ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra teorie obvodů

Jan Janda

POSUZOVÁNÍ LOGOPEDICKÉHO VĚKU DÍTĚTE

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Teoretická elektrotechnika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, únor 2012

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Katedře teorie obvodů Fakulty elektrotechnické Českého vysokého učení technického v Praze.

Uchazeč: Ing. Jan Janda
Katedra teorie obvodů, FEL ČVUT
Technická 2, 166 27, Praha 6

Školitel: Doc. Ing. Roman Čmejla, CSc
Katedra teorie obvodů, FEL ČVUT
Technická 2, 166 27, Praha 6

Oponenti: .....
.....
.....

Teze byly rozeslány dne:.....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ...hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Teoretická elektrotechnika v zasedací místnosti č..... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

Prof. Ing. Václav Havlíček, CSc.
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Teoretická elektrotechnika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

Obsah

1 Stav zkoumané problematiky **4**
1.1 Cíle disertační práce 6

2 Věkově závislé charakteristiky **8**
2.1 Věková závislost charakteristik samohlásek 8
2.1.1 Základní frekvence hlasivkového tónu F0 8
2.1.2 Analýza frekvenčního a amplitudového kolísání 8
2.1.3 Formantové frekvence F1, F2 11
2.2 Věková závislost charakteristik neznělých sibilantů 12
2.3 Analýza srozumitelnosti slov 13
2.4 Věková závislost některých prozodických charakteristik 15
2.4.1 Rychlost řeči 16
2.4.2 Podíl pauz v promluvě 16
2.4.3 Analýza intonace 17
2.5 Hodnocení věkové závislosti řečových charakteristik 17

3 Strojové určení věku dítěte **19**

4 Závěry a další cíle **21**
4.1 Shrnutí 21
4.2 Další cíle 22

Reference **24**

Summary **28**

Resumé **29**

Kapitola 1

Stav zkoumané problematiky

Vývoj řeči v dětství je po akustické stránce zapříčiněn částečně růstem a anatomickou přestavbou řečového traktu. Od narození do dospělosti se délka vokálního traktu prodlouží přibližně na dvojnásobek délky. Významně se však také mění geometrické proporce jednotlivých měkkých a tvrdých tkání relativně k délce vokálního traktu. Jedná se například o postupné zakřivení vokálního traktu do pravého úhlu v oblasti nosohltanu, sestoupení hrtanu, jazylky a příklopky hrtanové a pokles zadní části jazyka tak, aby tvořil přední stěnu hltanu [37].

V důsledku těchto anatomických změn rostou jednotlivé kostní a měkko-tkáňové struktury v oblasti ústní dutiny a hltanu různou rychlostí a svých dospělých rozměrů dosahují v širokém rozmezí od 7 do 18 let věku.

V práci [37] byla pomocí moderních zobrazovacích metod (zejména magnetické rezonance) provedena kvantitativní měření anatomických charakteristik jednotlivých částí vokálního traktu během prvních 20 let života. Délkou vokálního traktu se zde rozumí délka křivky v mediální rovině vedené od středu hlasivek po její průsečík s tečnou rtů. Během vývoje se délka této křivky zvětší z přibližně 8 cm u novorozenců na asi 18 cm u dospělých mužů.

Práce dále předkládá věkové závislosti dalších anatomických charakteristik. Jedná se o tloušťku maxilárního a mandibulárního rtu, délku tvrdého a měkkého patra, délku jazyka, délku mandibuly, a vzdálenost hrtanu, příklopky hrtanové a jazylky od spina nasalis posterior. Tyto charakteristiky vykazují podobný rostoucí trend, liší se však ve věku, ve kterém dochází k největšímu růstu. Každé charakteristice je pak přiřazen po částech lineární model růstu. Ze závěrů anatomických měření můžeme předpokládat některé akustické důsledky. Jednak s rostoucí délkou celého vokálního

traktu můžeme předpokládat očekávaný pokles formantů [21, 11], dále díky absenci pohlavního dimorfismu v uvedených charakteristikách do 6 let věku můžeme do jisté míry očekávat i pohlavní nezávislost souvisejících akustických parametrů. Také vedle zvyšující se artikulační zručnosti bude mít vliv na koartikulaci i zvětšující se prostor pro pohyb jazyka.

Vzhledem k tomu, že se během dospívání mění nejen rozměry, ale i vzájemné uspořádání jednotlivých částí vokálního traktu, můžeme předpokládat, že i další foneticko-akustické parametry dětské řeči budou vykazovat věkovou závislost.

A. Potamianos a S. Narayanan v práci „A Review of the Acoustic and Linguistic Properties of Children's Speech"[27] uvádějí, že rozdíl v akustických charakteristikách v dětské a dospělé řeči je dán především anatomickými a morfologickými odlišnostmi v geometrii vokálního traktu, menší schopností přesně ovládat artikulační aparát, a v neposlední řadě sníženou schopností dětí ovlivňovat suprasegmentální stránku řeči jakou je prozodie. Vycházejí z dříve publikovaných faktů [15], že dětská řeč v porovnání s řečí dospělých vykazuje vyšší fundamentální a formantové frekvence a větší spektrální kolísavost. Ve svých analýzách, které prováděli na databázi 23454 promluv od 436 dětí ve věku od 5 do 18 let a 56 dospělých, dále shledávají, že rychlost dětské řeči je nižší než u dospělých, a že dětská řeč celkově vykazuje větší variabilitu v rychlosti, je namáhavěji tvořena a je pro ni charakteristická větší spontánnost.

Podrobnější analýzu akustických parametrů dětské řeči (na stejné databázi promluv) v časové a spektrální oblasti nalezneme v práci S. Lee et al. „Acoustic of children's speech: Developmental changes of temporal and spectral parameters"[18]. Vznik této i některých dalších prací byl motivován problematickým chováním automatických rozpoznávačů řeči v případě, že byly natrénovány na řeč dospělých a byla jimi detekována řeč dětská. Autoři uvádějí, že klasifikační skóre pro určení samohlásky bylo například u pětiletých pouhých 60 % – 65 % oproti 90 % pro dospělé mluvčí. Své závěry pak aplikují v transformacích zvyšujících robustnost rozpoznávání dětské řeči [28, 6].

Zkoumanými charakteristikami jsou zde délka samohlásek a frikativy `/s/`, fundamentální frekvence F0, první tři formantové frekvence (F1 - F3) a kepstrální vzdálenost mezi jednotlivými realizacemi samohlásky u jednoho mluvčího, případně kepstrální vzdálenost mezi první a druhou polovinou jedné samohlásky. U uvedených charakteristik také zkoumají věkovou závislost jejich rozptylů u jednoho mluvčího i

u skupiny mluvčích stejného věku. Analýzy byly prováděny u deseti jednoslabičných slov zasazených do jednoduchých vět.

U fundamentální frekvence autoři dospěli ke zjištění, že do 12 let věku není statisticky významný rozdíl mezi mužskými a ženskými mluvčími. Předpokládaný klesající trend F0 přestává být statisticky významný u dívek po 12 letech a naopak u chlapců spadá asi 78 % poklesu F0 do věku mezi 12 a 15 lety. Od 15 let věku přestává být pokles F0 významný i u chlapců.

