

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Diplomová práce

Analýza vysokorychlostního záznamu kmitání hlasivek

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 14. května 2012

Tomáš Ettlér

Poděkování

Především bych rád poděkoval Ing. Pavlu Novému, vedoucímu mé diplomové práce, za užitečné rady, podnětné nápady a čas, který věnoval pro konzultace. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Peštovi z ORL kliniky Fakultní nemocnice Plzeň za poskytnutí dat a za odborné rady v problematice poškození hlasivek. Na závěr děkuji za podporu své snoubence.

Abstract

This work is about finding a reliable method for detection of the vocal cords gap in high speed video sequences and defining a set of parameters to improve diagnosis of damaged vocal cords. Principle of the detection consists in localization of a region of interest and in finding a threshold value for the gap segmentation. Main objective is to get maximal number of parameters available from the high speed video records, which can be further used for an early detection of vocal cord problems.

Parameters in question, such as size of the gap area, length of the perimeter or the center point movement are provided by the software which was developed for this purpose. The application allows automatic evaluation of parameters in most cases but manual adjustment is available as well. Results are stored in text files which can be easily imported into spreadsheets. The program extends capability of the standard software provided by the high speed camera manufacturer.

Obsah

1	Úvod	1
2	Smysl a cíle práce	2
3	Popis hlasivek a jejich funkce	3
3.1	Tvorba hlasu	4
3.2	Poškození hlasivek	4
3.3	Metody vyšetření hlasivek	5
3.3.1	Akustické metody	5
3.3.2	Aerodynamické metody	6
3.3.3	Elektrofyzilogické metody	7
3.3.4	Optické metody	8
3.4	Vysokofrekvenční snímání	9
3.4.1	Pořízení záznamu	10
3.4.2	Parametry záznamu	10
3.4.3	Kvalita snímku	11
3.5	Příklad používaných metod detekce štěrbin	12
3.5.1	Watershed	13
3.5.2	Gabor filtry	13
3.5.3	Region merging	13
3.5.4	Prahování	13
4	Detekce umístění a tvaru hlasivkové štěrbin	14
4.1	Prahování celého snímku	14
4.1.1	Ručně stanovený práh	16
4.1.2	Optimální práh - OTSU	16
4.1.3	Modifikace metody Otsu - Valley Emphasis	18
4.1.4	Metoda minimální chyby	19
4.1.5	Metoda entropie histogramu	20
4.1.6	Výsledek testování	21
4.2	Zvolený postup	22
4.2.1	Nalezení maximálního a minimálního snímku	22
4.2.2	Odečtení snímku	24
4.2.3	Prahování	25
4.2.4	Nalezení největší souvislé oblasti	27
4.2.5	Přesná lokalizace štěrbin	28
4.2.6	Nalezení prahu pro prahování	28

4.2.7	Aplikace prahu na regiony	29
5	Parametry hlasivkové štěrbiny	32
5.1	Velikost plochy štěrbiny	32
5.2	Obvod štěrbiny	33
5.2.1	Aplikace Masky	34
5.2.2	Členitost obvodu	34
5.3	Symetrie hlasivek	35
5.3.1	Osa hlasivkové štěrbiny	35
5.3.2	Normála hlasivkové štěrbiny	37
5.3.3	Podlouhlost hlasivkové štěrbiny	38
5.3.4	Symetrie plochy	38
5.3.5	Symetrie obvodu	39
5.3.6	Symetrie členitosti	40
5.3.7	Těžiště plochy hlasivkové štěrbiny	41
5.4	Popis hranice štěrbiny souřadnicovými křivkami	43
5.4.1	Souřadnicové křivky	43
5.4.2	Fourierova aproximace	43
5.5	Parametry odvozené z aproximace štěrbiny elipsou	44
5.5.1	Podlouhlost elipsy	45
5.5.2	Těžiště elipsy	45
5.6	Parametry jedné periody kmitání	45
5.6.1	Poměr největší a nejmenší velikosti plochy štěrbiny	46
5.6.2	Poměr největší a nejmenší délky obvodu štěrbiny	47
5.6.3	Rychlostní kvocient	47
5.6.4	Kvocient otevření	47
5.6.5	Frekvence kmitání	47
5.7	Parametry celé sekvence snímků	48
5.7.1	Kymogram	48
5.8	Tabulka parametrů	50
6	Aplikace a databáze pro správu dat	52
6.1	Struktura databáze	52
7	Zhodnocení výsledků	54
7.1	Testování metody detekce hlasivkové štěrbiny	55
7.2	Parametry vyšetření a jejich popis	55
7.3	Analýza vývoje parametrů	56
7.4	Problém dlouhých záznamů	56
7.5	Další možné postupy získávání parametrů	57
8	Závěr	58
A	Přílohy	61
A.1	Uživatelská dokumentace k aplikaci	61
A.1.1	Správa pacientů	61
A.1.2	Ruční zpracování videozáznamu	61
A.2	Obsah příloženého DVD	63

1 Úvod

Řeč je důležitý komunikační prostředek mezi lidmi. Na tvorbě hlasu se podílejí dechové ústrojí (plíce), artikulační ústrojí (ústa, jazyk) a fonační ústrojí, jehož nejdůležitější součástí jsou hlasivky. Při poruše hlasu je obtížné rychle komunikovat s dalšími osobami zvláště na větší vzdálenost. Porucha hlasu může být vyvolána řadou příčin, od banálního nachlazení po zhoubné onemocnění hrtanu. Proto je vhodné závažným hlasovým poruchám předcházet pomocí včasné diagnostiky.

Tato diplomová práce se zabývá zpracováním a hodnocením obrazových záznamů pohybu hlasivek pořízené vysokorychlostní kamerou. Cílem je s použitím různých metod získat co nejvíce informací v podobě parametrů, které by mohly pomoci ve včasné diagnostice chorob a k rozpoznání typu dysfunkce hlasivek.

V první části práce jsou hlasivky popsány včetně jejich funkce a chování. Dále jsou popsány metody vyšetření hlasivek, zvláště pak vysokofrekvenční snímání. Jsou zde také popsány současně používané metody pro detekci štěrbiny.

V další části se nachází vlastní postup detekce štěrbiny. Nejprve je vyzkoušena metoda prahování celého snímku, a poté postup, kterým lze dosáhnout lepších výsledků. V tomto postupu je využita detekce pohybu pro přesnější lokalizaci štěrbiny a následné prahování regionu, který vymezuje oblast hlasivek.

Další kapitola popisuje jednotlivé parametry, které lze získat po detekci štěrbiny. Jedná se především o obvod a plochu štěrbiny, symetrii hlasivkových řas a parametry kinematiky hlasivek, např. pohyb těžiště plochy štěrbiny. Speciální část tvoří detekce hlavních osy hlasivkové štěrbiny.

Nakonec je popsán způsob uložení dat o pacientech včetně videosekvence a výsledných parametrů z analýzy hlasivkové štěrbiny.

2 Smysl a cíle práce

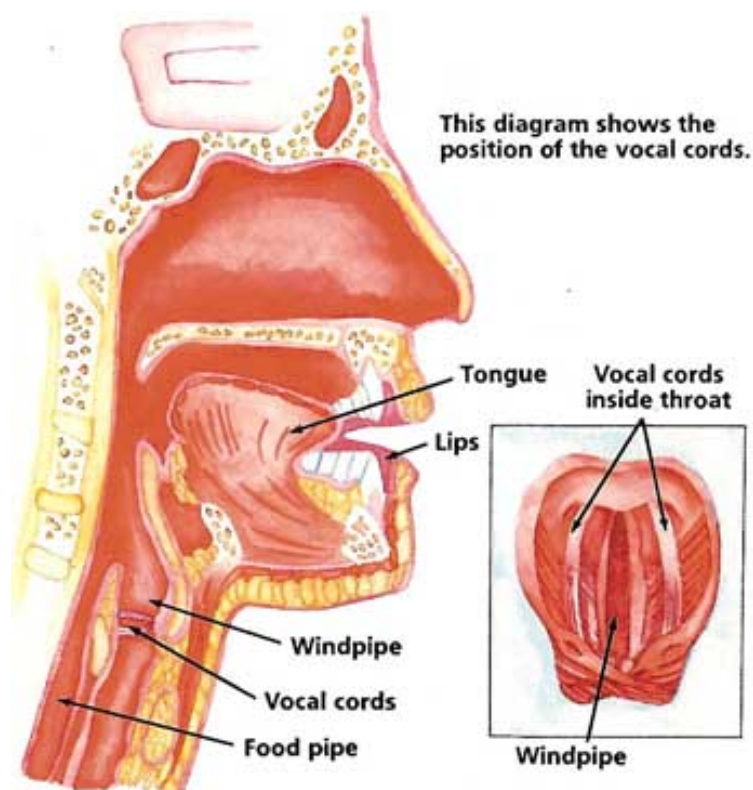
Smyslem této práce je rozšířit stávající postupy a metody diagnostiky hlasového ústrojí, zvláště závěru hlasivek (lat. *glottis*), o další soubor parametrů, který vychází z optické vyšetřovací metody. Jedná se o vyšetření vysokorychlostní kamerou (HSV - High Speed Video). Dodávané systémy HSV mají vlastní metody zpracování a soubory sledovaných parametrů, které jsou v tomto systému ve smyslu uživatele a případných experimentů, rozšiřování a modifikací uzavřené. Proto je cílem této práce nalézt vlastní přístup k detekci hlasivek, spec. hlasivkové štěrbině, a definovat co největší soubor parametrů. Cíle práce lze rozdělit do následujících kroků:

1. Nalézt vhodnou kombinaci metod pro detekci hlasivkové štěrbině ve videozáznamu.
2. Určení hlavních charakteristik štěrbině, např. osa symetrie a hranice štěrbině.
3. Po analýze používaných parametrů doplnit jejich soubor o další parametry, u kterých lze předpokládat vypovídací vlastnost vzhledem k hodnocení kvality hlasivek a jejich závěru, resp. detekci poškození.
4. Vytvořit (navrhnout a realizovat) experimentální systém zpracování záznamu HSV pro sledování jednotlivých parametrů, jejich vypovídacích schopností ve vztahu ke stupni poškození hlasivek a diagnózy a jako součást systému navrhnout databázi pro správu záznamů a výsledků.

3 Popis hlasivek a jejich funkce

Již od starověku se lidé zabývali technikami mluvení a zpěvu. První popis hrtanu však popsal až Leonardo da Vinci a teprve v polovině 19. st. fyziolog J. Muller definoval základní principy tvorby hlasu.

Hlasivky (lat. *glottis*) jsou nezbytný orgán pro tvorbu hlasu. Jsou součástí hrtanu, který se nachází na začátku dolních cest dýchacích a vykonává řadu funkcí. Kromě dýchání a účasti na polykání je to právě funkce fonační, tedy tvorba hlasu. Hlasivky tvoří párový hlasivkový sval, hlasivkové vazy a slizniční hlasivkové řasy (lat. *plicae vocales*), mezi kterými se nachází hlasivková štěrbina (lat. *rima glottidis*) [1]. V klidovém stavu jsou hlasivkové řasy otevřené, aby umožňovaly dýchání. Hlasivková štěrbina mezi nimi má u zdravého člověka tvar protáhlého rovnoramenného trojúhelníka. Hlasivky jsou vidět z ústní dutiny za hrtanovou příklopkou, čehož lze využít pro jejich vizuální analýzu.



Obrázek 3.1: Pozice hlasivek [2]

3.1 Tvorba hlasu

Vzduch procházející hlasivkovou šterbinou je přerušován kmitáním hlasivek. Podle myoelestické metody¹ vzniká kmitavý pohyb souhrou hmoty hlasivek, jejich napětím, elasticitou a poměry, které vznikají při výdechu z plic. Aerodynamicko - aerostatická síla hlasivky od sebe vzdaluje a napětí svalů a vazů vrací hlasivkové řasy k sobě².

Při výdechu se zvyšuje tlak vzduchu, který proudí hrtanem. Během kmitání hlasivek každé jejich uzavření způsobí ráz, který rozkmitá proud vzduchu nad hlasivkami. Ten trvá do té doby, dokud nejsou hlasivky opět otevřeny a tlak mezi subglottickým a supraglottickým³ prostorem se nevyrovná. Tyto rázy způsobují vznik hlasivkového tónu, kdy čím je rychlejší a dokonalejší uzávěr, tím je lepší jeho kvalita. Hlasivkový tón je rezonancí v ústní, nosní a dalších dutinách zesilován a formován do barvy lidského hlasu ([1],[3],[4]).

3.2 Poškození hlasivek

Normální fonace nastává pouze tehdy, pokud jsou vázané parametry (subglottický tlak, napětí a hmota hlasivek, délka kmitajícího segmentu a další) v určitých mezích, jinak dochází k nepravidelnému kmitání ([4],[5]).

Zdravé hlasivky se při tvorbě hlasu pravidelně celé otevírají a celé zavírají, případně se při hlasitém křiku v horní části mírně nedovírají. Pokud je funkce hlasivek narušena, dochází ke vzniku chrapotu, sípání, šelestu či k úplné ztrátě hlasu.

Chrapot může vznikat ze dvou příčin (podle [3]):

1. Změnou hmoty hlasivek, kdy dochází k jejich nepravidelnému kmitání. Aperioidický signál může za vznik drsného a hrubého hlasu (někdy označováno jako vlhký chrapot).
2. Změnou uzavírání hlasivkové šterbiny, kdy při nedomykavosti uniká vzduch, který vytváří vzduchový vír nad hlasivkami. V hlasu je pak slyšet šelest či dyšná příměs.

Chrapot je však obecně příznakem jakékoliv hlasové poruchy a při déletrvajícím chrapotu (déle než 3 týdny) je tedy vhodné provést vyšetření hlasivek.

¹Myoelestická neboli neurodynamická teorie byla definována v roce 1958 Van Den Bergem. Podle jiné, neurochronaxické teorie, kterou popsal francouzský fyzik Husson v roce 1953, hlasivky nevykonávají pohyb pasivně, ale pomocí nervových impulzů. Odpůrci však namítají, že žádný nerv není schopen přenést tolik impulzů, kolik je jich potřeba např. při zpěvu, kdy hlasivky kmitají více než 1000x za vteřinu. Dalším argumentem bylo kmitání hlasivky i při jednostranné obrně, kdy by podle této teorie kmitat neměla. Proto je dnes uznávaná spíše myoelestické teorie.

²Toto fyzikální zdůvodnění myoelestické teorie podal Lieberman v roce 1968

³Prostor pod hlasivkami se nazývá subglottický a prostor nad hlasivkami supraglottický.

Hlasové poruchy se dělí na organické, které jsou způsobené patologicky-anatomickými změnami na hrtanových strukturách, a funkční, kdy hrtan je v pořádku, ale přesto je narušena fonační funkce. Z hlediska vizuálního pozorování jsou podstatné pouze organické poruchy, které lze najít ve snímku. Mezi ně patří podle [4]:

Polyp - slizniční výchlupka vyplněná vazivem.

Uzlík - ohraničené ztlustění sliznice, které brání úplnému zavření štěrbiny.

Edém - dochází k prosáknutí podslizničního vaziva, závěr štěrbiny je často jen v místě edému.

Cysta - zapouzdřený útvar uvnitř hlasivky, vzniká nerovný okraj.

Afonie - hlasivky se k sobě vůbec nepřiblíží, nevzniká žádný hlas.

Obrna zvratného nervu - vzniká nedomykavost na různých místech hlasivek.

3.3 Metody vyšetření hlasivek

První vyšetřovací metodu použil zpěvák M. Garcia v pol. 19. st., který objevil princip nepřímé laryngoskopie pomocí zrcátka. Dále se tímto problémem zabývalo mnoho lékařů, pedagogů a vědců. Poruchami hlasu se v oblasti medicíny zabývá obor laryngologie, ale pro celkovou problematiku tvorby hlasu existuje obor foniatrie, zabývající se fyziologií, patofyziologií, diagnostikou i léčbou.

Postupem času vznikaly různé metody vyšetření hlasivek, které lze dělit do čtyř kategorií - akustické, aerodynamické, elektrofyziologické a optické metody.

3.3.1 Akustické metody

První skupinou metod jsou akustické, které využívají záznamu a analýzy zvuku. Jedná se především o tyto metody:

Hlasové pole

Hlasové pole (VRP - Voice Range Profile) je vyšetřovací metoda, která zkoumá kvantitativní parametry hlasu, a tím získá obraz frekvenčního a dynamického rozsahu projevu. Zavedl ji P. H. Damsté (1970) pod názvem fonetografie, později byla kvůli nevýstižnosti názvu přejmenována na vyšetření hlasového pole.

Metoda spočívá v zaznamenání nejtiššího a nejhlasitějšího hlasu pacienta v celém jeho frekvenčním rozsahu a zanesení hodnot do grafu, kde na vodorovné ose je frekvence a na svislé ose intenzita, která se měří v dB.

Tuto metodu lze použít i na hodnocení zátěžového testu, kdy je porovnáván záznam pořízený před zátěží se záznamem hlasu po zátěži (dlouhé čtení, divadelní představení, zpěv). Únava hlasu pak způsobuje frekvenční nebo dynamické zúžení hlasového pole.

