promluv – na základě údajů od dialogového manažeru generuje promluvy, které jsou následně syntetizovány.
- Řečový syntetizér – převádí promluvy od generátoru promluv na mluvenou řeč, která je poslána uživateli.

# Údaje používané dialogovým systémem

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Lingvistické znalosti – údaje o jazyce, které využívá rozpoznávač řeči pro zvýšení úspěšnosti (pravděpodobnosti výskytů jednotlivých sekvencí řečových segmentů, gramatika, ...).
- Uživatelský profil – informace o uživatelích (charakteristiky hlasu, vyjadřování, používané fráze, ...).
- Doménové znalosti – informace odvoditelné z oblasti dialogového systému (gramatika, ...).
- Kontext dialogu – informace o aktuálním stavu dialogu (krok dialogu, uživatelský vstup, chybovost uživatele, ...).

# Historie zpracování a napodobování řeči

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- před 3 milióny let – Australopitekus – schopnost artikulované řeči
- starověk – budování mluvících soch bůžků
- 1779 – Kratzenstein – systém rezonátorů pro napodobení samohlásek a, e, i, o, u.



# Historie zpracování a napodobování řeči

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- 1791 – Wolfgang von Kempelen – mechanický mluvící stroj



- 1835 – zrekonstruován a upraven Wheatstonem v Dublinu – měl navíc pružnou „ústní dutinu“
- 1846 – J. Faber – mluvící stroj Euphonia

# Historie zpracování a napodobování řeči

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

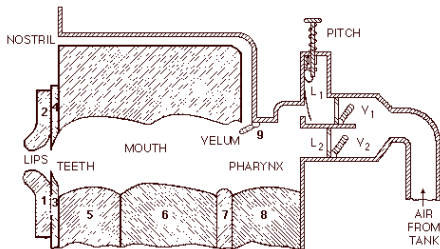
Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- 1937 – R. R. Riesz – mechanický mluvící stroj napodobující lidské řečové ústrojí



- 1939 – H. Dudley – VODER (elektromechanický řečový syntetizér), VOCODER (elektrické zařízení kódování a přenos řeči)
- 50. léta 20. století – syntéza ve frekvenční oblasti, později syntéza v časové oblasti

# Historie zpracování a napodobování řeči

## Dokončení

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- cca 1970 – počítače
- 1966 – J. Weizenbaum – Eliza (Communications of the ACM, leden).

# Základy moderní analýzy řeči

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- 19. století
  - J.B. Fourier – Fourierova věta – využívá se při spektrální analýze zvuku
  - H. Helmholtz – zabýval se fyziologií vnímání hudby, Helmholtzův rezonátor
  - J. R. Ewald – fyziologie sluchu
- 1924 – spektrální analýza řeči na bázi formantové analýzy samohlásek
- 1939 – vokodér – zařízení pro kompresi řeči pro účely přenosu hlasu rádiem a transkontinentálním kabelem
- 1946 - 1947 – zařízení pro grafický záznam řeči
- 2. polovina 20. století – intenzivní vývoj jak teorie, tak počítačových aplikací.

# Základní řečové technologie

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- syntéza řeči
- rozpoznávání řeči
- související oblasti – zpracování jak v časové tak frekvenční oblasti
- rozpoznávání řečnicka
- detekce emocí
- word spotting
- ...



- Zvuk
  - kmitavý pohyb molekul prostředí (vzduchu)
  - vyvoláván pružným odporem prostředí
- Kmit hmotného bodu
  - pohyb bodu z rovnovážné polohy do místa s maximální výchylkou (amplitudou), odtud do protilehlého místa s maximální výchylkou zpět do rovnovážného bodu.

# Kmity

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

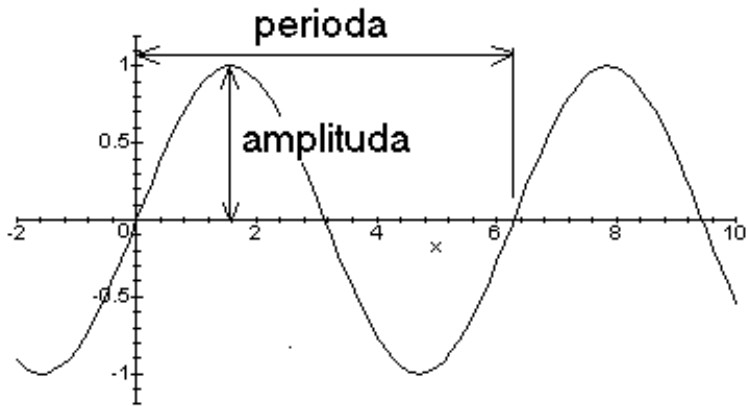
O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika



- Amplituda – maximální výchylka kmitavého pohybu.
- Perioda (T)
  - doba jednoho opakování periodického děje.
  - jednotka – 1 s (sekunda).
- Frekvence (f)
  - počet opakování periodického děje za jednotku času.
  - platí  $f = \frac{1}{T}$
  - jednotka 1 Hz (Hertz).