Věková závislost euklidovské kepstrální vzdálenosti mezi dvojím opakováním téže samohlásky vykazovala rovněž značnou statistickou významnost. Klesající trend vymizí přibližně od 11 let věku. Tato charakteristika ukazuje, že děti mladší 10 let ještě nemají pevně zautomatizováno nastavení artikulačního aparátu při vyslovování samohlásek.

V práci M. Gerosa et al. „Analyzing children's speech: an acoustic study of consonants and consonant-vowel trasition“ [5] jsou tytéž promluvy podrobeny analýzám vlastností souhlásek a přechodu samohláska-souhláska. Je zde brán zřetel na efekt koartikulace, kdy realizace jednotlivého fonému je ovlivněna fonémy sousedními.

Podobně jako v případě samohlásek v předchozí práci je zde prokázána klesající závislost průměrného trvání frikativ i explosiv. Rovněž statisticky významně klesá kepstrální vzdálenost mezi dvěma realizacemi téže souhlásky, což opět vypovídá o lépe zvládnuté artikulaci starších dětí [16].

Velice podrobný výzkum věkově závislých parametrů provedla také Susanne Schötz z Centre for Languages and Literature, Lund Univerzity. Závěry svých studií v tomto směru shrnuje ve své disertační práci „Perception, Analysis and Synthesis of Speaker Age“ [35]. Vychází z rozboru problematiky odhadu věku mluvčího poslechem. Nezabývá se však analýzou dětských promluv, v databázi uvádí věkové rozpětí 17-89 let. Ke strojovému určení věku řečníka používá klasifikačních stromů trénovaných na některých již výše citovaných atributech. Zajímavostí je, že v závěru své práce představuje formantovou syntézu na základě požadovaného věku.

1.1 Cíle disertační práce

Cílem práce bude najít metodu, která by na základě audio nahrávek dětí byla schopna automaticky objektivně určit věk dítěte. Dílčími cíli pak bude:

- Navrhnout strukturu a obsah řečové databáze. Provést předběžný odhad věkové závislosti různých fonetických a logopedických parametrů a při tvorbě databáze se zaměřit na jevy, u nichž lze závislost na věku předpokládat.
- Pořídit vlastní databázi dětských promluv od dostatečného počtu zdravých dětí.
- Selekce řečových charakteristik a vyhodnocení jejich věkové závislosti.
- Navržení systému pro strojové určení věku dítěte a jeho testování.

Kapitola 2

Vybrané věkově závislé charakteristiky

2.1 Věková závislost charakteristik samohlásek

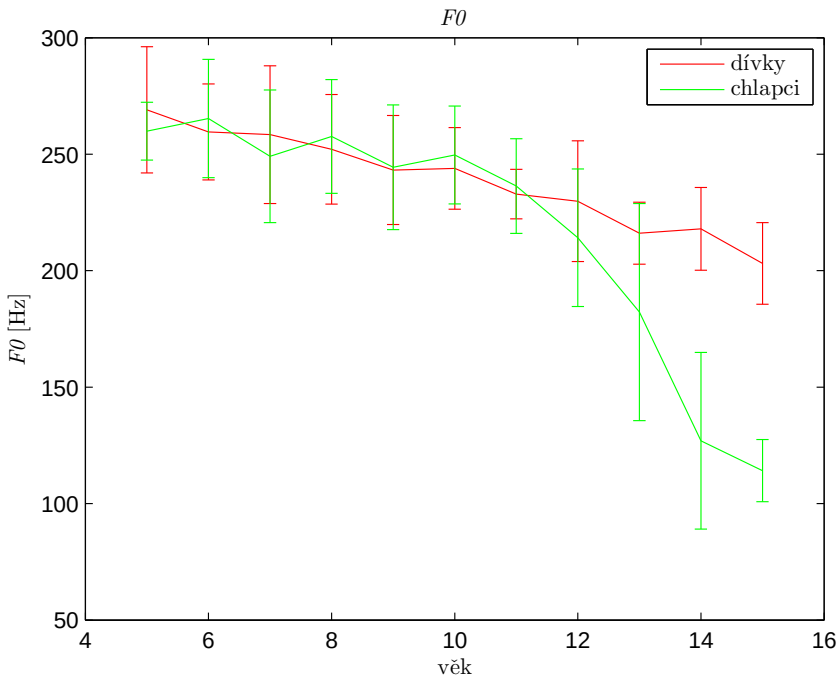
2.1.1 Základní frekvence hlasivkového tónu F0

Hodnota $F0$ závisí především na velikosti hrtanu a délce hlasových vazů. Jedná se o nejčastěji uváděnou charakteristiku v souvislosti s věkem člověka. Nabývá hodnot od 500 Hz u nejvyšších dětských hlasů a s věkem může u mužů klesnout až na hodnoty kolem 80 Hz. Analýza $F0$ byla prováděna autokorelační metodou. Na obr. 2.1 můžeme vidět průběh $F0$ zvlášť pro chlapce a pro dívky. Od 12 let je zde patrný vliv mutace u chlapců jak rapidním poklesem $F0$, tak zvýšením vnitroskupinového rozptylu. Korelační koeficient $F0$ činí $r = -0,66$ ($n = 248,\ p < 0,001$) pro všechny děti. Pro chlapce $r = -0,76$ ($n = 119,\ p < 0,001$) a pro dívky $r = -0,65$ ($n = 129,\ p < 0,001$).

Zbývá odpovědět na otázku od jakého věku můžeme výšku hlasu u chlapců a dívek považovat za rozdílnou. Statisticky významný rozdíl ve velikosti $F0$ mezi chlapci a dívkami se začíná projevovat od 13 let věku. Tento věk také odpovídá závěrům o pohlavním dimorfismu struktur hrtanu z anatomických studií z úvodní kapitoly.

2.1.2 Analýza frekvenčního a amplitudového kolísání

Ke klasickým metodám hodnocení kvality fonace patří **Jitter**, **Shimmer** a poměr harmonických složek signálu k šumu (**HNR**). **Jitter** je obecně definován jako



Obrázek 2.1: Věková závislost $F0$ prodloužené fonace samohlásky `/i/`, chlapci a dívky zvlášť

střední rozdíl délek sousedních period T, dělený střední délkou periody. Může být udáván v procentech [29].

$$jitter(local) = \frac{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}|T_i - T_{i+1}|}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}T_i}. \tag{2.1}$$

Z dalších obvyklých variant jitteru použijeme absolutní jitter

$$jitter(local, abs) = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}|T_i - T_{i+1}| \quad [ms], \tag{2.2}$$

jitter **rap** (relative average pertubation) počítaný ze tří po sobě jdoucích period

$$jitter(rap) = \frac{\frac{1}{N-2}\sum_{i=2}^{N-1}|\frac{T_{i-1}+T_i+T_{i+1}}{3} - T_i|}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}T_i} \tag{2.3}$$

a analogický jitter **ppq5** počítaný z pěti po sobě jdoucích period.

Shimmer je definovaný středním rozdílem mezi amplitudami A sousedních hlasivkových pulsů. Vyjadřuje se obvykle v decibelech [dB], relativní pak v procentech.

$$shimmer(local) = \frac{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}|A_i - A_{i+1}|}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}A_i}. \tag{2.4}$$

Opět byly použity i některé další varianty. Absolutní shimmer

$$shimmer(local, abs) = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}|A_i - A_{i+1}| \quad [dB] \tag{2.5}$$

a shimmer amplitude pertubation quotient **apq3** (resp. **apq5** nebo **apq11**) počítaný ze tří (resp. pěti nebo jedenácti) po sobě jdoucích period

$$shimmer(apq3) = \frac{\frac{1}{N-2}\sum_{i=1}^{N-2}|\frac{A_i + A_{i+1} + A_{i+2}}{3} - A_{i+1}|}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}A_i}. \tag{2.6}$$

Míra periodicity signálu byla měřena poměrem energií harmonických složek k energii složek šumových (HNR). Je uváděna v decibelech [dB].