Multidimenzionální analýza

Multidimenzionální analýza (MDVP - Multi-Dimensional Voice Program) je metoda zkoumající objektivní parametry hrtanového tónu a tím základní parametry hlasu pomocí frekvenční analýzy. Mezi hlavní parametry patří index měkké fonace⁴ a dále jitter⁵ a shimmer⁶. Pro ně jsou rozlišovány dva typy hodnot - absolutní, které jsou vypočítávány jako průměr odchylek period a amplitud následujících cyklů hlasivek, a relativní, které jsou vztaheny k průměrným hodnotám všech měřených cyklů [6].

Jedním z komerčně dostupných analyzátorů je program MDVP od firmy Kay Elemetrics, který počítá až 33 parametrů [7]. Tento program se stal standardem pro hodnocení akustických parametrů hlasu, protože jeho výsledky lze porovnávat i s naměřenými parametry zdravé populace.

Hodnocení kvality závěru hlasivek

Podstatou metody hodnocení kvality uzávěru glottis je Fourierova analýza jedné periody kmitání hlasivek s cílem detekce přechodového děje jako odezvy na tlakový puls vyvolaný závěrem glottis. Normované amplitudy vypočtené z koeficientů Fourierovy řady pak podle znaleckého hodnocení, které je dáno výsledky vyšetřovacích metod i mnohaletou zkušeností, určují hodnotu SCORE na jednoduché stupnici. Hodnotu Score lze využít k hodnocení funkce hlasivek a případnému stanovení diagnózy hlasové poruchy[9].

Tato metoda se rozvíjí na ORL klinice Fakultní nemocnice Plzeň.

3.3.2 Aerodynamické metody

Další skupinou jsou metody aerodynamické, které jsou založené na sledování dýchání nebo na měření rychlosti a množství vzduchu procházejícího hlasivkovou štěrbinou:

⁴Index měkké fonace - SPI (soft phonation index) je poměr energie harmonických frekvencí v rozsahu 70-1600Hz k energii v rozsahu 1600 - 4500Hz.

⁵Jitter - parametr popisující stupeň poruchy periodicity základní frekvence

⁶Shimmer - parametr poruch amplitudové stability [8]

Pneumografie

Pneumografie je stará metoda, která se zabývá zkoumáním pohybu hrudníku a břicha při dýchání a fonaci. Tuto metodu poprvé použil Gutzmann ve 20. letech 20. století pomocí tenkostěnné gumové hadičky, která přenášela změnu tlaku na kymograf⁷. Tato metoda byla dále zdokonalována a bylo možné sledovat daleko jemnější pohyby.

Výsledkem vyšetření byly dvě křivky - hrudní a břišní. Podle nich se dále hodnotila frekvence dechu v klidu, poměr vdechu k výdechu, synchronizace mezi křivkami, chování během fonace a další parametry.

Pneumotachografie

Pneumotachografie nahradila v 60. letech 20. století pneumografii. Je založena na měření rychlosti vzduchu a jeho množství procházejícího hlasivkami při fonaci. Součástí této metody bylo i měření subglottického tlaku (tlaku vzduchu pod hlasivkami), ale této hodnoty nebylo možné docílit neinvazivními metodami, proto se od toho upustilo.

Základními parametry jsou fonační objem, maximální fonační doba, průměrná rychlost vzduchu a fonační kvocient, k jehož výpočtu je třeba znát vitální kapacitu plic. Tato metoda však poslouží k posouzení funkce hrtanu a stupni poškození, nikoliv však pro diagnózu onemocnění, jelikož nedokáže nalézt příčinu změny jednotlivých parametrů.

3.3.3 Elektrofyziologické metody

Do třetí skupiny můžeme zařadit metody elektrofyziologické, které pro vyšetření hlasivek využívají změny elektrických vlastností při fonaci:

Elektroglottografie

Tuto metodu, která se zabývá sledováním změn elektrického odporu při kmitání hlasivek, zavedl v r. 1957 Fabre. Snímací elektrody jsou umístěny nad křídly štítné chrupavky a je vymezeno 6 bodů v glottogramu odpovídajícím jednotlivým fázím pohybu hlasivek a tvaru hlasivkové štěrbině.

Tato metoda však neumožňuje určit příčiny poruch a nikdy se příliš nerozšířila.

⁷Kymograf - přístroj zaznamenávající pohyb

Elektromyografie

Elektromyografie je metoda, která sleduje aktivitu svalů při fonaci. Poprvé ji navrhl Seiffert v r. 1919 a využívá jehlových elektrod zavedených do svalů kolem hlasivek. Tato metoda přispěla k objasnění aktivity svalů během fonace a dnes se využívá hlavně k ověřování přerušování zvrtného nervu při obrně.

Metoda měří aktivitu jednotlivých svalů a velikost amplitud potenciálů.

3.3.4 Optické metody

Poslední skupinou jsou metody optické:

Laryngoskopie

Laryngoskopie je metoda sledování hrtanu a hlasivek pomocí zrcátka (nepřímá laryngoskopie) nebo optických vláken (přímá laryngoskopie). Zrcátko nebo laryngoskop se vloží do úst a odrazem, resp. světlovody, lze pozorovat hlasivky. Sledovat lze ale pouze stav hlasivek, jejich pohyb není kvůli jejich rychlému kmitání okem rozeznatelný. Tato metoda byla poprvé použita už v r. 1854 zpěvákem Garciou [10].

Laryngostroboskopie

Laryngostroboskopie umožňuje pozorování kmitů hlasivek pomocí stroboskopického jevu⁸, kdy blikající světlo má nepatrně odlišnou frekvenci od frekvence kmitání hlasivek, které je kvůli své vysoké frekvenci okem nerozlišitelné. Dochází k optickému zpomalení kmitání hlasivek a je tedy možné pozorovat jejich chování. Pro laryngoskopické vyšetření je potřeba ustálené kmitání, jinak nedochází k efektu zpomaleného pohybu.

Videokymografie

Videokymografie je metoda založená na matematicko-optickém modelu v příčném řezu hlasivek. Umožňuje je vyšetřit v jakékoliv pozici od přední po zadní komisuru. Přesně graficky zobrazuje frekvenci i amplitudu kmitů hlasivek a lze pozorovat chování při otevírání a uzavírání. Pro záznam je zapotřebí vybavení schopné snímat jeden řádek obrazu vysokou rychlostí (v řádu tisíců rádků za vteřinu) a softwarové vybavení ke zpracování nasnímaných dat a uložení výsledného snímku [11].

⁸Stroboskopie je jev založený na setrvačnosti vnímání lidského oka, kdy při určité frekvenci blikajícího světla, která je blízká frekvenci periodicky rychle pohybujícího se objektu, se pohyb objektu zdánlivě zpomalí.

Výsledkem vyšetření je snímek, který je poskládaný z jednotlivých řádků a znázorňuje pohyb hlasivkových řas ve sledovaném místě.

Vysokofrekvenční snímání

Vysokofrekvenční snímání (HSV - High Speed Video) je metoda ke sledování chování hlasivek vysokofrekvenční kamerou, která dokáže zaznamenat více než 1000 snímků za vteřinu. Zaznamenán je na rozdíl od videokymografie celý obraz hlasivek. Tato metoda se objevuje až s vývojem technologie snímání obrazu a nahrazuje předchozí metody. Podrobný popis metody je v kapitole 3.4.

Pro vyšetření a diagnostiku poruchy hlasu se v dnešní době používá nejčastěji kombinace akustických a optických metod, jelikož jsou nejméně náročné na pacienta a dokáží získat velké množství relevantních parametrů. Tato práce se zaměřuje na zpracování a vyhodnocení snímků ze záznamu vysokorychlostní kamery.

3.4 Vysokofrekvenční snímání

Pro získání vysokofrekvenčního záznamu je zapotřebí kamera, která dokáže zaznamenat více než 1000 snímků za vteřinu (standardní kamera dokáže zachytit maximálně 100 snímků za vteřinu). Mezi největší výrobce těchto speciálních kamer patří firmy Kay Elemetrics⁹ a Richard Wolf¹⁰. Zpracovávané snímky v této práci byly pořízeny kamerou HRES ENDOCAM 5562 (obr. 3.2) od firmy Richard Wolf na ORL klinice ve Fakultní nemocnici Plzeň na Borech, která dokáže zachytit až 4000 snímků za vteřinu.



Obrázek 3.2: Vysokorychlostní kamera HRES ENDOCAM 5562 od firmy Richard Wolf

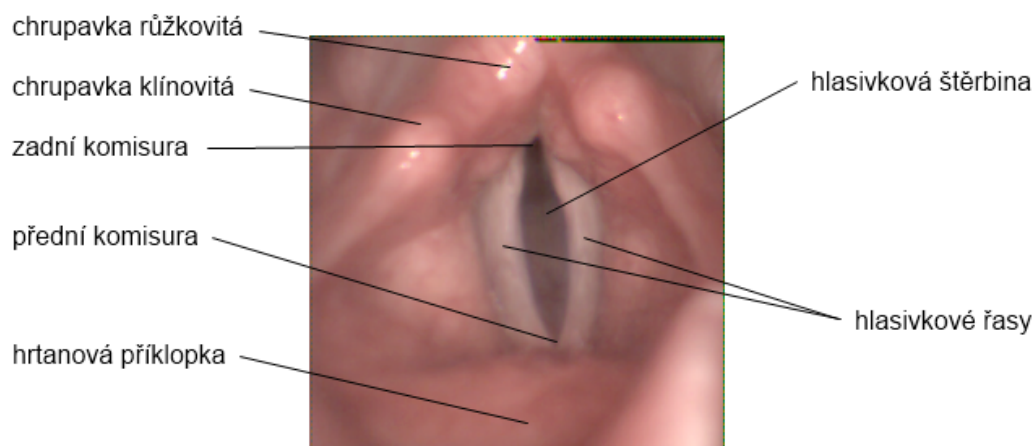
⁹Kay Elemetrics Corp. je americká firma zabývající se výrobou medicínského hardwaru a softwaru, <http://www.kayelemetrics.com>.

¹⁰Německá firma Richard Wolf je výrobcem zdravotnické techniky, <http://www.richard-wolf.com>.

3.4.1 Pořízení záznamu

Kamera je tvarem uzpůsobená k tomu, aby ji bylo možné vložit do úst a zaznamenat tím oblast hlasivek. Také obsahuje světelný zdroj k osvětlení snímaného prostoru. Při laryngoskopickém vyšetření je při vydávání hlásky *á* vloženou kamerou zaznamenán pohyb hlasivek. Toto vyšetření slouží k diagnostice a používá se také ke sledování postupu hojení po chirurgickém zákroku.

Hlasivky kmitají při fonaci podle výšky hlasu od 100 do 500Hz, tudíž lze na záznamu pozorovat hlasivky v různých fázích pohybu - při 4000 snímcích za vteřinu vychází až 40 snímků na jednu periodu kmitání hlasivek. Při osvětlení hlasivek získají hlasivkové řasy světlou barvu a hlasivková štěrbina zůstane tmavá. Toho lze využít při zpracování obrazu a analýze hlasivek (viz kap. 4).



Obrázek 3.3: Snímek hlasivek z vysokorychlostní kamery

3.4.2 Parametry záznamu

Videosekvence obsahuje několik vteřin záznamu, což může být i přes 10000 snímků. Pro analýzu ale stačí kratší úsek sekvence, např. 100 snímků, kdy je zaznamenáno pouze několik kmitů hlasivek. To odpovídá méně než třem setinám vteřiny. Vzhledem k setrvačnosti hmoty kamery a hlavy pacienta není nutné dále uvažovat možný vzájemný pohyb kamery a hlasivek, a jednotlivé snímky lze považovat jako stejno-
lehlé.

Konkrétní parametry vybraných vysokorychlostních kamer lze vidět v tab. 3.1.

parametr	KayPentax 9710	Wolf HRes Endocam 5562
frekvence snímání [snímků/s]	2000	4000
rozlišení (pixely)	512 x 512	256 x 256
max. délka záznamu [s]	4,096	4

Tabulka 3.1: Tabulka parametrů vybraných vysokorychlostních kamer

Rozlišení vysokorychlostní kamery Wolf Hres Endocam, kterou jsou pořízeny záznamy použité v této práci, je 256 x 256 pixelů a záznam je ukládán do souboru ve formátu avi¹¹. Jednotlivé snímky nejsou komprimovány, každý obrazový bod je definován třemi bajty (barevné složky RGB).

3.4.3 Kvalita snímku

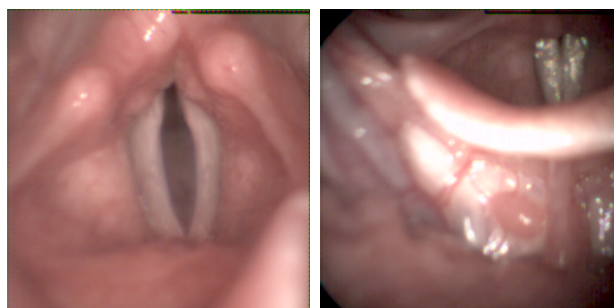
Pořízené snímky dosahují rozdílných kvalit. Kvůli různým fyziologickým propozicím pacientů či práce lékaře (různý úhel a vzdálenost snímání) se snímky od sebe liší. Podle několika parametrů můžeme hodnotit jejich kvalitu z ohledem na automatické zpracování:

1. Snímky, které jsou správně nasvětlené, rozdíl jasů mezi štěrbinou a okolím je velký (obr. 3.4(a)). V těchto snímcích je automatické detekce hlasivkové štěrbinou úspěšná.
2. Snímky, kde je malý rozdíl jasů štěrbinou a okolí, nejsou správně nasvětleny nebo obsahují velké množství šumu. U těchto snímků může automatická detekce selhávat a je nutný ruční zásah.
3. Snímky, kde není štěrbinou rozeznatelná od okolí (obr. 3.4(b)). Špatná kvalita také může být způsobena špatným zaostřením optiky, kdy je snímek rozmazaný a nelze přesně určit okraje hlasivkových řas. Štěrbinu na těchto snímcích nelze automaticky ani ručně správně detekovat.

V této práci se především předpokládá první druh kvality záznamu, kdy lze štěrbinou správně detekovat a lze tak počítat všechny parametry. Ve druhém případě je již nutný zásah uživatele, aby upřesnil parametry metody podle subjektivního vnímání. Ve třetím případě není možné použít automatickou detekci pro rozpoznání štěrbinou, nebo je nutné snímek razantně upravit.

Dále je možné snímky rozdělit do dvou kategorií podle zakrytí štěrbinou:

¹¹AVI - Audio Video Interleave je formát multimediálního kontejneru, který uvedla firma Microsoft v r. 1992. Umožňuje uložit více datových stop, které mohou obsahovat video, audio, efekty či text. Tato data mohou být zakódována pomocí specifických kodeků. Struktura avi kontejneru je popsána v [12].



(a) Kvalitní záznam (b) Nekvalitní záznam

Obrázek 3.4: *Kvalita snímků*

- a) Na snímku je zobrazena celá štěrbina včetně přední a zadní komisury.
- b) Na snímku je část štěrbiny zakryta nebo oříznuta na okraji snímku (obr. 3.5). Tento případ může nastat při pohybu hrtanové příklopky, která zakryje přední komisuru nebo vystoupením růžkovité chrupavky, která zakryje zadní komisuru.

V prvním případě můžeme vypočítat všechny parametry, ve druhém některé vypočítané parametry nebudou přesné nebo je nelze vypočítat. V této práci se předpokládá první kategorie kvality. Při použití aplikace jsou vypočteny a uloženy všechny parametry, při interpretaci dat je však potřeba brát v potaz, že z důvodu nekvalitního záznamu nemusí být všechny výsledky relevantní (např. z důvodu zakrytí je vypočtená velikost plochy menší než skutečná velikost plochy štěrbiny).



Obrázek 3.5: *Snímek, kde není vidět celá hlasivková štěrbina*

3.5 Příklad používaných metod detekce štěrbiny

Pro detekci a analýzu hlasivkové štěrbiny je v současnosti používáno několik metod v různých kombinacích. Jejich přesné použití a přesné postupy jsou ale často součástí know-how firem a uzavřených softwarových produktů, které jsou dodávány společně se systémy HSV jako celek. Podle dostupných materiálů jsou ale často používané metody Watershed, Gabor filtry, tzv. region merging a různé verze prahování.

3.5.1 Watershed

Často se využívá metoda watershed (rozvodí) [13], kdy hodnota jasu ve snímku (obvykle ve stupních šedi) jakoby reprezentuje nadmořskou výšku. Každý bod je pak zaplaven vodou, která stéká nejstrmějším směrem na sousední bod a dále, dokud se nedostane do lokálního minima. Po této aplikaci na všechny body lze najít rozhraní mezi jednotlivými rozvodími a tím určit hranice segmentů. Tato metoda je ale náchylná na šum, je proto vhodné použít jako preprocessing některou z metod na odstranění šumu. Dalším problémem může být vznik příliš mnoha segmentů, kdy není jednoduché rozhodnout, který z nich je ten hledaný. Tuto metodu můžeme nalézt v [14].