- Síla působící na kmitající bod:
  - $F = -ks$ ,  $k$  – tuhost pružiny,  $s$  – aktuální výchylka pružiny
  - $F = ma \Rightarrow ma = -ks$ ,  $m$  – hmotnost tělesa,  $a$  – zrychlení
  - $a + \omega^2 s = 0$  ( $\omega^2 = \frac{k}{m}$ ,  $\omega$  – úhlová rychlost kmitavého pohybu:  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ )
- fáze kmitavého pohybu:  $\psi = \omega t$
- okamžitá výchylka:  $y = y_m \sin \omega t = y_m \sin \psi$
- okamžitá rychlost:  $v = \omega y_m \sin \omega t = y_m \sin \psi$
- okamžité zrychlení:  $a = -\omega y_m \sin \omega t = y_m \sin \psi$

# Harmonické versus tlumené versus vynucené kmitání

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Harmonické kmitání
  - na těleso nepůsobí žádná vnější síla
  - v praxi se s ním téměř nesetkáme (odpor vzduchu, ...).
- Tlumené kmitání
  - proti pohybu působí odpor prostředí
  - amplituda s časem (vzdáleností od zdroje) klesá
- Vynucené kmitání, rezonance
  - na hmotný bod působí navíc periodicky proměnné síla  
 $G = \sin \alpha t$ 
    - $F = ma = -ky + \sin \alpha t \Rightarrow a + \omega^2 y = \sin \alpha t$
    - partikulární řešení:  $\frac{\sin \alpha t}{\omega^2 - \alpha^2}$

- Zvuk – mechanické vlnění pružného prostředí (vzduch, voda, kov, ...)
- Akustika – věda studující zvuk (z řeckého akustikos – vztahující se k slyšení):
  - fyzikální – zvuk jako fyzikální vlnění
  - fyziologická akustika – vzniká a vnímání zvuku člověkem
  - hudební – zvuky z pohledu hudby
  - molekulární – vztah akustických vlastností a molekulární struktury.
- Rozdělení zvuku:
  - infrazvuk – frekvence  $< 16$  Hz
  - slyšitelný zvuk – 16 Hz – 16kHz
  - ultrazvuk –  $> 16$  kHz
  - hyperzvuk – až  $10^8$  Hz – využíván např. molekulární akustikou.

# Jednoduchý vs. složený tón

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

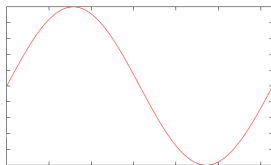
Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

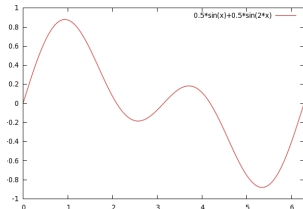
Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Základní tón – průběh intenzity v čase lze popsat jednoduchou sinusoidou.



- Složený tón – lineární kombinace jednoduchých tónů.



# Akustické spektrum zvuku

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Akustické spektrum – množina základních tónů, ze kterých je zvuk složen.
- Získání spektra – Fourierova transformace:
  - $F(x)$  musí splňovat Dirichletovy podmínky
    - periodická funkce s periodou  $T$
    - je na daném intervalu po částech spojitá (nejvýše konečný počet bodů nespojitosti 1. druhu)
    - má nejvýše konečný počet extrémů na daném intervalu
    - definována v krajních bodech daného intervalu:



# Akustické spektrum

## Výpočet hodnot

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Využívá se rozkladu pomocí Fourierovy řady:

$$F(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(i\omega x) + b_i \sin(i\omega x)$$

- $\omega = \frac{2\pi}{T}$
- aproximace  $F(x)$  je nejlepší při použití hodnot koeficientů  $a$  a  $b$ :

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F(x) \cos(kx) dx$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F(x) \sin(kx) dx$$

- Hodnoty spektrálních koeficientů

$$s_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

# Akustické spektrum zvuku

## pokračování

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Problém – zvuk je periodický pouze na určitých intervalech.
  - analýza na krátkém intervalu, kde se předpokládá, že je periodický.
- Z hlediska fyziologické akustiky – spektrum odpovídá rezonanci odpovídajících vláček Cortiho ústrojí, resp. odpovídající reakci neuronů.

## ■ Akustický tlak

- Odpovídá síle působící na element plochy v prostředí akustického vlnění.
- Pro sinusovou vlnu platí:

$$p = p_0 \sin(\omega t)$$

- $p_0$  – maximální akustický tlak v průběhu periody
- $\omega$  – úhlová rychlost
- $t$  – čas.

## ■ Akustická intenzita

- Vyjadřuje množství akustické energie, které projde jednotkovou plochou za jednotku času.
- Je přímo úměrná druhé mocnině akustického tlaku.
- Rozsah intenzity zvuku - dán rozsahem minimální ( $I_0$ ) a maximální ( $I_1$ ) akustické intenzity, kdy jsme schopni vnímat tón o frekvenci 1 kHz.
- Práh citlivosti –  $p_0 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Nm}^{-2}$ .
- Práh bolestivosti –  $p_1 = 10^2 \text{ Nm}^{-2}$ .
- Rozsah –  $2,5 \cdot 10^{13} \text{ Nm}^{-2}$ .