Jitter, shimmer a HNR se používají jako objektivní měřítka kvality fonace. Jsou poměrně citlivé na dyšné a chraplavé příměsi hlasu. Udává se, že jitter vyšší než 2 % nebo shimmer větší než 1 dB již lze velmi dobře postřehnout sluchem. Zvýšení těchto charakteristik předpokládáme jednak u předškolních dětí, kde se objevuje v rámci dětského kolektivu typický chrapot způsobený přetěžováním hlasivek dlouhodobým křikem a nekontrolovaným fonačním tlakem, a dále také u dětí v období mutace, kde se vlivem morfologických a funkčních změn v oblasti hrtanu dočasně zhorší podmínky pro správnou fonaci. V tomto případě předpokládáme větší nárůst těchto parametrů u chlapců.

Měření jitteru, shimmeru a HNR bylo prováděno na prodloužené fonaci vokálu `/i/`. Velmi patrný je nárůst jitteru u chlapců mezi 13 a 15 lety. U skupiny 14 letých chlapců byl naměřen značný rozptyl hodnot. Poslechem byl u chlapců s velmi vysokými hodnotami jitteru a shimmeru pozorován značný chrapot typický pro probíhající mutaci. U dívek byl v tomto období také pozorován nárůst jitteru, ale mno-

hem menší než u chlapců. Sluchem bylo možno u dívek potřehnout mírné zhrubnutí hlasu. U shimmerů byl navíc pozorován velmi významný nárůst mezi 13 a 15 lety i u dívek. Velmi významné byly i trendy HNR, pochopitelně opačného znaménka.

2.1.3 Formantové frekvence F1, F2

Formantové frekvence odpovídají rezonančním frekvencím dutin hlasového ústrojí. Lze je odhadnout pro jednotlivé samohlásky z LPC (linear predictive coding) spektra například pomocí Burgova algoritmu [29].

Vlivem růstu objemu rezonančních dutin (hrdelní, ústní, nosní) během vývinu dítěte může dojít i k mírnému posunu formantových frekvencí. S postupným zdokonalováním artikulačních dovedností dítěte může také dojít k většímu rozlišení a konkretizaci jednotlivých samohlásek, což by mohlo být doprovázeno oddálením jednotlivých samohlásek od sebe ve formantovém poli a nárůstem obsahu vokalického polygonu. Na druhou stranu u všech dětí lze poslechem jednoznačně určit, který vokál vyslovují a tedy alespoň jejich první dva formanty neopustí meze z tabulky.

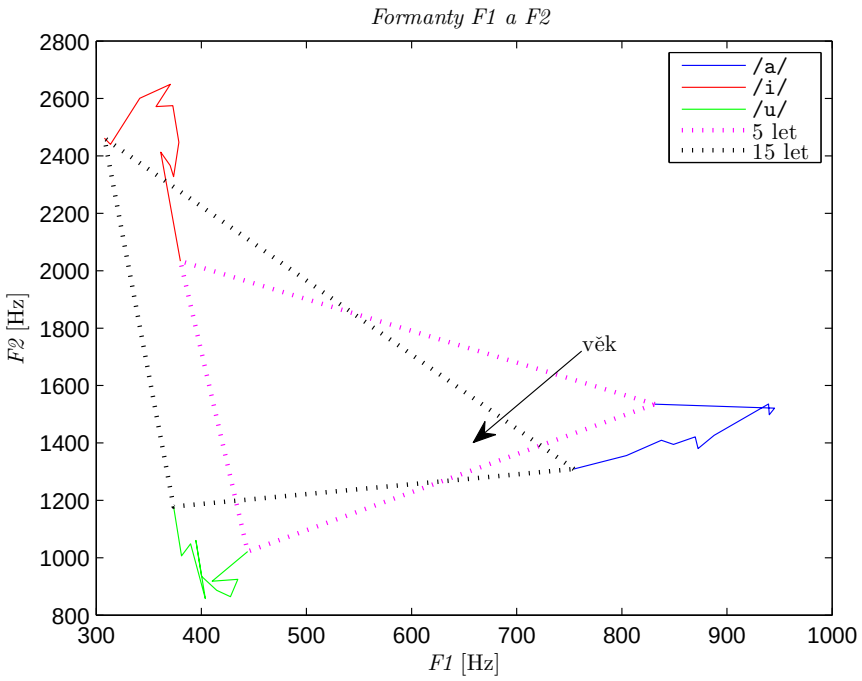
Analýza formantů byla prováděna na prodloužených fonacích samohlásek `/a/`, `/i/`, `/u/`. Jedná se o vrcholy vokalického trojúhelníku. Aby frekvenční intervaly lépe odpovídaly vnímání intonačních intervalů lidským sluchem, byly hodnoty obsahu vokalického trojúhelníku počítány z $F1$ a $F2$ převedených do půltónové stupnice s počátkem v 100 Hz:

$$F(ST) = 12\frac{\ln(F(Hz)/100)}{\ln(2)}. \tag{2.7}$$

Obsah vokalického trojúhelníku je tedy udáván ve čtverečních půltónech ST^2.

Věková závislost je zde podle očekávání mnohem nižší než u $F0$. Přesto se u obou formantů všech tří zkoumaných samohlásek prokázala věková závislost alespoň na hladině významnosti $p < 0,01$.

První formant vždy s věkem mírně klesá stejně jako druhý formant hlásky `/a/`. Naproti tomu druhý formant hlásek `/i/` a `/u/` s věkem spíše roste (obr. 2.2). Obsah formantového trojúhelníku však věkově závislý není.



Obrázek 2.2: Velikost a pozice vokalického trojúhelníku v závislosti na věku dítěte

2.2 Věková závislost charakteristik neznělých sibilantů

Sibilanty (sykavky) jsou podskupinou frikativ a vyznačují se vyšší amplitudou i frekvencí. K základnímu popisu těchto ryze šumových konsonant použijeme následující spektrální charakteristiky.

Špatná výslovnost sykavek patří k velmi častým problémům, které jsou řešeny v logopedické praxi. Kvalita sykavky se odráží ve frekvenčním rozložení její energie a některé z výše uvedených spektrálních charakteristik by ji mohly popsat. Za optimistického předpokladu, že se s vývojem řeči zlepšuje i kvalita sykavek, bychom mohli předpokládat věkovou závislost jejich popisných charakteristik.

Spektrální charakteristiky byly naměřeny pro realizace sykavek `/s/` a `/ss/`. Oproti očekávání však skoro žádný spektrální moment nevykazoval věkovou závislost. Velice slabě korelovalo s věkem pouze spekrální zešikmení ($r = 0,17$; $p < 0,01$, $n = 246$) a spekrální špičatost ($r = 0,20$; $p < 0,005$, $n = 246$) souhlásky `/ss/`.