3.5.2 Gabor filtry

Mezi další používané metody patří tzv. Gabor filter [15]. Tento lineární filtr je možné využít při zpracování obrazu pro detekci hran, segmentaci a analýzu charakteru obrazu. Často se využívá knihovny, která obsahuje více gaborových filtrů v různých směrech. Tato metoda je využita v [16], [17].

3.5.3 Region merging

Region merging (spojování oblastí) je metoda používaná v případě, pokud segmentací obrazu získáme mnoho oblastí. Metoda je založena na porovnávání vlastností jednotlivých oblastí a pokud jsou tyto vlastnosti podobné, jsou oblasti spojeny. Tato metoda je podrobně popsána v [18].

3.5.4 Prahování

Další používanou metodou je prahování obrazu, kdy se využívá tmavé zbarvení hlasivkové štěrbin. Prahování je funkce, která upravuje hodnoty jasu vstupního snímku podle předpisu $f(x) = A$ pro $x < t$ a $f(x) = B$ pro $x > t$, kde x je vstupní hodnota jasu, t je práh a A a B jsou nové výstupní hodnoty, často minimální a maximální možný jas. Prahování je tedy nejjednodušší způsob segmentace a výsledkem je pak dvoubarevný snímek.

Prahování se provádí buď ručně, kdy se hodnota prahu zvolí subjektivním dojmem, nebo automaticky pomocí zvolené matematické či statistické funkce. K automatickému prahování se téměř vždy využívá histogramu, což je vektor absolutních četností výskytu jasu (barvy) v obrázku, a statistických veličin z něj vycházejících.

Prahování pro segmentaci hlasivkové štěrbin je například v [19] doplněno o další metody, jako jsou eroze či region growing (růst oblastí).

4 Detekce umístění a tvaru hlasivkové štěrbiny

Ve snímku hlasivek je pro účely analýzy nejdůležitější vlastní hlasivková štěrbina. Díky osvětlení při snímání je tato štěrbina tmavá na rozdíl od okolí. Jako nejjednodušší způsob její lokalizace se jeví na snímek užít metody prahování.

4.1 Prahování celého snímku

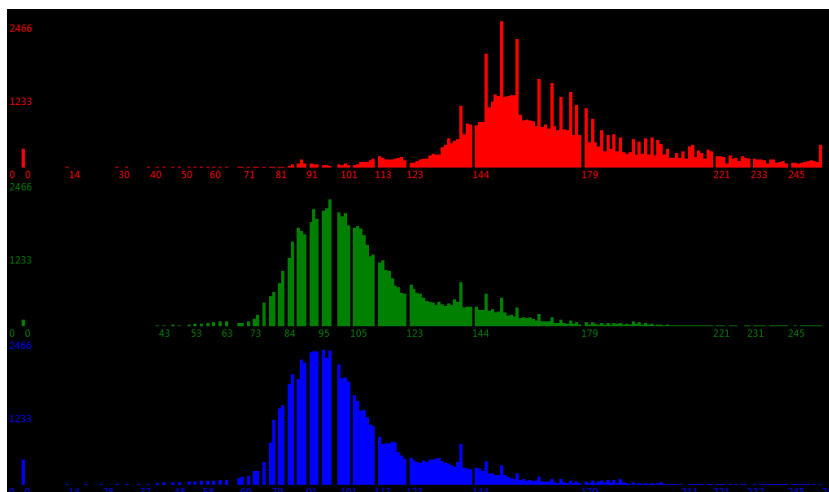
Protože ne každý záznam je pořízen ze stejné vzdálenosti a úhlu, snímky jsou různě nasvětleny, a proto není vhodné použít předem určený pevný práh. Aby byl nalezen vhodný práh v každé sekvenci, je nutné nalézt automatickou metodu, jak určit práh pro každý záznam zvlášť.

V posledních letech zažívá renezanci metoda optimálního prahu, kterou popsal N. Otsu v roce 1979. Objevují se nové modifikace této metody, kdy jedna z nich, Valley Emphasis, se zaměřuje na prahování snímků s bimodálním histogramem¹. Další známou a používanou metodou je prahování, které je založeno na výpočtu maximální entropie - metoda entropie histogramu. Poslední metodou je metoda minimální chyby, která pro nalezení prahu využívá aproximaci normálním rozložením. Ta byla vybrána kvůli dobrým výsledkům při hledání malého objektu ve snímku.

Pro prahování lze využít hodnotu jasu ve snímku nebo jednotlivé barevné složky². Podle histogramu (obr. 4.1) je pro prahování snímků hlasivek nejvýhodnější využít červenou barevnou složku, protože rozložení četností jejích intenzit je nejširší, a proto by výsledky měly být nejpřesnější. Celkový jas vychází hlavně ze zelené složky, takže jeho využití není výhodné.

¹Bimodální histogram se vyznačuje tím, že obsahuje dva oddělené vrcholy, mezi kterými se vyskytuje sedlo. Pokud je v histogramu pouze jeden vrchol, jedná se o unimodální histogram. Při více vrcholech je histogram multimodální.

²Každý snímek se skládá z pixelů (obrazových bodů), kde každý pixel je určen třemi bajty, tj. 256 možných hodnot pro červenou, zelenou a modrou barvu (Red, Green, Blue - RGB), kde tyto hodnoty vyjadřují zastoupení jednotlivých barev. Pro každý pixel je možné vypočítat hodnotu jasu, kdy kvůli nerovnoměrnému vnímání jednotlivých barev u lidského oka je stanoven vzorec pro jeho výpočet na $Jas = 0.3R + 0.59G + 0.11B$. Z toho je patrné, že modrá složka jas ovlivňuje nejméně a zelená nejvíce. Pokud hodnotu jasu dosadíme do všech tří barevných složek u jednotlivých pixelů, získáme šedotónový snímek.



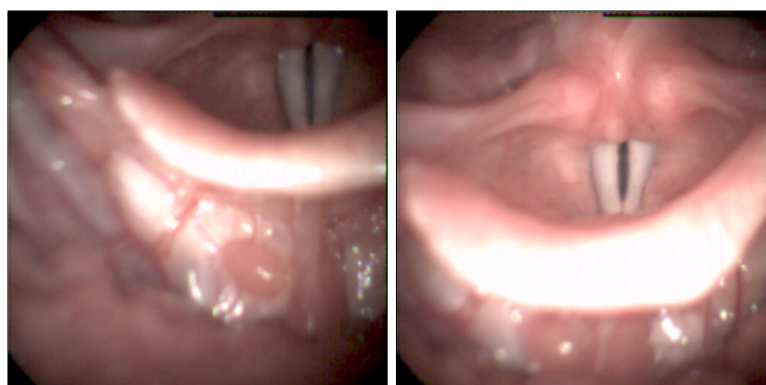
Obrázek 4.1: *Histogram snímku hlasivek*

Testování metod proběhlo na vybrané množině reálných snímků (obr. 4.2). Ve výběru se nachází snímky různé kvality ve fázi maximálního otevření. Další testovací snímky jsou v příloze.



(a) Vzorek 10

(b) Vzorek 16



(c) Vzorek 19

(d) Vzorek 20

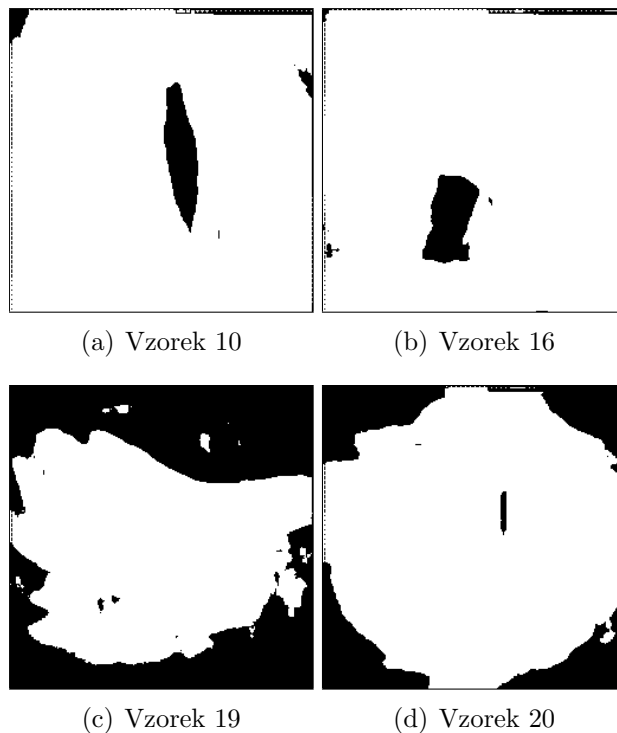
Obrázek 4.2: *Testovací vzorek snímků*

4.1.1 Ručně stanovený práh

Určení hodnoty prahu ručně vyžaduje přímý vstup uživatele do procesu prahování, kdy je postupně nalezena nejlepší hodnota podle okamžité zpětné vazby, která zobrazuje výsledek. Práh je pak buď zafixován a použit na všechny snímky nebo je zapotřebí upravit jeho hodnotu pro každý snímek zvlášť, což znemožňuje automatický proces.

Testování metody

Výsledek ručního prahování je na obr. 4.3, kdy byl práh nastaven na hodnotu 120, která nejlépe vyhovovala prvnímu snímku.



Obrázek 4.3: Testovací vzorek snímků po ručním prahování.

4.1.2 Optimální práh - OTSU

Popis metody

Metoda optimálního prahu OTSU [20] pracuje se statistickými údaji histogramu. Myšlenka spočívá ve výběru prahu tak, aby obě třídy (všechny body s hodnotou jasu menší, resp. větší než práh) měly co nejmenší rozptyl (4.1), případně aby rozptyl

mezi třídami (4.2) byl co největší (4.4) [21].

$$\sigma_w^2(T) = \omega_0(T)\sigma_0^2(T) + \omega_1(T)\sigma_1^2(T) \quad (4.1)$$

$$\sigma_b^2(T) = \omega_0(T)\omega_1(T) (\mu_0(T) - \mu_1(T))^2 \quad (4.2)$$

Pro výpočet $\omega_0(T)$ a $\omega_1(T)$ platí vztahy (4.3).

$$\omega_0(T) = \sum_{i=0}^{T-1} p(i) \quad \omega_1(T) = \sum_{i=T}^N p(i) \quad (4.3)$$

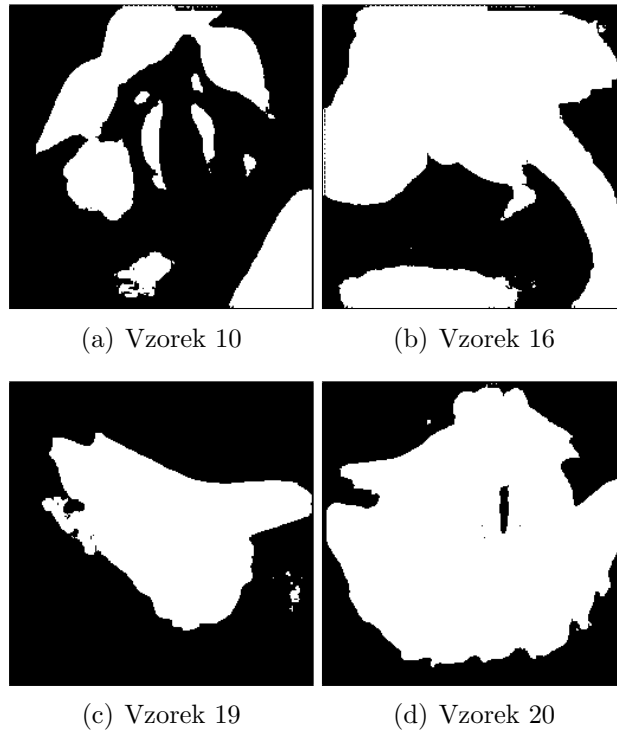
Hodnota p_i je hodnota relativního histogramu v jasu i , což odpovídá pravděpodobnosti výskytu jasu ve snímku. N je počet úrovní jasu a T je práh. Rozptylu mezi třídami se využívá z důvodu jednoduššího výpočtu.

$$T = \operatorname{argmax}(\sigma_b^2(T)) \quad (4.4)$$

Ve vztahu (4.4) kriteriální funkce $\sigma_b^2(T)$ (4.2) popisuje rozptyl hodnot jasů mezi třídami, tím se dosáhne pro daný histogram maximální separace jasových tříd.

Testování metody

Výsledek prahování testovacích snímků metodou Otsu je na obr. 4.4.



Obrázek 4.4: Testovací vzorek snímků po prahování metodou Otsu

4.1.3 Modifikace metody Otsu - Valley Emphasis

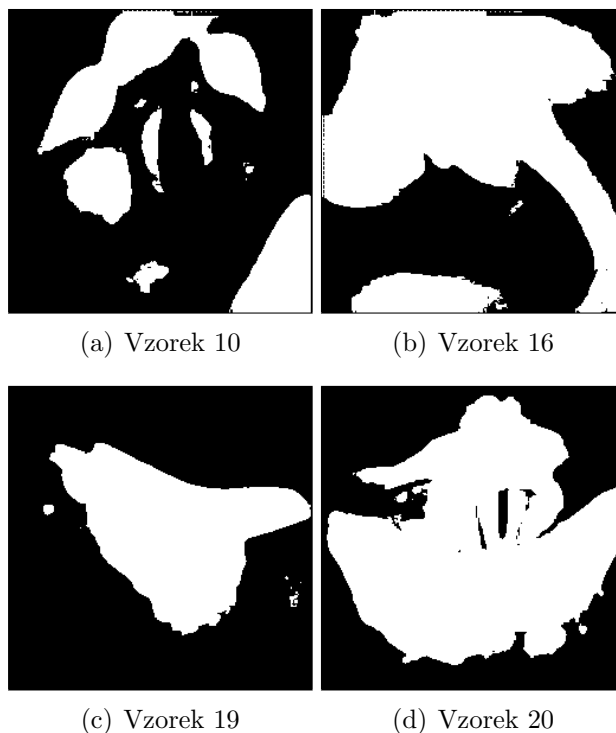
Popis metody

Jedna z variací metody optimálního prahu Otsu, Valley Emphasis [22], vylepšuje prahování u bimodálního histogramu. Předpokládá, že práh by měl být umístěn v nízké hodnotě histogramu mezi třídami (údolí), a proto je kritériální funkce násobena hodnotou $1 - p_T$ (viz 4.5), kde p_T je hodnota relativního histogramu v jasu T .

$$\sigma_b^2(T) = \omega_0(T)\omega_1(T) (\mu_0(T) - \mu_1(T))^2 (1 - p_T) \quad (4.5)$$

Testování metody

Výsledek prahování testovacích snímků metodou Otsu s rozšířením Valley Emphasis je na obr. 4.5.



Obrázek 4.5: Testovací vzorek snímků po prahování metodou Otsu Valley Emphasis

4.1.4 Metoda minimální chyby

Popis metody

Metoda minimální chyby [23] je založena na aproximaci tříd normálním rozložením a následně hledáním co nejmenšího průniku těchto aproximací. Z kritériální funkce (4.6) najdeme vnitřní minimum pro zjištění prahu (4.9). Tato metoda je vhodná, pokud hledáme malý objekt na velkém pozadí (v poměru kolem 1:100) a histogram je bimodální.

$$J(T) = 1 + 2 [P_0 \text{Ln} \sigma_0(T) + P_1 \text{Ln} \sigma_1(T)] - 2 [P_0 \text{Ln} P_0 + P_1 \text{Ln} P_1] \quad (4.6)$$

Rozptyly a střední hodnoty lze vypočítat podle vztahů (4.7) a (4.8).

$$\sigma_0^2(T) = \frac{\left[\sum_{i=0}^T (i - \mu_0(T))^2 p_i \right]}{P_0} \quad \sigma_1^2(T) = \frac{\left[\sum_{i=T+1}^N (i - \mu_1(T))^2 p_i \right]}{P_1} \quad (4.7)$$

$$\mu_0(T) = \frac{\left[\sum_{i=0}^T p_i \cdot i \right]}{P_0} \quad \mu_1(T) = \frac{\left[\sum_{i=T+1}^N p_i \cdot i \right]}{P_1} \quad (4.8)$$

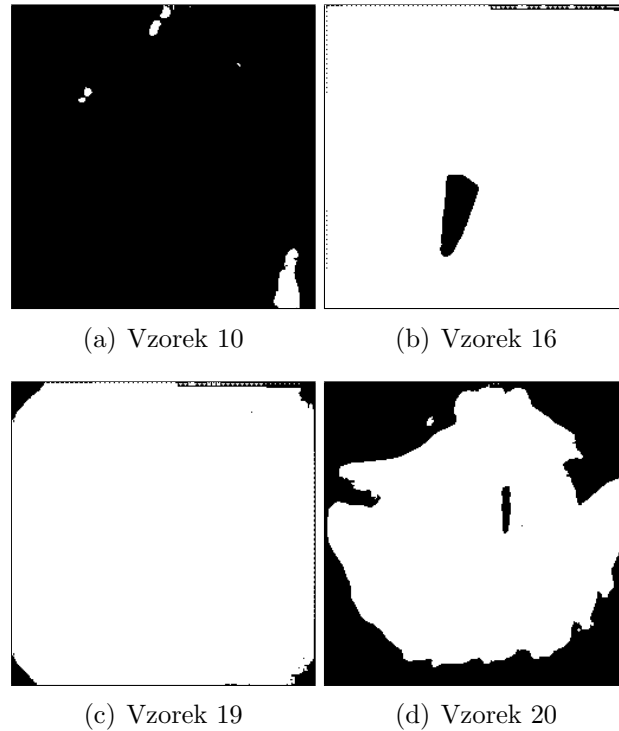
Hodnoty P_0 a P_1 udávají pravděpodobnost, že daný bod patří do 1. resp. 2. třídy. Platí, že $P_0 + P_1 = 1$. V některých případech však kritériální funkce neobsahuje vnitřní minimum a nelze tedy rozhodnout o umístění prahu.

$$T = \text{argmin}(J(T)) \quad (4.9)$$

Kritériální funkce $J(T)$ ve vztahu (4.9) vede k nalezení takového prahu, kdy je průnik aproximací minimální.