- Weber-Fechnerův psychofyzikální zákon
  - Člověkem subjektivně vnímaná hlasitost roste při geometrickém nárůstu intenzity přibližně lineárně.
  - Pro stanovení hladiny intenzity zvuku ( $L$ ) volíme

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

- jednotka – 1 bel (originál bell) [B]
- Prakticky se využívá odvozená jednotka decibel [dB] ( $10^{-1}B$ ).

# Orientační hodnoty akustické intenzity

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- šepot – 10 - 20 dB
- tlumený hovor – 35 - 45 dB
- symfonický orchestr – 70 - 90 dB
- rocková hudba – 110 - 130 dB.

# Základy fyziologické akustiky

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Fyziologická akustika se zabývá:
  - mechanismem vytváření řeči
  - mechanismem vnímání řeči.
- Využívá Helmholtzovu rezonanční teorii.

# Helmholtzův rezonátor

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

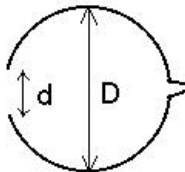
O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika



## ■ Princip činnosti:

- Přivedením vzduchu do rezonátoru v něm vznikne přetlak.
- Ten vytlačuje přebytečný vzduch ven a následně vzniká podtlak, který způsobí nasávání vzduchu z okolí.
- Takto vzniká periodický děj:

$$f = \frac{75,3}{D} \sqrt{\frac{d}{D}} [\text{Hz}]$$



# Mechanismus vytváření řeči

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

- Řeč vzniká pomocí *hlasového ústrojí* (umístěno v *hrtanu*).
- Hlasivky vytváří úzkou hlasovou štěrbinu a jsou rozechvívány procházejícím vzduchem.
- Frekvence jejich kmitání určuje *základní hlasivkový tón* –  $F_0$ .
- Zvuk, který vzniká v hrtanu pomocí hlasivek (samohlásky, znělé souhlásky) je modifikován v *rezonančních dutinách*:
  - hrtanové
  - ústní
  - nosohltanové.
- Rezonanční dutiny fungují na stejném principu jako Helmholtzův rezonátor).

# Hlasivky a schéma lidského hlasového ústrojí

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

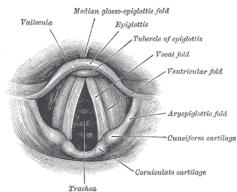
Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika

## ■ Hlasivky



## ■ Jejich umístění



- Zvuk vnímáme sluchovým orgánem.
- Sluchový orgán:
  - vnější ucho – zachycuje, soustřeďuje a přivádí zvukové vlny ke střednímu uchu
  - střední ucho
    - mechanickou cestou přenáší zvukovou energii mezi vnějším a vnitřním uchem
    - obsahuje mechanismy k vyrovnání rozdílů tlaku mezi vnějším prostředím a sluchovým orgánem
  - vnitřní ucho – převádí zvukovou energii na vzruchy, které jsou vedeny dále do mozku.

# Schéma sluchového orgánu

Dialogové  
systémy

Luděk Bártek

O předmětu

Úvod do  
dialogových  
systémů

Historie  
zpracování  
zvuku

Fyzikální  
akustika

Fyziologická  
akustika



Obrázek: Schéma sluchového orgánu

- **Obsahuje:**
  - Ušní boltec – soustředí zvukové vlny do zvukovodu.
  - Zvukovod – vede zachycenou zvukovou energii (vlny) k bubínku.
  - **Bubínek:**
    - Tenká blána na konci zvukovodu – síla cca 0.1 mm.
    - Zesílí a přeneše zvukovou energii na kůstky středního ucha.

## ■ Obsahuje:

### ■ Kůstky středního ucha:

- kladívko – přiléhá k bubínku
- kovadlinka
- třmínek – přiléhá k oválnému okénku, kterým se zvuková energie předává do vnitřního ucha.

### ■ Oválné okénko – tvoří přístup k vnitřnímu uchu.

### ■ Eustachova trubice:

- Vede ze středního ucha do nosohltanu.
- Slouží k vyrovnání rozdílu tlaku mezi vnějším prostředím a středním uchem, aby nedošlo poškození sluchu.

- Hlemýžď' (Cochlea):
  - Je naplněn vodnatým roztokem.
  - Ústrojí ve tvaru ulity hlemýždě, které obsahuje Cortiho ústrojí.
  - Cortiho ústrojí obsahuje zhruba 20000 vláček s délkami  $40 \mu\text{m} - 0,5 \text{ mm}$ .
  - Vlákénka jsou napojena na nervová zakončení, která vedou vzruchy do příslušného centra v mozku.
- Rovnovážný orgán.