Vzhledem k velkým rozptylům, množství odlehlých hodnot a v neposlední řadě i jisté závislosti tvaru spektra na umístění mikrofonu a případných turbulencí dechového proudu o pouzdro mikrofonu (i přes použití molitanového windshieldu), nelze považovat tyto věkové závislosti za příliš statisticky významné.

2.3 Analýza srozumitelnosti slov

Při posuzování srozumitelnosti (resp. patlavosti) dětské řeči použijeme vedle analyzované promluvy i promluvu referenční stejného obsahu, precizně vyřčenou. V matici vzdáleností jednotlivých segmentů v prostoru dané řečové parametrizace nalezneme křivku DTW. Kumulativní vzdálenost podél křivky DTW bude značně korelovat s nesrozumitelností zkoumané promluvy (Zlatník [40]).

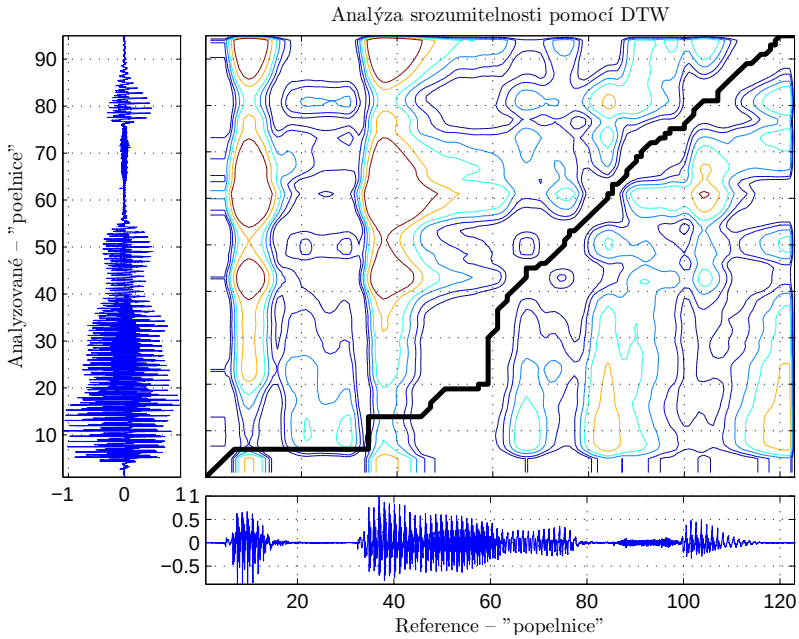
Obě promluvy mají stejný lingvistický obsah, ale různá časování. Máme-li tedy dobře ohraničené zkoumané promluvy, víme, že první i poslední segmenty promluv si budou odpovídat. Ostatní segmenty obou promluv k sobě přiřadíme pomocí funkce DTW [30], kterou nalezneme jako optimální cestu v matici vzdáleností v prostoru dané parametrizace.

Optimální cestou rozumíme tu, která minimalizuje vážený součet hodnot, kterými prochází, přičemž cesta se smí tvořit pouze tak, aby každý z indexů navštíveného bodu byl maximálně o jedna větší než příslušný index předchozího bodu. Diagonální postup je započítáván s dvojnásobnou vahou.

Ukázalo se, že metoda analýzy srozumitelnosti slov založená na kumulované vzdálenosti podél průběhu křivky bortivé funkce DTW je velice citlivá na promluvy zkreslené patláním. Lze se domnívat, že s vývojem artikulačních schopností dítěte bude méně často docházet k podobným výslovnostním nepřesnostem a hodnota kumulovaného součtu bude s věkem klesat.

K analýze srozumitelnosti byla použita na výslovnost náročnější tříslabičná a čtyřslabičná slova (*fotbalista, popelnice, čokoláda, velryba, hamburger* a *Rákosníček*). Z uvedených parametrizací řečového signálu nejlépe odpovídala subjektivnímu posouzení srozumitelnosti kumulovaná vzdálenost v prostoru CLPC a RASTA-PLP parametrů. Jako referenční byly zvoleny promluvy 15 letého chlapce s bezvadnou výslovností. Analýzu patlaného slova ilustruje obr. 2.3.

Obr. 2.4 ukazuje věkovou závislost srozumitelnosti slova „*fotbalista*“ jednak pro



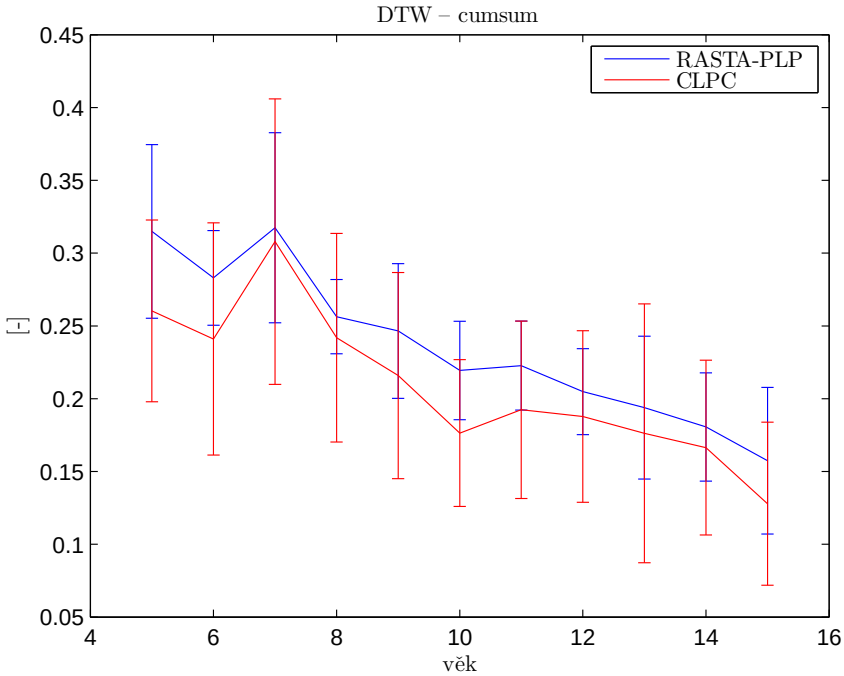
Obrázek 2.3: Analýza srozumitelnosti patlaného slova „*poenice*“

Tabulka 2.1: Věková závislost srozumitelnosti tříslabičných a čtyřslabičných slov pro CLPC a RASTA-PLP parametrizaci

slovo	**CLPC**		**RASTA-PLP**	
	r	p	r	p
fotbalista	-0,500	$p < 0,001$	-0,718	$p < 0,001$
popelnice	-0,515	$p < 0,001$	-0,711	$p < 0,001$
čokoláda	-0,553	$p < 0,001$	-0,698	$p < 0,001$
velryba	-0,555	$p < 0,001$	-0,703	$p < 0,001$
hamburger	-0,591	$p < 0,001$	-0,663	$p < 0,001$
Rákosníček	-0,457	$p < 0,001$	-0,533	$p < 0,001$

CLPC a jednak pro RASTA-PLP parametrizaci. Věkovou závislost pro jednotlivá slova shrnuje tabulka 2.1.

Z provedených experimentů bylo ověřeno, že kumulovaná vzdálenost s věkem klesá a promluvy starších dětí jsou tedy srozumitelnější. Největší věkovou závislost vykazovala kumulovaná vzdálenost v prostoru prvních dvanácti RASTA-PLP koeficientů u slova „*fotbalista*“ kde byla korelace s věkem $r = -0,718$ ($p < 0,001$,



Obrázek 2.4: Věková závislost kumulované vzdálenosti podél funkce DTW slova „*fotbalista*“ v prostoru CLPC a RASTA-PLP koeficientů.