Testování metody

Výsledek prahování testovacích snímků metodou minimální chyby je na obr. 4.6.



Obrázek 4.6: Testovací vzorek snímků po prahování metodou minimální chyby

4.1.5 Metoda entropie histogramu

Popis metody

Metoda entropie histogramu [24] je založena na výpočtu apriorní (4.10) a aposteriorní (4.11) entropie histogramu (před prahováním a po prahování). Metoda se snaží najít dolní omezení pro aposteriorní entropii jako parametrickou funkci prahu. Pokud se maximalizuje tato dolní hranice, dosáhne se apriorní maximalizace aposteriorní entropie H' .

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \text{Log}_2(p_i) \quad (4.10)$$

$$H' = -P'_0 \text{Log}_2(P'_0) - P'_1 \text{Log}_2(P'_1) \quad (4.11)$$

Pro výpočet hodnot P'_0 a P'_1 platí vztahy (4.12) a (4.13), pro pravděpodobnost p_i platí vztah (4.14).

$$P'_0 \leq \frac{-\alpha H}{\text{Log}_2 [\max(p_1, p_2, \dots, p_k)]} \quad (4.12)$$

$$P'_1 \leq \frac{-(1 - \alpha) H}{\text{Log}_2 [\max(p_{k+1}, p_{k+2}, \dots, p_n)]} \quad (4.13)$$

$$p_i = \frac{N_i}{N} \quad (4.14)$$

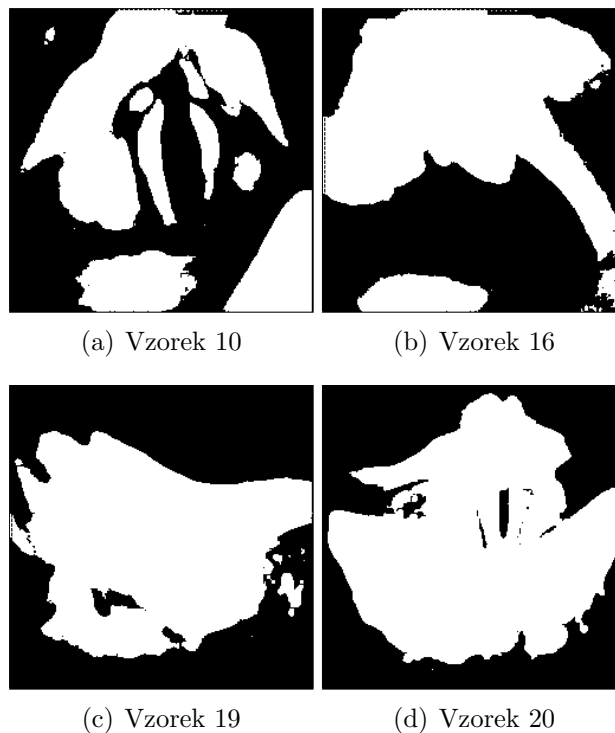
N_i je počet bodů ve snímku s jasem i a N je počet jasových úrovní. Snažíme se najít takové $\alpha \in (0, 1)$, aby kritériální funkce $F(\alpha)$ (4.15) byla co největší. Hodnotu prahu k získáme ze vztahu (4.16).

$$F(\alpha) = \frac{\alpha \cdot \text{Log}_2 \left(\sum_{i=1}^k p_i \right)}{\text{Log}_2 [\max(p_1, p_2, \dots, p_k)]} + \frac{(1 - \alpha) \cdot \text{Log}_2 \left(\sum_{i=k+1}^N p_i \right)}{\text{Log}_2 [\max(p_{k+1}, p_{k+2}, \dots, p_n)]} \quad (4.15)$$

$$\sum_{i=1}^k p_i \text{Log}_2(p_i) = -\alpha H \quad (4.16)$$

Testování metody

Výsledek prahování testovacích snímků metodou entropie histogramu je na obr. 4.7.



Obrázek 4.7: Testovací vzorek snímků po prahování metodou entropie histogramu

4.1.6 Výsledek testování

Z výsledku testování je patrné, že aplikace prahu na celý snímek nedosahuje uspokojivých výsledků. Dobrý výsledek, kde je správně nalezena štěrbina, je pouze u metody minimální chyby na obr. 4.6(b). V ostatních případech nelze hovořit o nalezení štěrbiny. Ale ani ručním prahováním nelze u většiny snímků spolehlivě detekovat hlasivkovou štěrbinu, proto byl v této práci zvolen postup, kdy je před prahováním provedena přesnější lokalizace štěrbiny.

4.2 Zvolený postup

Pro detekci štěrbin byla nad souborem záznamů kmitání hlasivek otestována řada postupů a metod. Z nich byla jako nejspolehlivější vybrána metoda, která nejdříve omezí velikost regionu, ve kterém se štěrbina nachází a poté se provede prahování a detekce štěrbin. Schématické znázornění celého postupu, jakým způsobem je region nalezen a následně detekována štěrbina, je na obr. 4.8.

Nejprve jsou načtena data z videosekvence do jednotlivých snímků, z nichž je vypočítán minimální a maximální snímek³. Tyto snímky jsou následně odečteny, čímž je detekován pohyb hlasivkových řas v sekvenci. Následným prahováním a nalezením největší souvislé oblasti je vymezen prostor štěrbin. Na vybraném regionu již lze úspěšně využít metody prahování a detekovat tak hlasivkovou štěrbinu v každém snímku v sekvenci.

V celém postupu jsou považovány všechny snímky za stejnohlé, tj. vzájemný pohyb mezi kamerou a hlasivkami je zanedbatelný. Při vysoké rychlosti snímání obrazu lze toto předpokládat, protože doba jednoho snímku je 0,25 ms. Jedna sekvence obsahuje 40 až 100 snímků (aby bylo zachyceno několik kmitů hlasivek), takže při maximální celkové délce 25 ms vzájemný pohyb kamery a hlavy pacienta z důvodu jejich setrvačné hmotnosti lze zanedbat.

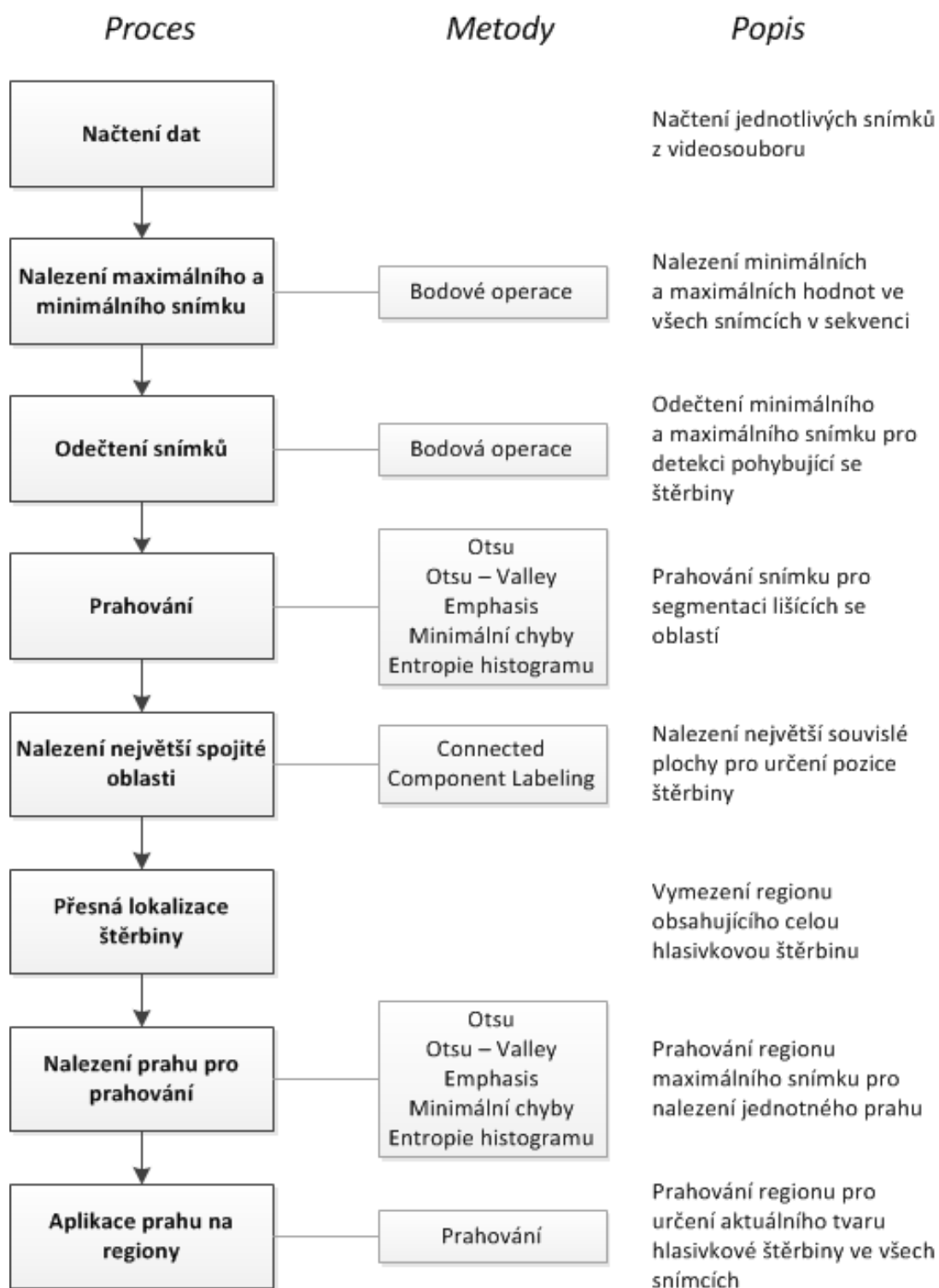
4.2.1 Nalezení maximálního a minimálního snímku

Pro detekci pohybu v sekvenci stejnohlých snímků lze využít bodové operace odečtení. Protože chceme nalézt oblast, kde došlo v pohybu v průběhu celé sekvence, je vhodné nejprve nalézt extrémní snímky, tedy na počátek pohybu a jeho konec, tj. nejvíce a nejméně otevřenou štěrbinu.

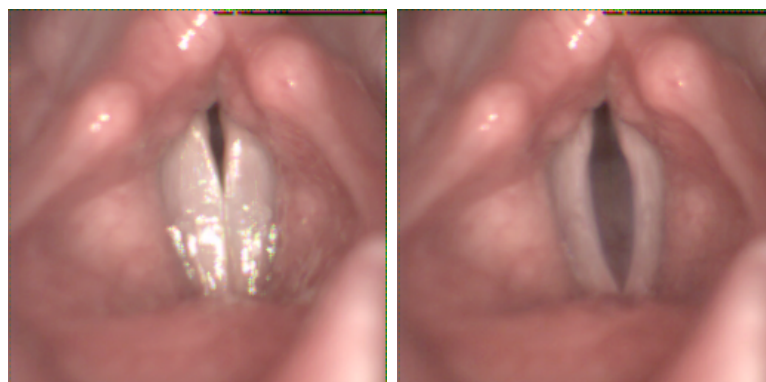
Pro získání snímku, kde je štěrbina nejvíce otevřená, lze využít toho, že vnitřek štěrbin je tmavý. Pokud je tedy štěrbina maximálně otevřená, nejvíce bodů obsahuje nízkou hodnotu jasu a součet jasů všech bodů ve snímku je minimální. Procházením všech snímků a počítáním součtu jasů můžeme najít minimum a to považovat za nejvíce otevřenou štěrbinu. Podobným postupem, ale hledáním maxima, získáme štěrbinu zavřenou.

Existují však případy, kdy se štěrbina neotevírá v každé periodě stejně, dokonce se může v jedné periodě více otevřít v dolní části a v další v horní části, pak je vhodnější vypočítat minimální snímek pomocí bodových operací (jednotlivé snímky považujeme za stejnohlé). Pokud použijeme maximální snímek, získáme tak obraz nejvíce zavřené štěrbin (obr. 4.9).

³Maximální (resp. minimální) snímek obsahuje obrazové body, které mají hodnotu odpovídající maximálnímu (rest. minimálnímu) jasů všech bodů na stejných souřadnicích v sekvenci snímků. (viz kap. 4.2.1)



Obrázek 4.8: Postup při hledání hlasivkové štěrbině



(a) Maximální snímek

(b) Minimální snímek

 Obrázek 4.9: *Maximální a minimální snímek*

Bodové operace

Pokud máme více stejně velkých snímků, je nad nimi možné provádět operace nad stejnohlými body (vztah 4.17). Snímky se procházejí bod po bodu a vzniká nový obraz s různými vlastnostmi, které vychází z použité operace.

$$c(i, j) = f_D(a(i, j), b(i, j), k) \quad (4.17)$$

Proměnné a a b jsou zdrojové snímky, c je výsledný snímek, f_D je daná funkce (sčítání, odčítání, násobení, maximum, minimum,...), k je jasová transformační konstanta a i a j jsou souřadnice bodů. Funkci je možné rozšířit i na více vstupních snímků.

Maximální a minimální snímek

Pokud použijeme funkci minimum a rozšíříme obor vstupních snímků na celou sekenci, získáme všechny oblasti, kde se štěrbinu alespoň na jednom snímku objevila.

$$a_{min}(i, j) = \min_k(a_k(i, j)) \quad (4.18)$$

Obdobnou funkcí, pouze s využitím maxima, získáme snímek, který obsahuje nejméně tmavé oblasti reprezentující štěrbinu, tj. u zdravých hlasivek zavřenou štěrbinu a u případů s nedomykavostí všechny oblasti, kde se alespoň na jednom snímku nacházela osvětlená hlasivková řasa.

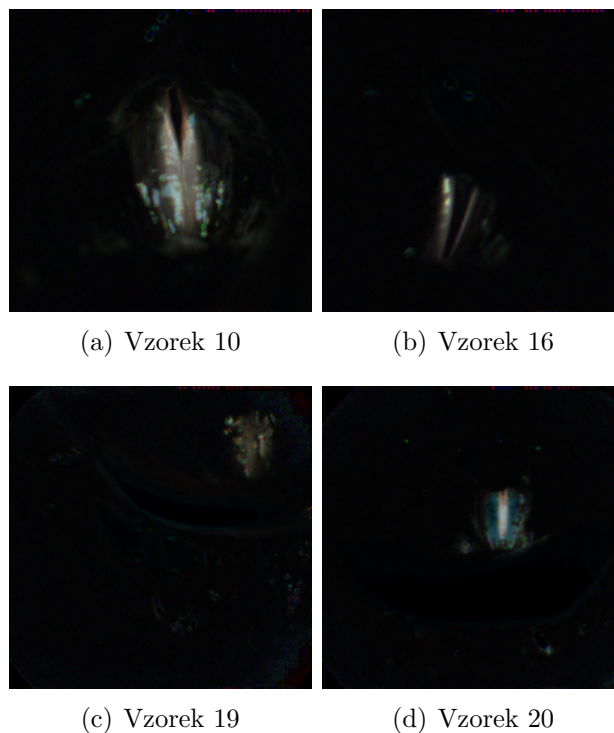
$$a_{max}(i, j) = \max_k(a_k(i, j)) \quad (4.19)$$

4.2.2 Odečtení snímků

Po nalezení extrémních snímků je pak snadné odečtením získat jeden snímek, který zvýrazní místa, kde došlo k pohybu (obr. 4.10).

$$c(i, j) = a_{max}(i, j) - a_{min}(i, j) \quad (4.20)$$

Pokud je po odečtení snímků výsledek některých obrazových bodů záporný, je nutné provést jasovou transformaci do zobrazitelného rozsahu. V tomto případě ale víme, že všechny hodnoty bodů z minimálního snímku nebudou větší než hodnoty stejno-
lehlých bodů maximálního snímku, proto není nutné snímek dále upravovat.



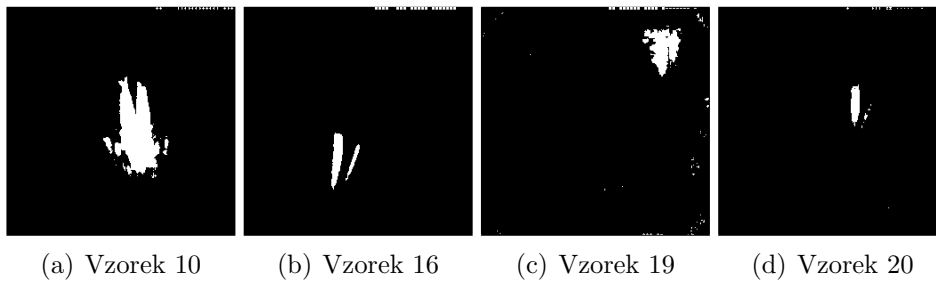
Obrázek 4.10: Výsledky po odečtení maximálního a minimálního snímku u testovacích vzorků

4.2.3 Prahování

V místech, kde nedošlo k pohybu (okolí štěrbiny), budou mít maximální i minimální snímek stejné nebo blízké hodnoty jasu a jejich rozdíl bude malý - oblast bude černá. Tam, kde se pohybovala štěrbina, bude ale rozdíl velký a oblast bude světlá. Tento případ je vhodný pro prahování, abychom odlišili místo pohybu štěrbiny, v ideálním případě celou štěrbinu.

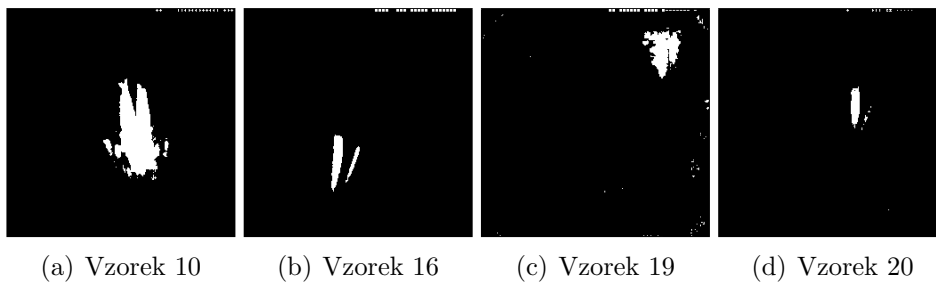
Zde byly opět testovány vybrané metody:

Metoda Otsu



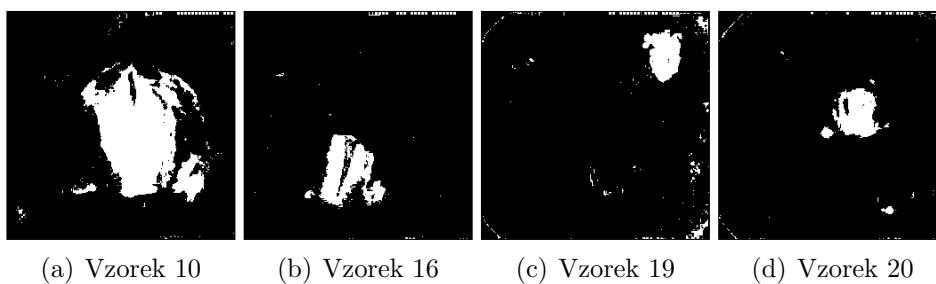
Obrázek 4.11: Výsledek prahování rozdílových snímků metodou Otsu

Metoda Otsu Valley Emphasis



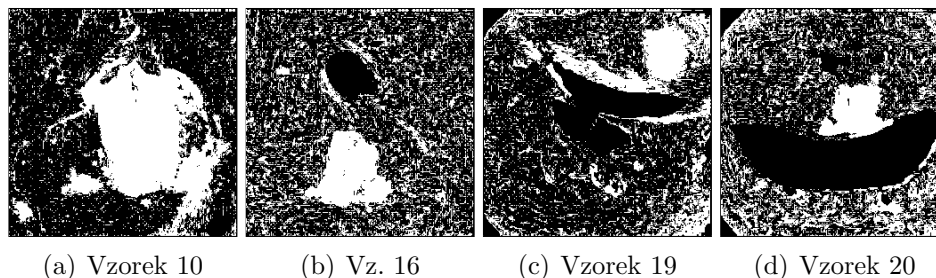
Obrázek 4.12: Výsledek prahování rozdílových snímků metodou Otsu s rozšířením Valley Emphasis

Metoda minimální chyby



Obrázek 4.13: Výsledek prahování rozdílových snímků metodou minimální chyby

Metoda entropie histogramu



Obrázek 4.14: Výsledek prahování rozdílových snímků metodou entropie histogramu

Výsledek

Při testování jednotlivých metod na množině snímků detekovaly správně oblast štěrbiny metody Otsu a Otsu Valley Emphasis. Pro použití byla vybrána metoda Otsu kvůli jednodušší implementaci.

4.2.4 Nalezení největší souvislé oblasti

Protože i nejvhodnější metoda nedokázala jednoznačně odlišit místo štěrbiny a pozadí na všech snímcích, je nutné výsledek ještě opravit. Ve snímku se stále nacházejí malé oblasti, ve kterých byl detekován pohyb buď kvůli odleskům světla v některých záběrech nebo pohybům okolní tkáně. Oblast pohybu bude u alespoň trochu funkčních hlasivek největší v místě štěrbiny, pak stačí tuto oblast najít.

Connected Component Labeling

Connected Component Labeling (označování spojených oblastí) je úloha, ve které se každá souvislá oblast v černo-bílém obrázku obarví jinou barvou. Pro hledání oblasti určíme, že černé body jsou barvou pozadí a přebarvovat se budou pouze bílé body.

Jeden z algoritmů je tzv. dvouprůchodový algoritmus [25]. V prvním průchodu je obrázek čten po řádkách a u každého bodu jsou analyzovány okolní body. Podle těchto okolních bodů je určena výsledná barva - pokud je některý z bodů již obarven, nastaví se barva aktuálního bodu na stejnou barvu, jinak se zvolí barva nová. Pokud nastane kolize, tzn. v okolí bodu je více různých barev, je třeba si zaznamenat jejich propojení, aby mohly být sjednoceny. Z řetězce propojených oblastí pak vybereme jednu, na kterou obarvíme ve druhém průchodu všechny body těchto oblastí. Při druhém průchodu si můžeme zaznamenávat počet bodů dané barvy a na konci tak rozhodnout, která z oblastí je největší a obsahuje nejvíce bodů.

V obrázku 4.15 je největší oblast zvýrazněna žlutě.



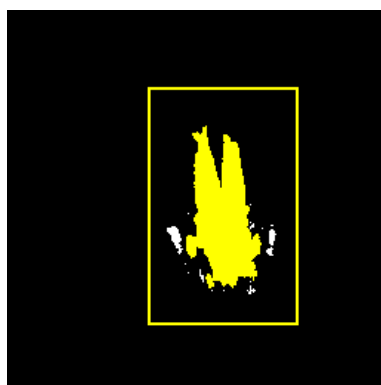
Obrázek 4.15: *Nalezená největší spojitá oblast*

4.2.5 Přesná lokalizace štěrbině

Region, ve kterém se nachází štěrbině, můžeme získat tak, že ze snímku vyřízneme obdélník se stranami určenými nejvyšším a nejnižším bodem a body nejvíce vlevo a vpravo.

Předchozí metoda funguje spolehlivě pro hlasivky, které se alespoň částečně dovírají. Vznikne totiž jedna souvislá plocha odpovídající štěrbině. V případě, že se hlasivky nedovírají po celé délce, získáme dvě oddělené oblasti. V tom případě je nalezena ještě druhá největší souvislá oblast, která je srovnatelná svou velikostí a je zahrnuta do výsledného regionu.

Výsledný region (obr. 4.16) nám udává oblast, kde se nachází hlasivková štěrbině, a která je mnohem menší než původní snímek. Proto pro další zpracování použijeme z každého snímku v sekvenci pouze tento region.

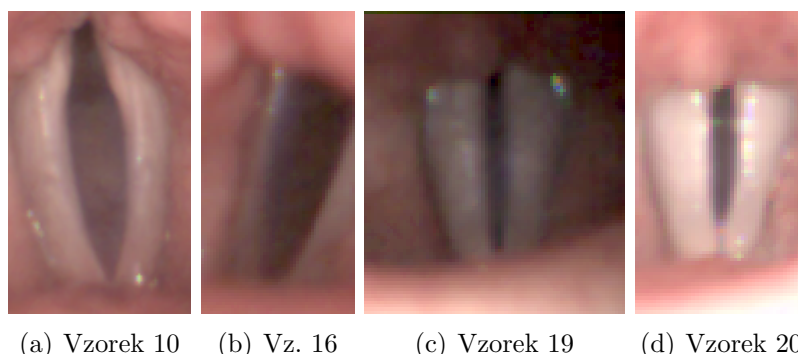


Obrázek 4.16: *Nalezený region se štěrbinou*

4.2.6 Nalezení prahu pro prahování

Nyní můžeme opět otestovat prahovací metody pro zjištění prahu, který budeme aplikovat na všechny regiony.

Testovací vzorek regionů je na obr. 4.17, jednotlivé výsledky testování pak na obr. 4.18 pro metodu Otsu, na obr. 4.19 pro metodu Otsu Valley Emphasis, na obr. 4.20 pro metodu minimální chyby a na obr. 4.21 pro metodu entropie histogramu.



Obrázek 4.17: Testovací snímky regionů

Podle výsledků lze nejlépe ohodnotit metodu minimální chyby, která ve většině případů správně našla hlasivkovou štěrbinu. U vzorku (c) nebyla nalezena z důvodu nekvalitního snímku, který nelze správně automaticky naprahotvat.

4.2.7 Aplikace prahu na regiony

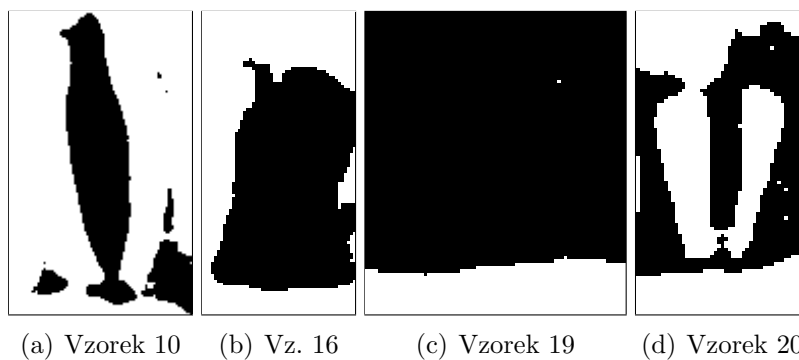
Pokud nalezený práh aplikujeme na každý z regionů v sekvenci, získáme tak plochu štěrbinu, která se mění v čase. Pokud bychom prahovali každý snímek zvlášť, nebyly by pak jednotlivé regiony porovnatelné a v případě uzavřené štěrbinu získali nesmyslný výsledek. Při snaze nalézt práh v obrázku, kde se nenachází výrazné tmavé místo, by totiž docházelo k jeho určení ve světlé oblasti.

V některých případech se ani omezením regionu nepodaří odstranit veškeré oblasti, které po prahování zůstanou vně štěrbinu. Pro takové snímky lze použít masku, která určí oblast, kde se štěrbinu může nacházet. Tato maska obsahuje pouze průhledné a neprůhledné body. Pro správně nasnímané obrázky lze tuto masku získat naprahotáním maximálního snímku (obr. 4.22), pro hůře nasnímané je nutné ji ručně upravit. Po průniku masky a naprahotaného snímku jsou zachovány pouze ty oblasti, které jsou v místě štěrbinu.

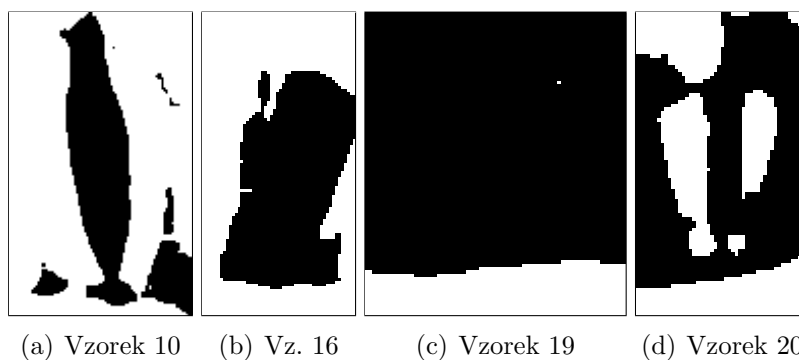
Aplikace masky

Maska má v tomto případě stejné rozměry jako snímek, takže stačí provést bodovou operaci, kde funkce ponechá původní hodnoty snímku tam, kde je maska průhledná a odstraní všechny body v neprůhledných místech masky. Uvažujme, že průhledné body mají hodnotu 0 a neprůhledné hodnotu 1.

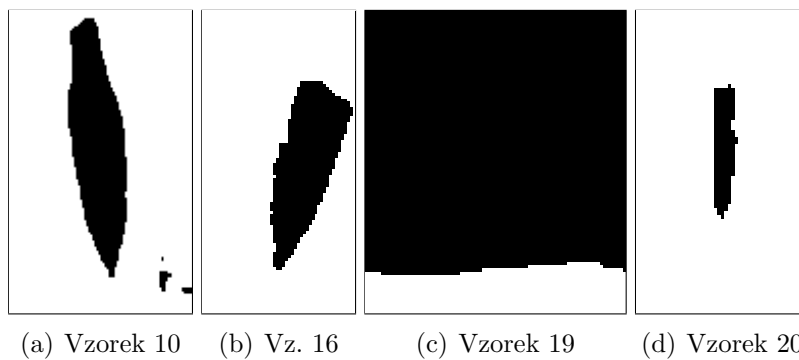
$$v_k(i, j) = \begin{cases} a_k(i, j) & \text{pokud } maska(i, j) = 0, \\ 255 & \text{pokud } maska(i, j) = 1. \end{cases} \quad (4.21)$$



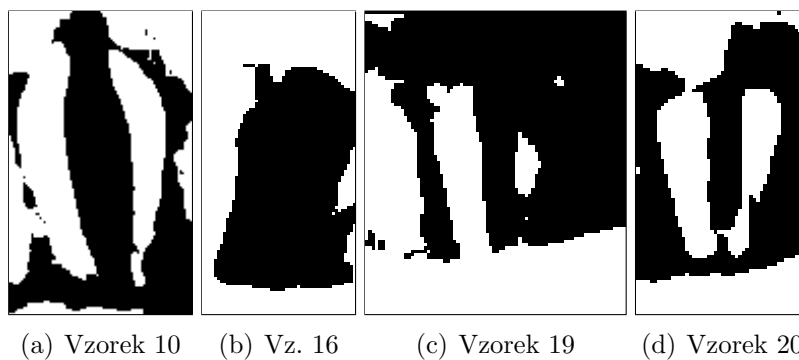
Obrázek 4.18: Výsledky prahování testovacích snímcích metodou Otsu



Obrázek 4.19: Výsledky prahování testovacích snímcích metodou Otsu Valley Emphasis



Obrázek 4.20: Výsledky prahování testovacích snímcích metodou minimální chyby



Obrázek 4.21: Výsledky prahování testovacích snímcích metodou entropie histogramu



Obrázek 4.22: *Automaticky nalezená maska z maximálního snímku štěrbiny*

Hodnota 255 vyjadřuje bílou barvu, tj. okolí štěrbiny, $a_k(i, j)$ je hodnota bodu nepochovaného regionu z k -tého snímku na souřadnicích i a j .

5 Parametry hlasivkové štěrby

Po detekci štěrby je potřeba nalézt a definovat řadu parametrů, které můžeme odvodit z jejího tvaru, velikosti a vývoje během fáze otevírání a zavírání hlasivek. Číselné hodnoty parametrů se použijí k detekci a klasifikaci existující poruchy hlasivek. Proto je vhodné v počáteční fázi řešení problému diagnostiky poruchy hlasivek a pro experimenty s tím spojené volit rozsah sledovaných parametrů co největší. To znamená odvodit ze získaných obrazových dat hlasivkové štěrby všechny dostupné parametry a jejich kombinace jak statické (pro jeden snímek), tak dynamické (pro vývoj štěrby v čase). Některé parametry jsou přímo změřené, jako velikost plochy, obvod nebo šířka, další jsou odvozené nebo závislé, jako členitost nebo podlouhlost. Další parametry lze získat aproximací štěrby či sledování osové symetrie.

V programech dodávaných s vysokorychlostními kamerami je ze snímků videozáznamů určováno několik parametrů, mezi které patří velikost plochy a její vývoj v čase (včetně frekvenční analýzy) a šířka štěrby na několika místech. Dále lze provést Fourierovu analýzu změny jasů v jednotlivých obrazových bodech nebo změny výšky a šířky štěrby. Možností je i zobrazení kymogramu na zvoleném místě, případně provedení jeho hranové detekce a následné Fourierovy analýzy jeho tvaru.

V této práci je cílem určit a vypočítat i další parametry, které by mohly pomoci při diagnostice hlasivek. Nejsou zde prováděny frekvenční analýzy vývoje parametrů, ale tato data lze získat zpracováním uložených výsledků. Následující podkapitoly popisují parametry, které lze určit z jednoho snímku.