$n = 246$). Jedná se o nejsilněji věkově závislý řečový parametr v této práci.

Mírná závislost této charakteristiky na pohlaví se podařila prokázat jen ojediněle a to u slova „*čokoláda*“ a „*Rákosníček*“.

2.4 Věková závislost některých prozodických charakteristik

Do skupiny parametrů pro prozodický popis řeči můžeme zařadit všechny myslitelné suprasegmentální vlastnosti řečového signálu, které souvisí s frekvencí základního hlasivkového tónu, s hlasitostí a s časováním (tedy rytmem a rychlostí řeči). Prozodie doplňuje fonémickou informaci o další lingvistické aspekty. Jedná se hlavně o informativní složku (například intonace věty, umístění přízvuku) a o emocionální složku, ve které se může také zrcadlit postoj řečníka ke sdělované myšlence.

Z prozodie byly z hlediska věkové závislosti zkoumány parametry *rychlost řeči* a *podíl pauz v promluvě*.

2.4.1 Rychlost řeči

Rychlost řeči se váže na celkovou rychlost vyslovení promluvy. Globální rychlost řeči se může vyjádřit počtem slov nebo slabik za minutu. Udává se [31], že v běžné české konverzační řeči člověk vysloví asi 120 slov za minutu. Ukazuje se, že řečovou jednotkou, která nese informaci o trvání, je slabika [29]. Modifikace slabiky při změně rychlosti řeči však není lineární. Změna trvání slabiky ovlivní mnohem více trvání samohláskových segmentů než souhláskových.

Práce [17] porovnává mimo jiné rozdíly v rychlosti řeči u spontánních a čtených promluv. Definuje globální rychlost řeči jako průměrnou délku slabiky (ASD), přičemž do výpočtu nezapočítává pauzy. Rozeznává přitom tři typy pauz: 1) tichou pauzu, jako ticho delší než 150 ms, 2) pauzu vyplněnou hesitačním zvukem a 3) nápadné prodlužování určitých slov, často jako prostředek k napojení pauzy typu 2).

V rámci tohoto výzkumu byla pro měření rychlosti dětské řeči použita říkanka. Děti tuto říkanku říkají zpaměti a mají ji dobře fixovanou. Rychlost řeči tak mnohem více souvisí s čistě artikulačními schopnostmi a není tolik ovlivněna slovní zásobou a schopností výbavy jednotlivých slov jako u spontánní promluvy, nebo zručností ve čtení jako u čtených promluv. I tak očekáváme, že rychlost promluvy s věkem dítěte poroste.

I tento parametr vykazoval velice vysokou věkovou závislost ($r = 0,66$, $n = 248$, $p < 0,001$). U nejmenších dětí byla tato rychlost jen 2,6 slabiky za sekundu, zatímco patnáctiletí byli schopni artikulovat průměrnou rychlostí až 4,7 slabiky za sekundu. Parametr není závislý na pohlaví dítěte. Příjemnou skutečností je i to, že je tento parametr velice nenáročný na automatické určení.

2.4.2 Podíl pauz v promluvě

Dalším analyzovaným prozodickým parametrem bylo procentuální zastoupení pauz v promluvě. Označíme-li l_t celkovou délku promluvy a l_a sumu délek všech jejích artikulovaných úseků, stanovíme procentuální zastoupení pauz pp jako

$$pp = \frac{l_t - l_a}{l_t} .100\,\%. \tag{2.8}$$

Hodnocení podílu pauz v promluvě probíhalo na spontánní promluvě (vyprávění příběhu podle předložených obrázků). Oproti předchozímu případu hodnocení rych-

losti řeči na známé říkance se zde mnohem více promítnou vyjadřovací schopnosti dítěte a jeho jistá řečnická pohotovost. Můžeme předpokládat, že u mladších dětí bude podíl pauz v promluvě vyšší.

Ukazuje se, že tento parametr má poměrně uspokojivou věkovou závislost ($r = -0,507$, $n = 248$, $p < 0,001$) a není závislý na pohlaví dítěte.

2.4.3 Analýza intonace

K prozodickým analýzám tradičně patří i popis intonačního rozpětí a vůbec celkové melodičnosti hlasu. Variabilita $F0$ byla v rámci tohoto výzkumu popsána směrodatnou odchylkou a mezikvartilovým rozpětím $F0$ převedené na půltóny podle 2.7. Analýza byla provedena spíše pro úplnost bez jasně stanovené hypotézy. Nic nenasvědčuje tomu, že by mladší děti měly více monotónní či naopak zpěvnější řeč než starší děti nebo dospělí. Lze se snad domnívat, že s přibýváním mluvních zkušeností budou starší více vědomě využívat intonaci k doplnění čistě fonemické informace, na druhou stranu řeč malých dětí mívá často charakteristickou dětskou zpěvnost.

Analýza variability intonace byla provedena na spontánní promluvě a věkovou závislost skutečně neprokázala.

2.5 Hodnocení věkové závislosti řečových charakteristik

Tabulka 2.2 shrnuje zkoumané řečové charakteristiky. Jednotlivé příznaky jsou seřazeny podle míry korelace s věkem (sloupec r). Sloupec p obsahuje hladiny významnosti, na kterých lze korelační koeficient považovat za různý od nuly.

Tabulka 2.2: Hodnocení věkové závislosti řečových charakteristik (viz text)

	korelace	
charakteristika	r	p
DTW (fotbalista)	-0,72	$p < 0,001$
DTW (popelnice)	-0,71	$p < 0,001$
DTW (velryba)	-0,70	$p < 0,001$
DTW (čokoláda)	-0,70	$p < 0,001$
F0	-0,66	$p < 0,001$
DTW (hamburger)	-0,66	$p < 0,001$
rychlost řeči	0,66	$p < 0,001$
DTW (Rákosníček)	-0,53	$p < 0,001$
HNR	-0,53	$p < 0,001$
podíl pauz	-0,51	$p < 0,001$
schimmer(local,abs)	0,45	$p < 0,001$
schimmer(local)	0,45	$p < 0,001$
schimmer(apq3)	0,45	$p < 0,001$
jitter(ppq5)	0,44	$p < 0,001$
jitter(local,abs)	0,42	$p < 0,001$
jitter(local)	0,40	$p < 0,001$
schimmer(apq5)	0,40	$p < 0,001$
jitter(rap)	0,38	$p < 0,001$
schimmer(apq11)	0,38	$p < 0,001$
F1	-0,30	$p < 0,001$
sp. zešikmení /ss/	0,21	$p < 0,001$
F2	0,20	$p < 0,005$
std /ss/	0,19	$p < 0,005$
sm. odchylka F0	0,17	$p < 0,01$
mezikvart. rozp. F0	0,08	
sp. špičatost /s/	-0,08	
std /s/	-0,03	
sp. těžiště /ss/	-0,03	
sp. těžiště /s/	0,03	
sp. zešikmení /s/	0,03	
sp. špičatost /ss/	0,03	