5.1 Velikost plochy štěrby

První parametr je velikost plochy štěrby v daném snímku (obr. 5.1). Nejjednodušší způsob určení velikosti je spočítat všechny obrazové body, které odpovídají hlasivkové štěrbině získané předchozím postupem (vztah 5.1).

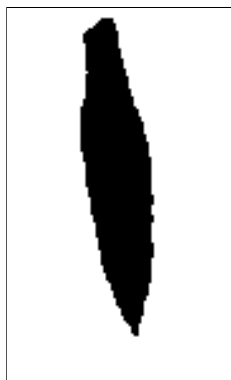
$$A = \sum_{x,y} f(x,y) \quad (5.1)$$

Funkci $f(x,y)$ lze vyjádřit vztahem (5.2), kde $b(x,y)$ je hodnota jasů bodu na souřadnicích x a y .

$$f(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{pokud } b(x,y) = 0, \\ 0 & \text{pokud } b(x,y) > 0. \end{cases} \quad (5.2)$$

Velikost se tedy pohybuje od nuly do řádů tisíců, nejedná se však o absolutní parametr - z důvodu různé vzdálenosti snímání nelze plochu štěrby přímo srovnávat se snímky jiných hlasivek nebo stejných hlasivek na jiném záznamu. Jedná se pouze o relativní parametr, který lze využít pro popis chování štěrby v konkrétní sekvenci. Velikost plochy se vypočítá pro každý snímek zvlášť a poté lze hodnoty vynést

do grafu a sledovat, jak se tento parametr mění v čase. Je možné určit poměr štěrbiny při uzavření a otevření a zjistit, zda se štěrbina zcela uzavírá, příp. provést frekvenční analýzu.



Obrázek 5.1: Velikost plochy štěrbiny je rovna počtu černých pixelů v obrázku

Abychom mohli tento parametr srovnávat i se snímky z jiných sekvencí stejných nebo jiných hlasivek, bylo by zapotřebí velikost plochy normovat. Jako normovaný tvar můžeme použít poměr velikosti plochy hlasivkové štěrbiny k jejímu obvodu, výšce nebo šířce. Další možností je udávat velikost plochy v procentech vzhledem k její maximální hodnotě.

5.2 Obvod štěrbiny

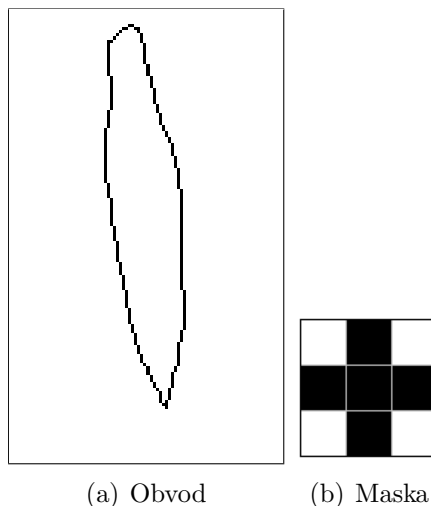
Délka obvodu je dalším parametrem, který lze u hlasivkové štěrbiny určit. Pro jeho počítání je nutné detekovat hranici, získat obvodovou křivku a spočítat její délku.

Jako obvodovou křivku budeme uvažovat vnitřní hranici oblasti. Jedna z metod, jak ji určit, je aplikace masky na plochu. Pokud použijeme masku 4-okolí (maska ve tvaru kříže), získáme uzavřenou křivku, která je souvislá na 8-okolí¹ (obr. 5.2). Pak můžeme pouhým sečtením všech černých bodů získat počet obvodových bodů. Pro přesnější výpočet je možné počítat euklidovskou vzdálenost bodů, to znamená body, které se dotýkají hranou přidávají jednotkovou vzdálenost a body dotýkající se rohem pak $\sqrt{2}$ (viz vztahy 5.3 a 5.4). Opět se jedná o relativní parametr, kde můžeme sledovat jeho vývoj v čase uvnitř sekvence.

$$P = \sum_{k=1}^n p(k) \quad (5.3)$$

$$p(k) = \begin{cases} 1 & \text{kde } p_x(k) = p_x(k-1) \text{ nebo } p_y(k) = p_y(k-1), \\ \sqrt{2} & \text{v ostatních případech.} \end{cases} \quad (5.4)$$

¹Souvislost rozlišujeme na 4-okolí, kde se další bod křivky nachází nahoře, dole, vpravo či vlevo, a na 8-okolí, kde křivka může pokračovat i diagonálním směrem.



Obrázek 5.2: Vnitřní hranice štěrbiny souvislá na 8-okolí získaná aplikací masky 4-okolí

$p(k)$ je k -tý bod obvodu, n je počet bodů obvodu, $p_x(k)$ a $p_y(k)$ je x-ová a y-ová souřadnice k -tého bodu obvodu.

5.2.1 Aplikace Masky

Pro detekci hranice spojitě na 8-okolí se používá maska 4-okolí velikosti 3x3 ve tvaru kříže (na obr. 5.2(b)). Maska se zarovná tak, aby její prostřední bod ležel nad bodem, kde masku aplikujeme. Pokud jsou všechny body ve snímku pod černými body masky černé, můžeme tento bod označit. Postupně procházíme všechny body ve snímku² a aplikujeme na ně masku. Na konci všechny označené body odstraníme (obarvíme na barvu pozadí, v tomto případě bíle) a ve snímku zůstane pouze detekovaná křivka. Pokud objekt v původním snímku byl plný (neobsahoval žádné bílé body), křivka je vnitřní hranicí štěrbiny.

5.2.2 Členitost obvodu

Vydělením délky obvodu velikostí obsahu získáme srovnatelný parametr mezi snímky - členitost. Ta dosahuje nejnižších hodnot, pokud se obalová křivka blíží kružnici, a vysokých hodnot v případě, že obvod obsahuje nerovnosti a zákruty. Tento parametr ale nelze vypočítat, pokud je velikost plochy nulová, protože bychom dělili nulou. V takovém případě je výsledek nedefinovaný.

$$S = \frac{P}{A} \quad (5.5)$$

P je délka obvodu a A je velikost plochy štěrbiny.

²Při procházení bodů na okraji snímku dochází k porovnání bodů masky s body mimo oblast snímku, proto považujeme všechny body snímku jako pozadí, tj. bílé body.

5.3 Symetrie hlasivek

Další sledované parametry mohou být založené na osově symetrii hlasivek, proto je nutné nejprve určit hlavní osu. Symetrie podle osy dokáže určit poruchu u jedné nebo druhé hlasivkové řasy a povnat jejich chování v čase.

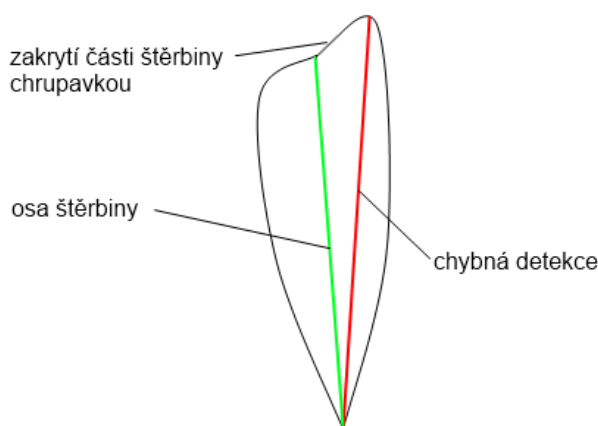
5.3.1 Osa hlasivkové štěrbiny

Osu můžeme získat nalezením nejdelsí průsečnice štěrbiny, přesnějších výsledků ale můžeme dosáhnout zpracováním celé sekvence snímků. Jako osu hlasivkové štěrbiny považujeme přímkou, která co nejlépe odpovídá rozhraní mezi hlasivkovými řasami při uzavření. Pokud hlasivky nedoléhají, prochází osa v polovině mezi hlasivkovými řasami. Na okrajích osa prochází oběma komisurami.

Nejdelsí průsečnice hlasivek

Pokud projdeme obvod maximálně otevřené štěrbiny a vybereme dva od sebe nejvzdálenější body, které propojíme přímkou, získáme tak osu hlasivek. To ovšem platí za předpokladu ideálního tvaru hlasivek, kdy přední a zadní komisura jsou nejvyšší a nejnižší bod štěrbiny.

Pokud ovšem není část hlasivek viditelná, např. horní komisura je zakrytá některou z chrupavek nebo je dolní komisura zakrytá hrtanovou přiklopkou, tato detekce selhává (obr. 5.3). Na obrázku 5.4 je provedena detekce osy na reálných snímcích.



Obrázek 5.3: Chybná detekce při zakrytí části hlasivek

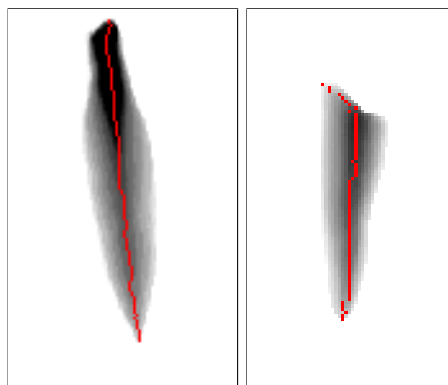
Vlevo je ideální snímek a správná detekce osy, vpravo je osa určena chybně, protože horní část hlasivek je zakrytá.



Obrázek 5.4: Nejdelší spojnice dvou bodů obvodu štěrbiny

Průměrování sekvence pro nalezení osy

Pro přesnější určení osy můžeme využít chování štěrbiny v celé sekvenci za předpokladu, že podél osy se hlasivky otevírají nejdříve a také je to poslední místo štěrbiny, než se k sobě hlasivkové řasy přitisknou (nebo mají k sobě nejbližší). Abychom tuto osu našli, sečteme všechny naprahované regiony v sekvenci a vydělíme jejich počtem (vypočítáme průměrnou hodnotu jasů v každém bodě) a tím získáme nejtmavší místo tam, kde jsou hlasivky nejdéle otevřené, tj. podél osy. Protože jsou hlasivky na snímku ve vertikální poloze, procházíme výsledek po řádcích a najdeme v každém řádku nejtmavší bod, který označíme. Pokud je nejtmavších bodů více, zvolíme ten uprostřed (obr. 5.5).



Obrázek 5.5: Sečtené naprahované snímky a označení nejtmavších bodů v řádcích pro nalezení osy

Pro omezení chyb, které se objevují na koncích štěrbiny nejsou uvažovány body horní a dolní části (celkem $1/4$ všech bodů), ostatní se pak lineární regresí proloží přímkou.

Lineární regrese

Obecnou rovnici přímky (5.6) lze vypočítat pomocí součtů a součinů souřadnic jednotlivých bodů (5.7 - 5.9), kde n je celkový počet bodů.

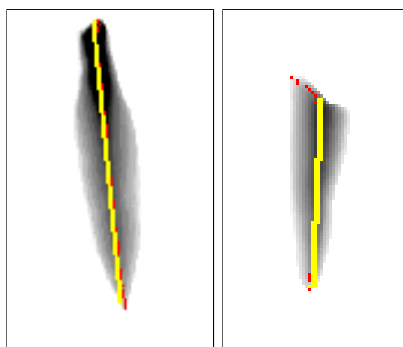
$$ax + by + c = 0 \quad (5.6)$$

$$a = \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i - n \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (5.7)$$

$$b = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (5.8)$$

$$c = \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.9)$$

Protože se osa většinou blíží svislé čáře, lze pro větší přesnost výpočet provádět s prohozenými souřadnicemi, pak je ale nutné nakonec přepočítat koeficienty u rovnice přímky: $a = -b'$, $b = -a'$, $c = -c'$.



Obrázek 5.6: Nalezená osa pomocí lineární regrese bodů

Rovnice přímky udává sklon a pozici osy, které jsou pro všechny snímky v sekvenci stejné, pouze se mění její délka. Tu můžeme získat průnikem přímky osy a jednotlivých snímků (obr. 5.6).

5.3.2 Normála hlasivkové štěrbiny

Normála k úsečce je kolmice protínající úsečku v jejím středu. Jejím nalezením a průnikem snímku hlasivkové štěrbiny lze určit její délku a tím šířku uprostřed hlasivkové štěrbiny. Z rovnice přímky lze rovnici normály vypočítat podle vztahů 5.10, kde x a y jsou souřadnice středu úsečky.

$$a_n = b, \quad b_n = -a, \quad c_n = ay - bx \quad (5.10)$$

Po nalezení rovnice normály lze šířku štěrbiny počítat ve všech místech, stačí pouze kolmici posouvat změnou hodnoty c_n . Můžeme tak nalézt nejširší místo maximálně otevřené štěrbiny a šířku porovnávat se snímky v jiné fázi otevření.

5.3.3 Podlouhlost hlasivkové štěrby

Pokud již máme nalezenou osu a maximální šířku štěrby u nejvíce otevřené hlasivkové štěrby, lze jejich podílem určit podlouhlost.

$$O = \frac{L_{axis}}{L_{max_norm}} \quad (5.11)$$

L_{axis} je délka osy a L_{max_norm} je délka nejdelší kolmice. Pokud je hodnota blízká jedné, výška a šířka štěrby je téměř stejná a hlasivky se pravděpodobně otvírají pouze na malé části. Při vysokých hodnotách je délka štěrby mnohem delší než její šířka a hlasivky se nejspíše otvírají po celé délce, ale pouze v malém rozsahu.

5.3.4 Symetrie plochy

Podle osy štěrby můžeme rozdělit plochu na dvě části a počítat jejich velikost odděleně. Tím lze určit, jestli se hlasivkové řasy pohybují stejnoměrně nebo některá z nich v pohybu zaostává či se nepohybuje vůbec. Odečtením ploch vlevo a vpravo získáme parametr vychýlení hlasivek od osy podle plochy.

$$A_{left} = \sum_{x,y} f_l(x, y) \quad (5.12)$$

$$A_{right} = \sum_{x,y} f_r(x, y) \quad (5.13)$$

Funkce $f_l(x, y)$ a $f_r(x, y)$ lze vyjádřit vztahy (5.14) a (5.15).

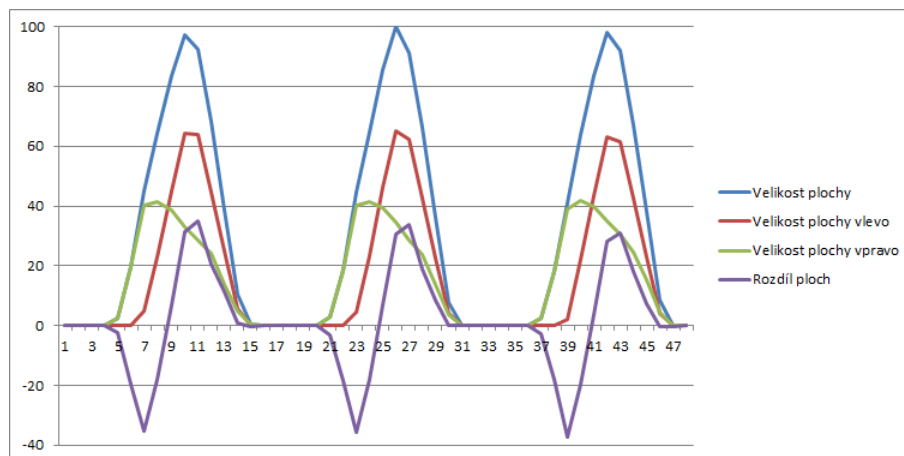
$$f_l(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{pokud } b(x, y) = 0 \text{ a } ax + by + c > 0, \\ 0 & \text{v ostatních případech.} \end{cases} \quad (5.14)$$

$$f_r(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{pokud } b(x, y) = 0 \text{ a } ax + by + c < 0, \\ 0 & \text{v ostatních případech.} \end{cases} \quad (5.15)$$

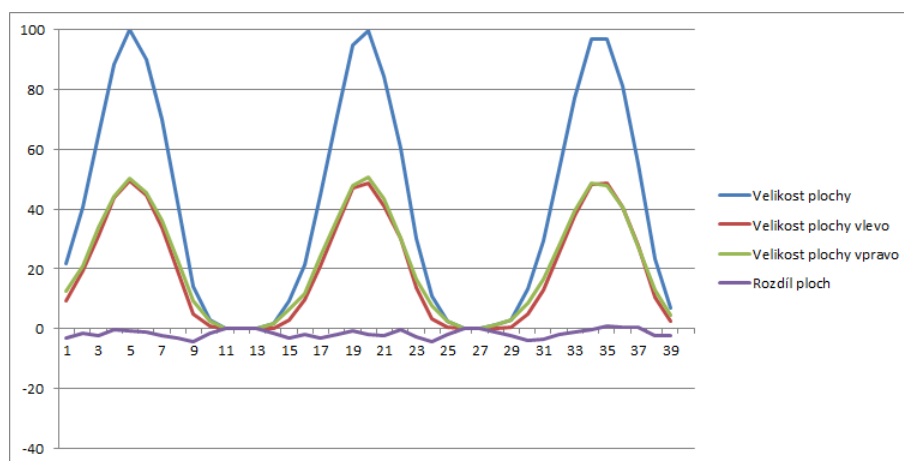
Body, které leží přímo na ose (kde $ax + by + c = 0$) je možné zahrnout do jedné strany, přičíst na obě strany hodnotu 0,5 nebo je úplně zanedbat. Takových bodů, kde hodnota bude přesně nulová je ve většině případů zanedbatelné množství.

$$A_d = A_{left} - A_{right} \quad (5.16)$$

Pro srovnání byly vybrány dvě sekvence hlasivek. Velikost plochy je vztažena k maximální hodnotě a vyjádřena v procentech. První z nich zachycuje hlasivky, které se pohybují nesymetricky. Jak je vidět na obr. 5.7, nejprve roste velikost plochy vpravo (pohyb pravé hlasivkové řasy) a až poté vlevo (levá hlasivková řasa). Ve druhé sekvenci byly nasnímány hlasivky pohybující se symetricky. Na obr. 5.8 je vidět, že rozdíl velikosti ploch je zanedbatelný. U obou záznamů je patrné, že hlasivky měly úplný uzávěr, protože velikost plochy klesá až na nulovou hodnotu.