Kapitola 3

Strojové určení věku dítěte

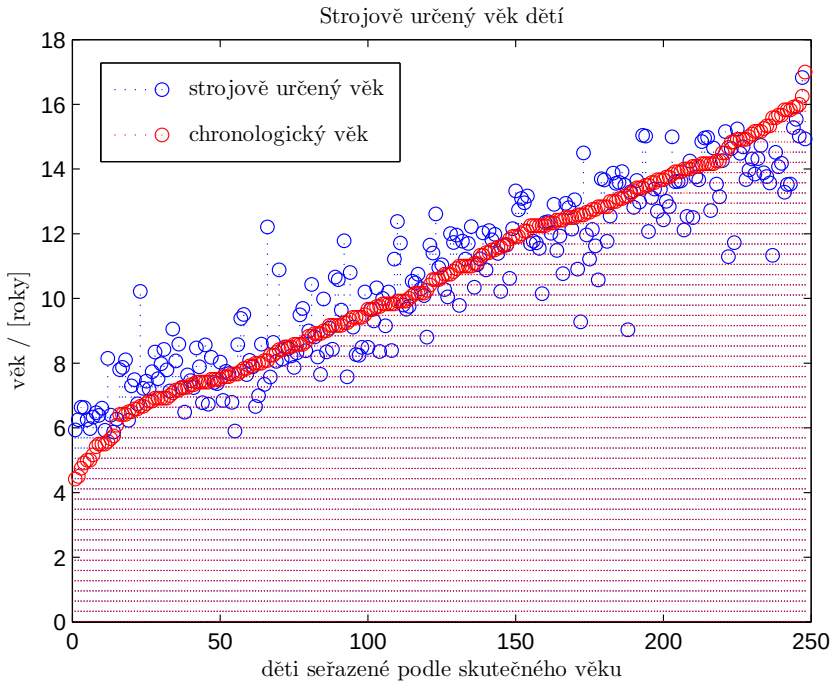
Ke strojovému určení věku dítěte byly využity ty z řečových charakteristik, u nichž byla na základě analýzy rozptylu prokázána věková závislost. Máme tedy numerické vstupní atributy i numerickou vysvětlovanou (cílovou) veličinu. Z metod klasické statistiky bychom mohli použít regresní analýzu a z metod z oblasti data miningu by přicházely v úvahu regresní stromy, genetické algoritmy, neuronové sítě a další metody. Velice zajímavou metodou, která kombinuje klasickou regresní analýzu s regresními stromy, je metoda modelových stromů (model trees) představena J. Ross Quinlanem [32]. Tato metoda byla po několika experimentech zvolena i pro náš odhad věku dítěte.

Metoda modelových stromů vychází ze stromů regresních [1]. Pro větvení vybíráme ten atribut a ten dělicí bod, který maximalizuje kritérium redukce směrodatné odchylky. Rozdíl u modelových stromů je ten, že oproti regresním neuvažují v každém listu průměrnou hodnotu cílové veličiny pro pokrytá trénovací data, ale hodnotu v listu vyjadřují jako lineární kombinaci vstupních atributů získanou metodou nejmenších čtverců. Celkově tedy modelový strom představuje po částech lineární model.

Algoritmus pro sestrojení modelového publikovali roku 1997 Y. Wang a I. H. Witten v práci [38] a jeho současná verze nese označení M5. Pro sestavení modelového stromu byla použita implementace tohoto algoritmu v systému WEKA [7].

Testování sestaveného stromu na trénovacích datech by velice málo vypovídalo o tom, jak dalece bude strom použitelný na nových datech. Snadno totiž může dojít k tzv. přeučení, kdy nalezené znalosti vystihují spíše náhodné charakteristiky trénovacích dat a neodhalí to podstatné, co lze použít pro generalizaci [1]. Proto

byla pro testování stromu použita metoda křížové validace, kdy byla data předem rozdělena na 10 částí tak, že vždy jedna desetina se použila pro testování a zbylých devět desetin pro učení. Tento postup byl zopakován desetkrát a výsledek testování zprůměrován.



Obrázek 3.1: Porovnání skutečného a strojově určeného věku dítěte

Úspěšnost strojového určení věku dítěte je patrná z obrázku 3.1. Skutečný chronologický věk dítěte je vyobrazen červeně a odhad věku z řečových charakteristik pomocí navrženého modelu je vyobrazen modře.

Nalezený model má korelaci se skutečným věkem dítěte 0,92. Průměrná absolutní chyba určení věku dítěte je 0,92 roku a směrodatná odchylka 1,19 roku.

Kapitola 4

Závěry a další cíle

4.1 Shrnutí

V úvodní kapitole byly uvedeny některé již známé věkově závislé parametry a mnohé z nich byly v rámci této práce na databázi českých slov analyzovány. V dalších kapitolách pak byly uvedeny jednotlivé známé i nově navržené řečové parametry a byla popsána jejich případná věková závislost. V závěrečné kapitole byl na základě těchto parametrů navržen věkový klasifikátor, který stanoví logopedický věk dítěte. Tento logopedický věk byl pak porovnán se skutečným – chronologickým věkem dítěte.

Uvedené řečové charakteristiky vykazují různě velikou závislost na věku. Nejčastěji uváděné charakteristiky založené na základní hlasivkové frekvenci vykazují zápornou korelaci s věkem okolo 0,66. Námi navržená metoda měření srozumitelnosti dětské řeči pomocí kumulované vzdálenosti v algoritmu DTW dokonce vykazuje korelaci s věkem u slova *„fotbalista“* až 0,72. Z prozodických parametrů vykazuje poměrně silnou věkovou závislost rychlost řeči (0,66) o něco nižší pak podíl pauz v promluvě (0,51). Oproti výsledkům pořízeným na předchozí databázi zde však nevykazují nijak významnou věkovou závislost spektrální charakteristiky sykavek. Lze se domnívat, že na vině byla kvalita původní databáze. Naopak se začalo ukazovat, že tyto charakteristiky jsou značně odlišné u chlapců a u dívek.

Na základě výběru významných věkově závislých akusticko-fonetických parametrů byl natrénován modelový strom. Pomocí tohoto stromu natrénovaného z 22 řečových parametrů se podařilo strojově odhadnout věk dítěte s průměrnou absolutní chybou 0,92 roku. Míra korelace takto určeného logopedického věku s věkem sku-

tečným dosáhla hodnoty 0,92.

Za konkrétní přínosy této práce považuji následující:

- Vznikla rozsáhlá databáze dětských promluv pocházející od 248 dětí. Databáze obsahuje mimo jiné 5200 izolovaných slov, fonace samohlásek a některých sykavek, sekvence pro měření diadochokineze, říkanku a spontánní promluvu. Databáze je zpracována a je k dispozici k dalšímu využití na katedře teorie obvodů. V současné době slouží jako kontrolní databáze zdravých dětí při zkoumání dětské dysfázie ve výzkumu Ing. Martiny Nejepsové.

- Byla vytvořena rešerše věkově závislých jevů souvisejících s lidskou řečí jak z hlediska čistě anatomického, tak z pohledu akusticko-fonetického.

- V práci je představen silně věkově závislý parametr založený na kumulované vzdálenosti podél křivky DTW. V tomto bodě práce navazuje na výzkum Ing. Petra Zlatníka, Ph.D., který zde na katedře teorie obvodů poprvé prokázal souvislost mezi touto kumulovanou vzdáleností a srozumitelností promluvy. Parametr vykazuje největší věkovou závislost u náročnějších čtyřslabičných slov, kde je jeho korelace s věkem až –0,72.