Obrázek 5.7: Graf velikosti plochy hlasivkové štěrbiny, kde se projevuje nesymetrie



Obrázek 5.8: Graf velikosti plochy hlasivek, které se pohybují symetricky

5.3.5 Symetrie obvodu

Stejným způsobem lze na dvě části rozdělit obvod hlasivkové štěrbiny. Získáme parametry pro pravou a levou hlasivkovou řasu zvlášť a tím podrobnější informace o chování štěrbiny.

$$P_{left} = \sum_{k=1}^n p_l(k) \quad (5.17)$$

$$P_{right} = \sum_{k=1}^n p_r(k) \quad (5.18)$$

Pro funkce $p_l(k)$ a $p_r(k)$ platí vztahy (5.19) a (5.20).

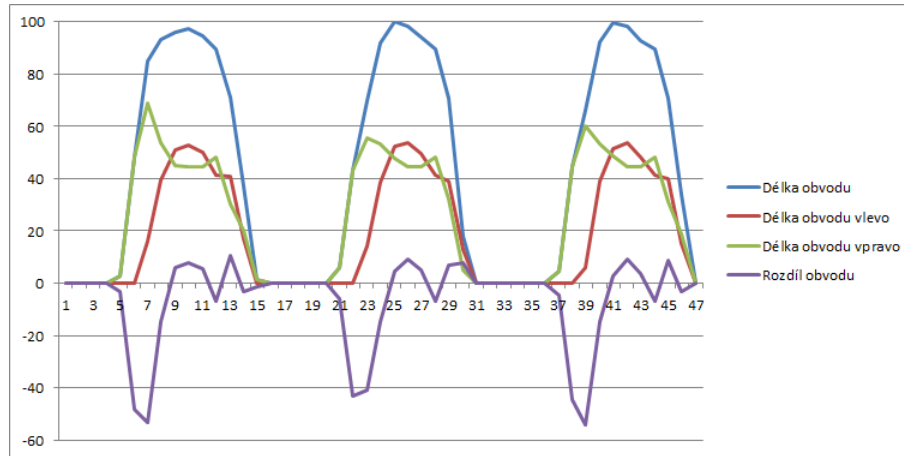
$$p_l(k) = \begin{cases} 1 & \text{kde } p_x(k) = p_x(k-1) \text{ nebo } p_y(k) = p_y(k-1), \\ & \text{a zároveň } ap_x(k) + bp_y(k) + c > 0, \\ \sqrt{2} & \text{kde } p_x(k) \neq p_x(k-1) \text{ a } p_y(k) \neq p_y(k-1), \\ & \text{a zároveň } ap_x(k) + bp_y(k) + c > 0, \\ 0 & \text{v ostatních případech.} \end{cases} \quad (5.19)$$

$$p_r(k) = \begin{cases} 1 & \text{kde } p_x(k) = p_x(k-1) \text{ nebo } p_y(k) = p_y(k-1), \\ & \text{a zároveň } ap_x(k) + bp_y(k) + c < 0, \\ \sqrt{2} & \text{kde } p_x(k) \neq p_x(k-1) \text{ a } p_y(k) \neq p_y(k-1), \\ & \text{a zároveň } ap_x(k) + bp_y(k) + c < 0, \\ 0 & \text{v ostatních případech.} \end{cases} \quad (5.20)$$

Body, které leží přímo na ose (kde $ap_x(k) + bp_y(k) + c = 0$) je opět možné zanedbat. Odečtením obvodu vlevo a vpravo získáme parametr nesymetrie hlasivkových řas.

$$P_d = P_{left} - P_{right} \quad (5.21)$$

Na dalších grafech je srovnání délek obvodu u totožných sekvencích jako u srovnání plochy. Na prvním obrázku (5.9) je opět patrná odchylka levého a pravého obvodu, což značí nesymetrii. Druhý obrázek (5.10) opět zobrazuje symetrické chování hlasivek.

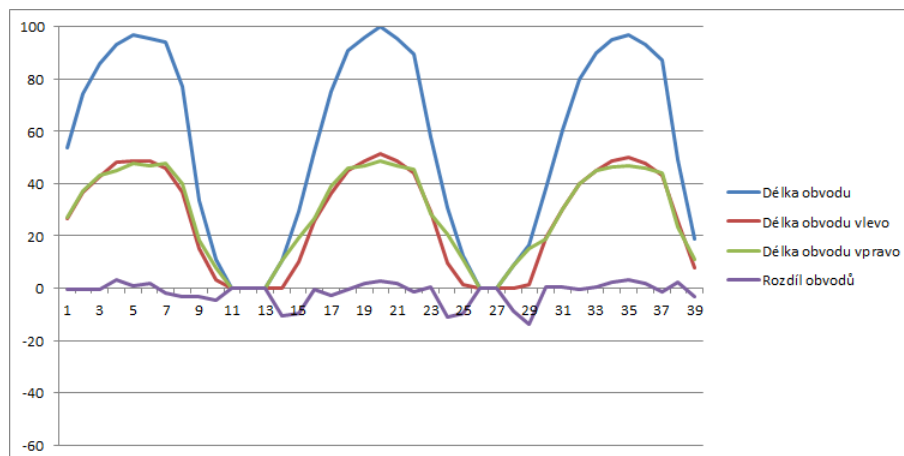


Obrázek 5.9: Graf délky obvodu hlasivkové štěrbiny, kde se projevuje nesymetrie

5.3.6 Symetrie členitosti

Analogicky lze vypočítat členitost na obou stranách hlasivek, kdy je vydělen obvod velikostí plochy v obou částech hlasivky. Následně je možné porovnat tyto hodnoty mezi sebou.

$$S_{left} = \frac{P_{left}}{A_{left}} \quad S_{right} = \frac{P_{right}}{A_{right}} \quad (5.22)$$



Obrázek 5.10: Graf délky obvodu hlasivek, které se pohybují symetricky

5.3.7 Těžiště plochy hlasivkové štěrbiny

Dalším parametrem symetrie je vzdálenost plošného těžiště od osy. Těžiště plochy C lze vypočítat jako průměr všech x -ových a y -souřadnic bodů ležících v ploše štěrbiny (vztahy 5.23 5.24 a 5.25, 5.26).

$$C_x = \frac{1}{A} \sum_{x,y} cx(x, y) \quad (5.23)$$

$$C_y = \frac{1}{A} \sum_{x,y} cy(x, y) \quad (5.24)$$

$$cx(x, y) = \begin{cases} x & \text{pokud } b(x, y) = 0, \\ 0 & \text{pokud } b(x, y) > 0. \end{cases} \quad (5.25)$$

$$cy(x, y) = \begin{cases} y & \text{pokud } b(x, y) = 0, \\ 0 & \text{pokud } b(x, y) > 0. \end{cases} \quad (5.26)$$

$b(x, y)$ je hodnota jasu v bodě se souřadnicemi x a y . Vychýlení těžiště od osy lze pak vypočítat vztahem (5.27) a obdobný vztah (5.28) platí i pro vychýlení od normály.

$$D_x = \frac{aC_x + bC_y + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5.27)$$

$$D_y = \frac{a_n C_x + b_n C_y + c_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad (5.28)$$

Hodnoty a , b a c jsou koeficienty osy (podle vztahů 5.7 až 5.9), hodnoty a_n , b_n a c_n jsou koeficienty normály (vztahy 5.10).

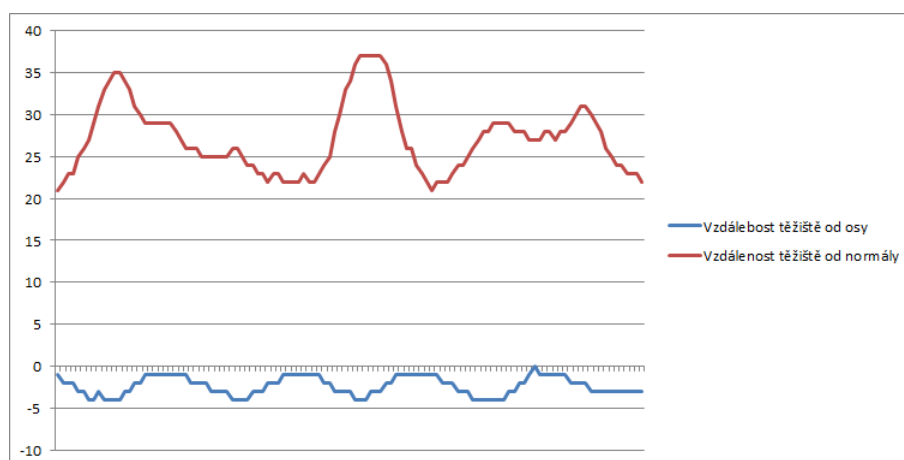
U hlasivek, které jsou symetrické (hlasivkové řasy kmitají stejně), je vychýlení těžiště od osy téměř nulové. Při nesymetrii se těžiště od osy vzdaluje a tím určuje, na které straně je hlasivka více otevřená. Pohyb těžiště je pak možné sledovat v čase a určit tak fázi kmitu, kde dochází k nesymetrii. Obrázek 5.11 zobrazuje pozici těžiště plochy

hlasivkové štěrbině u symetrických a nesymetrických hlasivek vzhledem k jejich ose. Na obrázku je také zakreslena štěrbiná, která je téměř uzavřená a může mít těžiště v jiné vzdálenosti od osy, což způsobí kmitání v horizontálním směru při sledování pozice těžiště v čase. Kmitání těžiště ve vertikálním směru je u hlasivek obvyklé, neboť závěr štěrbině začíná v dolní části hlasivek a v horní části je štěrbiná nejdéle otevřená.

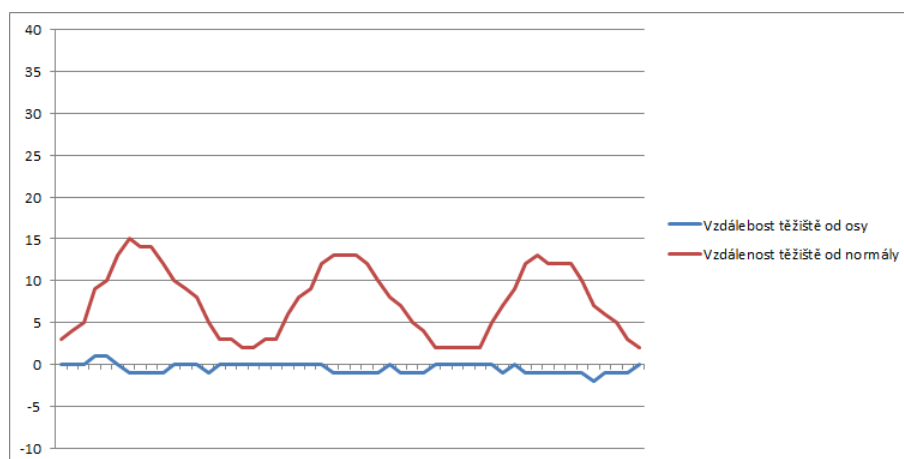


Obrázek 5.11: Symetrické hlasivky s těžištěm na ose a nesymetrické hlasivky s těžištěm vychýleným od osy

Následující grafy (obr. 5.12 pro nesymetrické a obr. 5.13 pro symetrické hlasivky) zobrazují pohyb těžiště plochy hlasivkové štěrbině v sekvenci. Modrá křivka zobrazuje vzdálenost od osy, která u prvního grafu kmitá, což značí nesymetrii pohybu hlasivek. U druhého grafu je vychýlení nepatrné. Červená křivka zobrazuje vzdálenost těžiště od normály. Při úplném závěru hlasivek by graf neobsahoval některé hodnoty, protože velikost plochy by při závěru hlasivek byla nulová a těžiště by nebylo možné vypočítat.



Obrázek 5.12: Graf pohybu těžiště u nesymetrických hlasivek

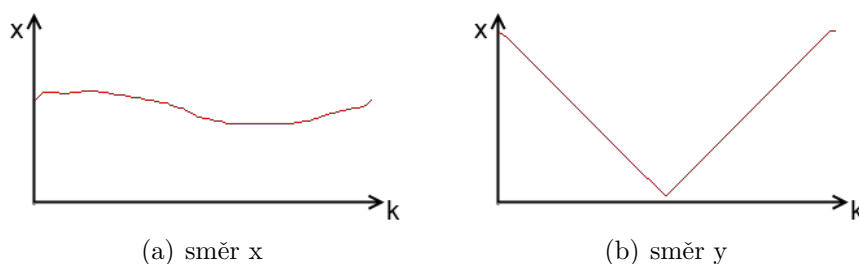


Obrázek 5.13: Graf pohybu těžiště u symetrických hlasivek

5.4 Popis hranice štěrby souřadnicovými křivkami

5.4.1 Souřadnicové křivky

Souřadnicové křivky popisují pozici jednotlivých bodů podle jejich souřadnic. Postupným procházením obvodu objektu v rovině jsou zaznamenávány souřadnice jednotlivých bodů a výsledkem jsou dva grafy - pro souřadnice x a y . Na vodorovné ose je pořadí bodu na obvodu a na svislé hodnota x -té resp. y -té souřadnice. Pokud je plocha štěrby rozdělena na více částí, souřadnicové křivky jsou vytvořeny pouze z první z nich.

Obrázek 5.14: Souřadnicové křivky ve směru x a y

5.4.2 Fourierova aproximace

Výsledné křivky lze proložit hladkou křivkou, která je počítána Fourierovou aproximací. Pro konečný počet diskrétních bodů můžeme Fourierovu řadu vyjádřit ve tvaru (5.29), kde koeficienty a_i a b_i vypočteme podle vztahů (5.30) a (5.31), kde L

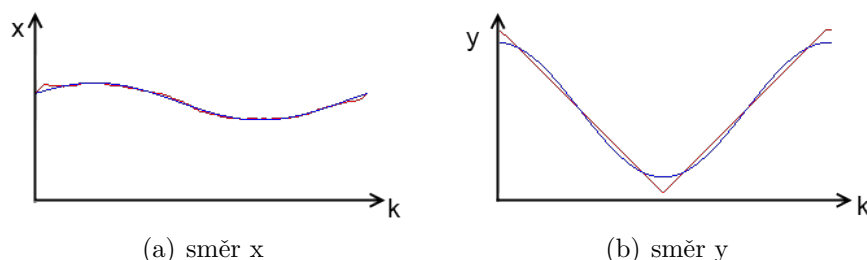
je počet bodů obvodové křivky a k je pořadí bodu na obvodové křivce.

$$x(k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n \left(a_i \cos\left(\frac{2i\pi k}{L}\right) + b_i \sin\left(\frac{2i\pi k}{L}\right) \right) \quad (5.29)$$

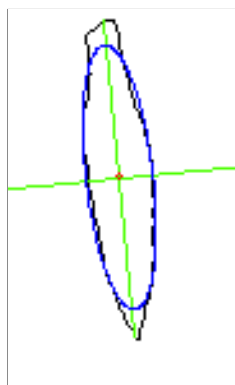
$$a_i = \frac{2}{L} \sum_{k=1}^L \left(x(k) \cos\left(\frac{2i\pi k}{L}\right) \right) \quad (5.30)$$

$$b_i = \frac{2}{L} \sum_{k=1}^L \left(x(k) \sin\left(\frac{2i\pi k}{L}\right) \right) \quad (5.31)$$

Pokud použijeme první harmonickou ($n = 1$), každá křivka představuje jednu periodu goniometrické funkce (obr. 5.15) a složením těchto aproximací (použití první křivky jako x-ové a druhé křivky jako y-ové souřadnice) získáme v původním obrázku elipsu (obr. 5.16).



Obrázek 5.15: *Souřadnicové křivky ve směru x a y (červeně) a aproximace první harmonickou (modře)*



Obrázek 5.16: *Obvod štěrbinu aproximovaný elipsou, červeně označeno těžiště elipsy, zeleně osa a normála*

5.5 Parametry odvozené z aproximace štěrbinu elipsou

Dalšími parametry jsou vlastnosti elipsy získané složením aproximací souřadnicových křivek.