- Bylo analyzováno cca 40 různých řečových charakteristik od popisu fonémů po prozodické parametry. U 22 byla prokázána různě silná věková závislost, u některých dokonce závislost na pohlaví dítěte. Největší věkovou závislost vykazoval navržený parametr DTW, dále výška základního hlasivkového tónu a rychlost řeči. Ukázalo se, že ve fonaci malých dětí je zvýšená přítomnost neharmonických složek. Přítomnost neharmonických složek pak také narůstá v období mutace. Také se ukázalo, že ve spontánní řeči malých dětí je mnohem větší podíl pauz.

- Na základě výše uvedených poznatků se podařilo strojově určit věk dítěte s průměrnou chybou pod 1 rok a objektivizovat tak pojem logopedického věku.

4.2 Další cíle

Pro realizaci systému věkové klasifikace v reálném čase bude nutné navrhnout ucelenou softwarovou aplikaci. Dílčí algoritmy pro určení jednotlivých atributů jsou

nyní pouze ve formě samostatných skriptů a nedořešená je i problematika plně automatické segmentace. Na druhou stranu k úspěšnému odhadu věku dítěte by software mohl jako vstup vyžadovat pouze prodlouženou fonaci některé samohlásky, složitější čtyřslabičné slovo, říkanku a spontánní promluvu.

Vedle porovnávání odhadnutého věku se skutečným věkem dítěte by také mohlo být zajímavé porovnání s výsledkem percepčního testu provedeného profesionálními logopedy.

V práci byly použity pouze promluvy z prvních pěti úloh, které děti nahrály. Diadochokineze a čtený text (VI. a VII. úloha) zatím nebyly zapracovány. Na několika místech je kromě věkové závislosti zmíněna i závislost parametrů na pohlaví dítěte. I tato skutečnost by si jistě zasloužila důkladnější prozkoumání.

Jak už bylo uvedeno, bude tento výzkum také sloužit jako určitá norma zdravých dětí při analýzách řeči dětí postižených vývojovou dysfázií. První výsledky již uvádí [22], [23], [24].

Literatura

[1] BERKA P.: Dobývání znalostí z databází. Academia 2003

[2] BOERSMA P., WEENINK D. (2011). Praat: doing phonetics by computer [Computer program]. Version 5.2.35, retrieved 1 August 2011 from `http://www.praat.org/`

[3] ČERNOCKÝ J.: Zpracování řečových signálů (studijní opora). Ústav počítačové grafiky a multimédií, FIT, VUT Brno, 2006

[4] ELLIS D. et al.: RASTAMAT. Lab ROSA, Columbia University of New York `http://labrosa.ee.columbia.edu/matlab/rastamat/` [1.9.2011]

[5] GEROSA M., LEE S. et al.: Analyzing Children's Speech: an Acoustic Study of Consonants and Consonant-Vowel Transition. In *Proc. of the International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*,(Tolouse, France), May 2006

[6] GEROSA M., GIULIANI D.: Acoustic variability and automatic recognition of children's speech. *Speech Communication* Volume 49, Issues 10-11, October-November 2007, Pages 847-860

[7] HALL M., FRANK E., HOLMES G., PFAHRINGER B., REUTEMANN P., WITTEN H. I. (2009); The WEKA Data Mining Software: An Update; SIGKDD Explorations, Volume 11, Issue 1.

[8] HENDL J., Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat. Praha: Portál 2009

[9] HERMANSKY H., Perceptual linear predictive (PLP) analysis of speech, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, no. 4, pp. 1738-1752, Apr. 1990.

[10] HERMANSKY H.,MORGAN N., RASTA processing of speech, IEEE Trans. on Speech and Audio Proc., vol. 2, no. 4, pp. 578-589, Oct. 1994.

[11] HUBERT J. E., STATHOPOULOS E. T et al.: Formants of children, women, and men: the effects of vocal intensity variation. *Journal of the Acoustical Society of America* 1999 Sep;**106**(3 Pt 1):1532-42.

[12] JANDA J.: Age Dependence of Children's Speech Parameters. *Acta Polytechnica*. 2009, vol. 49, no. 2-3, p. 40-43. ISSN 1210-2709

[13] JANDA J.: Studie věkově závislých akustických parametrů v dětské řeči. [studie k odborné rozpravě], ČVUT leden 2010

[14] JANDA J.: Analýza rychlosti řeči. [diplomová práce], ČVUT leden 2008

[15] KENT R. D.: Anatomical and neuromuscular maturation of the speech mechanism: Evidence from acoustic studies, *Journal of Speech and Hearing Research*, vol. 19, pp. 421-447, 1976

[16] KOENIG L. L., LUCERO J. C., PERLMAN E.: Speech production variability in fricatives of children and adults: Results of functional data analysis.*Journal of the Acoustical Society of America* **124**, Nov 2008, pp. 3158-3170

[17] KOOPMANS F. J.: Relationship between Discourse Struncture and Dynamic Speech Rate. Institute of Phonetic Science, University of Amsterdam, 1996

[18] LEE S., POTAMIANOS A., NARAYANAN S.: Acoustic of children's speech: Developmental changes of temporal and spectral parameters. *Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 1455-1468, Mar. 1999

[19] MAKHOUL J.: Linear Prediction: A Tutorial Review. Proceedings of the IEEE, 63, 4.4, 1975

[20] MATLAB Signal processing toolbox 6.8. The MathWorks, Inc., 2004

[21] MENARD L., SCHWARTZ J.-L., Articulatory–acoustic relationships during vocal tract growth for French vowels: Analysis of real data and simulations with an articulatory model. *Journal of Phonetics* Volume 35, Issue 1, January 2007, Pages 1-19

[22] NEJEPSOVÁ M., JANDA J., ČMEJLA R. AND HRBKOVÁ M. (2010) "Acoustic analysis of utterances of children with developmental dysphagia", *Akustické listy*, **16**(4): 4-8. (in Czech).

[23] NEJEPSOVÁ M., JANDA J., ČMEJLA R., ŠKODOVÁ E. Š.: Acoustic Analysis of Utterances: Children With Developmental Dysphasia. In Technical Computing Bratislava 2010 [CD-ROM]. Bratislava: RT systems, s.r.o, 2010, p. 1-3. ISBN 978-80-970519-0-7.

[24] NEJEPSOVÁ M., JANDA J., ČMEJLA R., ŠKODOVÁ E. Š.: Analýza promluv dětí s vývojovu dysfázií. In 8. ČESKO-SLOVENSKÝ FONIATRICKÝ KONGRES. Bratislava: Samedi s.r.o., 2010, s. 25. ISSN 1337-2181.

[25] OHNESORG, K. Naše dítě se učí mluvit. Praha : SPN, 1976. ISBN 80-04-25233-8

[26] PALKOVÁ Z., Fonetika a fonologie češtiny. Karolinum, Praha 1994.

[27] POTAMIANOS, A.; NARAYANAN, S.: A review of the acoustic and linguistic properties of children's speech Multimedia Signal Processing, 2007. MMSP 2007. IEEE 9th Workshop on Volume , Issue , 1-3 Oct. 2007 pp. 22 - 25

[28] POTAMIANOS, A.; NARAYANAN, S.: Robust recognition of children's speech. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Volume 11, Issue 6, Nov. 2003 Page(s): 603 - 616

[29] PSUTKA J. et al.: Mluvíme s počítačem česky. Academia, Prague, (2006)

[30] PSUTKA J. et al.: Komunikace s počítačem mluvenou řečí. Academia, Prague, (1995)

[31] PTÁČEK M.: Akustika řeči. Fonetický ústav UK,Praha 1996

[32] QUINLAN Ross J.: Learning with Continuous Classes. In: 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, Singapore, 343-348, 1992.

[33] KÅRE SJÖLANDER, JONAS BESKOW (2006). WaveSurfer [Computer program]. Version 1.8.8, retrieved 1 May 2011 from `http://sourceforge.net/projects/wavesurfer/`

[34] SCHÖTZ, S.: Acoustic Analysis of Adult Speaker Age. In Speaker Classification I. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007

[35] SCHÖTZ, S. Perception, Analysis and Synthesis of Speaker Age, Lund University, ISBN 91-974116-4-7, 2006

[36] UHLÍŘ J., SOVKA P. et al.: Technologie hlasových komunikací. CTU publishing, Prague, (2007) ISBN 978-80-01-03888-8

[37] VORPERIAN K. H., KENT R. D. et al.: Development of vocal tract length during early childhood: A magnetic resonance imagining study. *Journal of the Acoustical Society of America* **117**, January 2005, pp. 338-350

[38] WANG Y.,WITTEN I. H.: Induction of model trees for predicting continuous classes. In: Poster papers of the 9th European Conference on Machine Learning, 1997.

[39] WHITESIDE S. P., MARSHALL J.: Developmental trends in voice onset time: some evidence for sex differences. *Phonetica*, 58 (3). pp. 196-210.

[40] ZLATNÍK P., ČMEJLA R., ŽÁČKOVÁ J., KOMÁREK V.: Vyhodnocování poruch řeči dětí s využitím více řečových charakteristik. *Akustické listy*, prosinec 2007, ročník **13**, číslo 3-4, ISSN 1610-1928.

Seznam vlastních publikací

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Publikace v impaktovaných časopisech: –
Publikace v recenzovaných časopisech:

- Janda, J.: Quantitative analysis of the relative local speech rate. *Lecture Notes in Artificial Intelligence.* 2009, vol. 5641, no. 2009931057, p. 368-376. ISSN 0302-9743. [**100 %**]
- Janda, J.: Age Dependence of Children's Speech Parameters. *Acta Polytechnica.* 2009, vol. 49, no. 2-3, p. 40-43. ISSN 1210-2709. [**100 %**]
- Nejepsová, M. - Janda, J. - Čmejla, R. - Vokřál, J.: Akustická analýza promluv dětí s vývojovou dysfázií. *Akustické listy.* 2010, roč. 16, č. 4, s. 4-8. ISSN 1212-4702. [**25 %**]

Patenty: –
Publikace excerpované WOS: –
Publikace ostatní:

- Janda, J.: Analýza relativní rychlosti řeči. In *Analýza a zpracování řečových a biologických signálů - sborník prací 2008.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008, s. 43-49. ISBN 978-80-01-04243-4. [**100 %**]
- Rusz, J. - Čmejla, R. - Bachurová, H. - Janda, J.: Akustická analýza intenzity a rychlosti řeči u Parkinsonovy nemoci. In *Technical Computing Prague 2008* [CD-ROM]. Praha: Humusoft, 2008, ISBN 978-80-7080-692-0. [**15 %**]
- Janda, J.: Age Dependence of Children's Speech Parameters. In *Poster* 2009 [CD-ROM]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, vol. 1, p. 1-4. [**100 %**]
- Janda, J.: Studie věkově závislých akustických parametrů v dětské řeči. In *Analýza a zpracování řečových a biologických signálů - sborník prací 2009.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, s. 44-49. ISBN 978-80-01-04474-2. [**100 %**]
- Nejepsová, M. - Janda, J. - Čmejla, R. - Škodová, E.Š.: Acoustic Analysis of Utterances: Children With Developmental Dysphasia. In *Technical Computing Bratislava 2010* [CD-ROM]. Bratislava: RT systems, s.r.o, 2010, p. 1-3. ISBN 978-80-970519-0-7. [**25 %**]
- Nejepsová, M. - Janda, J. - Čmejla, R. - Vokřál, J.: Speech characteristics for developmental dysphasia assessment. In *Digital Technologies 2010* [CD-ROM]. Žilina: TU v Žilině, 2010, ISBN 978-80-554-0304-5. [**25 %**]
- Janda, J.: Odhad logopedického věku z řeči dítěte. In *Analýza a zpracování řečových a biologických signálů - sborník prací 2010.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, s. 34-39. ISBN 978-80-01-04680-7. [**100 %**]
- Nejepsová, M. - Janda, J. - Čmejla, R. - Škodová, Š.: Analýza promluv dětí s vývojovu dysfázií. In *8. ČESKO-SLOVENSKÝ FONIATRICKÝ KONGRES.* Bratislava: Samedi s.r.o., 2010, s. 25. ISSN 1337-2181. [**25 %**]
- Rusz, J. - Čmejla, R. - Bartošek, J. - Janda, J. - Lustyk, T. - et al.: Assessment of voice and speech impairment. In *Workshop 2011,CTU Student Grant Competition in 2010 (SGS 2010)* [CD-ROM]. Praha: ČVTVS, 2011. [**13 %**]

Publikace ostatní: –

Summary

The study aims to objectify the logopedical age of a child. While the chronological age is determined by the date of birth, the logopedical age, which in this study is estimated, based on the acoustic and phonetic characteristics of the child's speech, should be used to objectify the assessment of the speech therapist.

The research was motivated by practical experience in the field of phoniatrics and logopedics. When assessing speech pathology in children, physicians and speech therapists often try to subjectively determine, the child's age with normal speech development that the evaluated speech pathology matches. Based on this evaluation, they further conclude the age that the development of speech stopped.

The study presents dozens of speech characteristics for which the rate of dependence on age is assessed. The characteristics with the greatest age dependency are then used to train the classifiers to determine by computer, the logopedical age of a child.

Furthermore, this study is followed by research in developmental dysphasia conducted in collaboration with the Department of Phoniatrics, 1st Faculty of Medicine Charles University and General Faculty Hospital in Prague.

Resumé

Tato práce si klade za cíl objektivizaci tzv. logopedického věku dítěte. Zatímco chronologický věk je jednoznačně určen datem narození, logopedický věk, který je v této práci odhadován na základě akusticko-fonetických charakteristik dětských promluv, by měl sloužit k objektivizaci hodnocení logopedy.

Tento výzkum je motivován praktickými zkušenostmi v oboru foniatrie a logopedie. Při hodnocení dětských patologických promluv se často lékaři a logopedové snaží subjektivně určit, jakému věku dítěte s normálním vývojem řeči odpovídá hodnocená patologická promluva. Z hodnocení potom usuzují, v jakém věku se vývoj řeči zastavil.

V práci je představeno několik desítek řečových charakteristik a je u nich posuzována míra závislosti na věku. Charakteristiky s největší věkovou závislostí jsou pak použity k natrénování klasifikátoru pro strojové určení logopedického věku dítěte.

Dále na tuto práci navazuje výzkum vývojové dysfázie ve spolupráci s Foniatrickou klinikou 1. LF UK a VFN.