5.5.1 Podlouhlost elipsy

Stejně jako u plochy štěrbiny můžeme podlouhlost počítat i pro aproximovanou elipsu. Podle souřadnicové křivky x lze nalézt šířku odečtením maximální a minimální hodnoty, stejným způsobem se vypočítá výška podle souřadnicové křivky y . Výšku a šířku spolu vydělíme a získáme podlouhlost elipsy - vztah (5.32), kde H_e je výška elipsy a W_e je její šířka.

$$O_e = \frac{H_e}{W_e} \quad (5.32)$$

5.5.2 Těžiště elipsy

Dále můžeme spočítat těžiště elipsy. Těžiště elipsy lze vypočítat zprůměrováním všech bodů jejího obvodu nebo využít koeficienty a_0 a b_0 z Fourierovy aproximace.

$$C_{ex} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i), C_{ey} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i) \quad (5.33)$$

Proměnné x_i a y_i jsou souřadnice i -tého bodu obvodu elipsy, n je počet bodů obvodu.

Také je možné pozorovat chování těžiště elipsy v čase, tj. jeho vzdálenost od osy a normály a porovnat vzdálenosti oproti plošnému těžišti.

$$D_{ex} = \frac{aC_{ex} + bC_{ey} + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5.34)$$

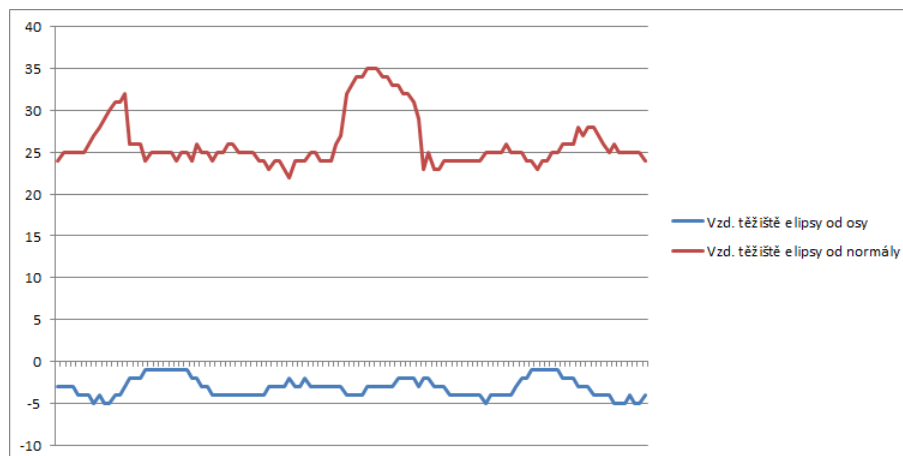
$$D_{ey} = \frac{a_n C_{ex} + b_n C_{ey} + c_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad (5.35)$$

Hodnoty a , b a c jsou koeficienty osy (podle vztahů 5.7 až 5.9), hodnoty a_n , b_n a c_n jsou koeficienty normály (vztahy 5.10).

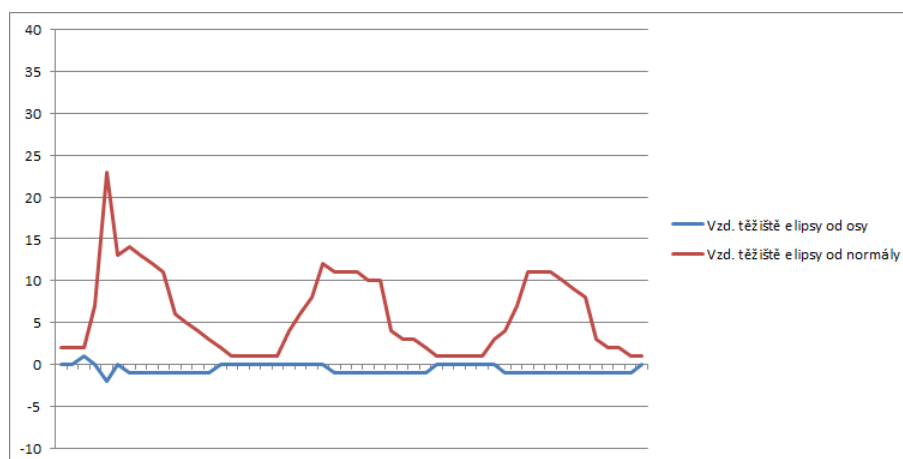
Následující grafy (obr. 5.17 pro nesymetrické a obr. 5.18 pro symetrické hlasivky) zobrazují vývoj vzdálenosti těžiště elipsy od osy a normály. Opět je vidět u nesymetrických hlasivek větší pohyb těžiště v ose x (vzdálenost od osy) než u symetrických. Pro tyto grafy platí stejný popis jako pro grafy v kapitole 5.3.7.

5.6 Parametry jedné periody kmitání

Jednou periodou kmitání hlasivek se rozumí část záznamu od uzavření hlasivek přes maximální otevření do dalšího uzavření. V jedné periodě lze např. porovnávat maximální a minimální hodnoty velikosti plochy, obvodu či výchylky těžiště. Dále je možné porovnávat parametry zvlášť pro levou a pravou stranu hlasivek. Následující kapitoly popisují některé důležité parametry jedné periody.



Obrázek 5.17: Graf pohybu těžiště u nesymetrických hlasivek



Obrázek 5.18: Graf pohybu těžiště u symetrických hlasivek

5.6.1 Poměr největší a nejmenší velikosti plochy štěrbiny

Poměr největší a nejmenší velikosti plochy štěrbiny lze vypočítat tak, že nalezneme maximální a minimální velikost a určíme jejich poměr (vztah 5.36). Dostaneme číslo, které se pohybuje mezi 0 a 1 a udává míru uzavírání štěrbiny. Ideální hodnota je 0, kde dochází k úplnému uzavírání hlasivek. Hodnota 1 by naopak udávala, že se hlasivky vůbec nepohybují.

$$A_r = \frac{A_{min}}{A_{max}} \quad (5.36)$$

Hodnoty A_{min} a A_{max} jsou minimální a maximální velikost plochy v rámci periody. Tento parametr lze vypočítat i pro celou sekvenci snímků.

5.6.2 Poměr největší a nejmenší délky obvodu štěrbiny

Stejným způsobem můžeme porovnat délku objemu při uzavření a při otevření (vztah 5.37). Hodnota parametru je opět pohybuje od 0 do 1, kdy hodnota 0 značí úplný uzávěr hlasivek a hodnota 1 žádnou změnu délky obvodu.

$$P_r = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (5.37)$$

Hodnoty P_{min} a P_{max} jsou minimální a maximální délky obvodu štěrbiny v rámci periody. Teto parametr lze také vypočítat pro celou sekvenci snímků.

5.6.3 Rychlostní kvocient

Každá perioda je rozdělena na fázi otevírání, zavírání a uzavření hlasivek. Poměr času otevírání a zavírání se nazývá rychlostní kvocient a je vypočten podle vztahu (5.38), kde T_o je doba otevírání hlasivek, tj. čas od začátku otevírání (kdy nenulová velikost plochy je minimální) do úplného otevření (kdy velikost plochy je maximální) a T_c je čas od úplného otevření do uzávěru hlasivek (kdy hodnota velikosti plochy je minimální nebo nulová). Rychlostní kvocient je podle [3] obvykle menší než 1. Časový úsek v sekvenci se snadno vypočítá součinem doby jednoho snímku a počtu snímků. Doba jednoho snímku je při frekvenci 4000 snímků za vteřinu $1/4000 = 0,25$ ms.

$$SQ = \frac{T_o}{T_c} \quad (5.38)$$

5.6.4 Kvocient otevření

Další parametr je poměr času, kdy je hlasivka otevřená (velikost plochy je nenulová), k celkové délce periody (vztah 5.39). Hodnota se u zdravých hlasivek při normální fonaci pohybuje mezi 0,6 a 0,8 [3].

$$OQ = \frac{T_o + T_c}{T} \quad (5.39)$$

Hodnota T_o je doba otevírání hlasivek, T_c doba zavírání hlasivek a T je celková doba periody.

5.6.5 Frekvence kmitání

Frekvence kmitání hlasivek určuje výslednou výšku hlasivkového tónu. Ta lze určit z převrácené hodnoty doby periody podle vztahu (5.40), kde T je doba jedné periody.

$$F = \frac{1}{T} \quad (5.40)$$

5.7 Parametry celé sekvence snímků

V celé sekvenci snímků lze porovnávat parametry jednotlivých snímků a period a počítat jejich rozdíly v jednotlivých fázích otevření. Například lze sečíst velikosti plochy štěrbiny ve snímcích v jedné periodě a porovnat se součtem velikostí plochy druhé periody - vztah (5.41), kde n index posledního snímku v jedné periodě, m je index posledního snímku v druhé periodě a A_k je velikost plochy v k -tém snímku. Tímto vztahem lze určit, do jaké míry jsou dva po sobě jdoucí kmity podobné. Obdobným způsobem lze vypočítat rozdíl obvodů v jednotlivých periodách podle vztahu (5.42), kde P_k je délka obvodu v k -tém snímku.

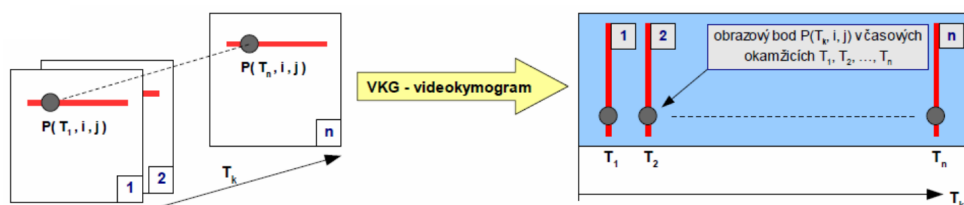
$$A_p = \sum_{k=1}^n A_k - \sum_{k=n+1}^{2m} A_k \quad (5.41)$$

$$P_p = \sum_{k=1}^n P_k - \sum_{k=n+1}^{2m} P_k \quad (5.42)$$

Dále lze porovnávat parametry jednotlivých period, například vývoj maximálních a minimálních velikostí ploch, délek obvodů nebo výchylek těžiště, a sledovat, jaké jsou mezi periodami rozdíly. Tím lze určit pravidelnost či nepravidelnost kmitání hlasivek, tzn. jestli jejich chování se pravidelně opakuje.

5.7.1 Kymogram

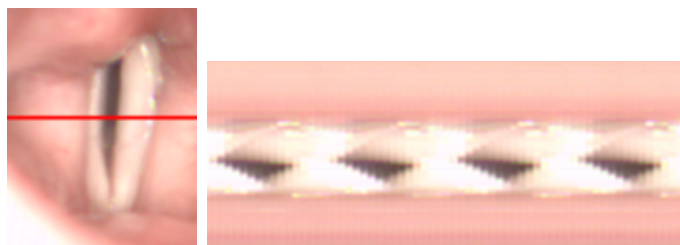
Jednou z metod sledování hlasivek je kymografie, jejíž výsledkem je kymogram. Kymogram zobrazuje vývoj pohybu hlasivky v čase pod stanoveným řezem. Z jednotlivých snímků sekvence se pak poskládá obraz kymogramu. Princip metody je znázorněn na obr. 5.19.



Obrázek 5.19: *Princip kymografie*

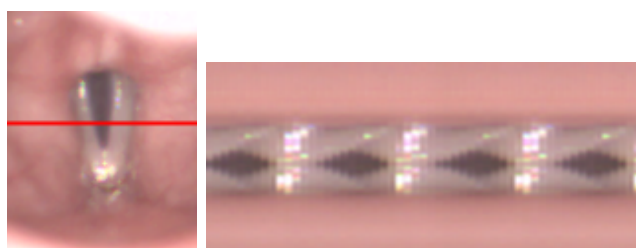
Pro tvorbu kymogramu je nejprve nutné určit místo řezu a poté je z něj možné v tomto místě určovat šířku štěrbiny, pokud je kymogram naprahován. Stejně výsledky ale může poskytnout sledování délky kolmice na osu ve stejném místě v již naprahovaných snímcích. Na kymogramu může být dobře patrná nesymetrie kmitání hlasivek, ale pro automatické zpracování neposkytuje žádné další informace.

Na prvním obrázku jsou nesymetricky kmitající hlasivky a jejich kymogram (obr. 5.20(a)). Ve srovnání s druhým obrázkem, kde jsou symetricky kmitající hlasivky (obr. 5.20(c)), je vidět, že pravá hlasivková řasa kmitá v menším rozsahu než levá.



(a) snímek ne-sym. hlasivek

(b) kymogram



(c) snímek sym. hlasivek

(d) kymogram

Obrázek 5.20: *Nesymetrické a symetrické hlasivky a jejich kymogramy*

5.8 Tabulka parametrů

V tabulce 5.1 jsou uvedeny všechny počítané parametry jednotlivých snímků včetně jejich označení. Pro porovnání je v tabulce označeno, jaké parametry počítá dodávaný software k vysokorychlostním kamerám. V tabulce 5.2 jsou parametry, které platí pro jednu periodu kmitání a v tabulce 5.3 parametry celé sekvence. Tato data dodávaný software neposkytuje.

parametr	označení	Wolf ¹	Kay ²
Velikost plochy	A	x	x
Velikost levé části plochy	A_{left}		x
Velikost pravé části plochy	A_{right}		x
Poměr max. a min. velikostí plochy	A_r		
Vychýlení plochy	A_d		
Délka obvodu	P		
Délka levé části obvodu	P_{left}		
Délka pravé části obvodu	P_{right}		
Rozdíl pravé a levé části obvodu	P_d		
Členitost obvodu	S		
Členitost levé části obvodu	S_{left}		
Členitost pravé části obvodu	S_{right}		
Délka osy	L_{axis}	x	x
Délka normály	L_{norm}	x	x
Podlouhlost	O		
Pozice těžiště	C		
Vychýlení těžiště od osy	D_x		
Vychýlení těžiště od normály	D_y		
Výška elipsy	H_e		
Délka elipsy	W_e		
Podlouhlost elipsy	O_e		
Pozice těžiště elipsy	C_e		
Vychýlení těžiště elipsy od osy	D_{ex}		
Vychýlení těžiště elipsy od normály	D_{ey}		
Elektroglottografická data ³	-	x	
Audio data ³	-	x	

Tabulka 5.1: Tabulka počítaných parametrů jednotlivých snímků a jejich označení

¹Parametry, které zpracovává dodávaný software od firmy Richard Wolf.

²Parametry, které zpracovává dodávaný software od firmy Kay Elemetrics.

³Tato data nebyla pro tuto práci k dispozici.

parametr	označení
Maximální velikost plochy	A_{max}
Minimální velikost plochy	A_{min}
Poměr min. a max. velikosti plochy	A_r
Maximální délka obvodu	P_{max}
Minimální délka obvodu	P_{min}
Poměr min. a max. délky obvodu	P_r
Doba otevírání	T_o
Doba zavírání	T_c
Rychlostní kvocient	SQ
Doba periody	T
Frekvence kmitání	F
Kvocient otevření	OQ

Tabulka 5.2: Tabulka počítaných parametrů jedné periody a jejich označení

parametr	označení
Maximální velikost plochy	A_{max}
Minimální velikost plochy	A_{min}
Poměr min. a max. velikosti plochy	A_r
Maximální délka obvodu	P_{max}
Minimální délka obvodu	P_{min}
Poměr min. a max. délky obvodu	P_r
Rozdíl ploch period	A_p
Rozdíl obvodů period	P_p

Tabulka 5.3: Tabulka počítaných parametrů celé sekvence a jejich označení

Software od firmy Kay Elemetrics se dále zabývá frekvenční analýzou jasů jednotlivých bodů, kdy nad vývojem jasů stejnohlých bodů aplikuje Fourierovu transformaci, a šířky štěrbin na několika místech. Software od firmy Richard Wolf aplikuje Fourierovu transformaci na vývoj šířky, výšky a plochy štěrbin v čase pro získání popisu dynamiky ve frekvenční oblasti. Toto nebylo v této práci implementováno.

6 Aplikace a databáze pro správu dat

Cílem zpracování videozáznamů pořízených vysokorychlostní kamerou je doplnění výstupů dodávaného softwaru firmy Richard Wolf o nové metody zpracování a definování dalších parametrů pro popis tvaru a chování hlasivek. Úkolem bylo vytvořit takový nástroj, který umožní experimentálním způsobem tyto metody testovat a zpracováním videozáznamů získávat parametry, které mají z hlediska diagnózy vypovídací schopnost.

Aplikace pro zpracování videozáznamů byla napsána v jazyce C#, její popis je v příloze A.1.2. Jejím vstupem je soubor s videozáznamem a výstupem textový soubor, který obsahuje veškeré vypočtené parametry sekvence, period i jednotlivých snímků.

Pro lepší orientaci v datech byla vytvořena databáze, do které lze zadat informace o pacientech a jejich vyšetření. Ke každému vyšetření lze přiřadit jeden videozáznam a soubor s výsledky. Pro budoucí kompatibilitu s programy, které se využívají pro analýzu a diagnostiku hlasivek na ORL klinice Fakultní nemocnice Plzeň, byla použita podobná struktura databáze. Dlouhodobým cílem je databáze sjednotit a získat tak kompletní soubor výsledků všech používaných metod v jednom systému.

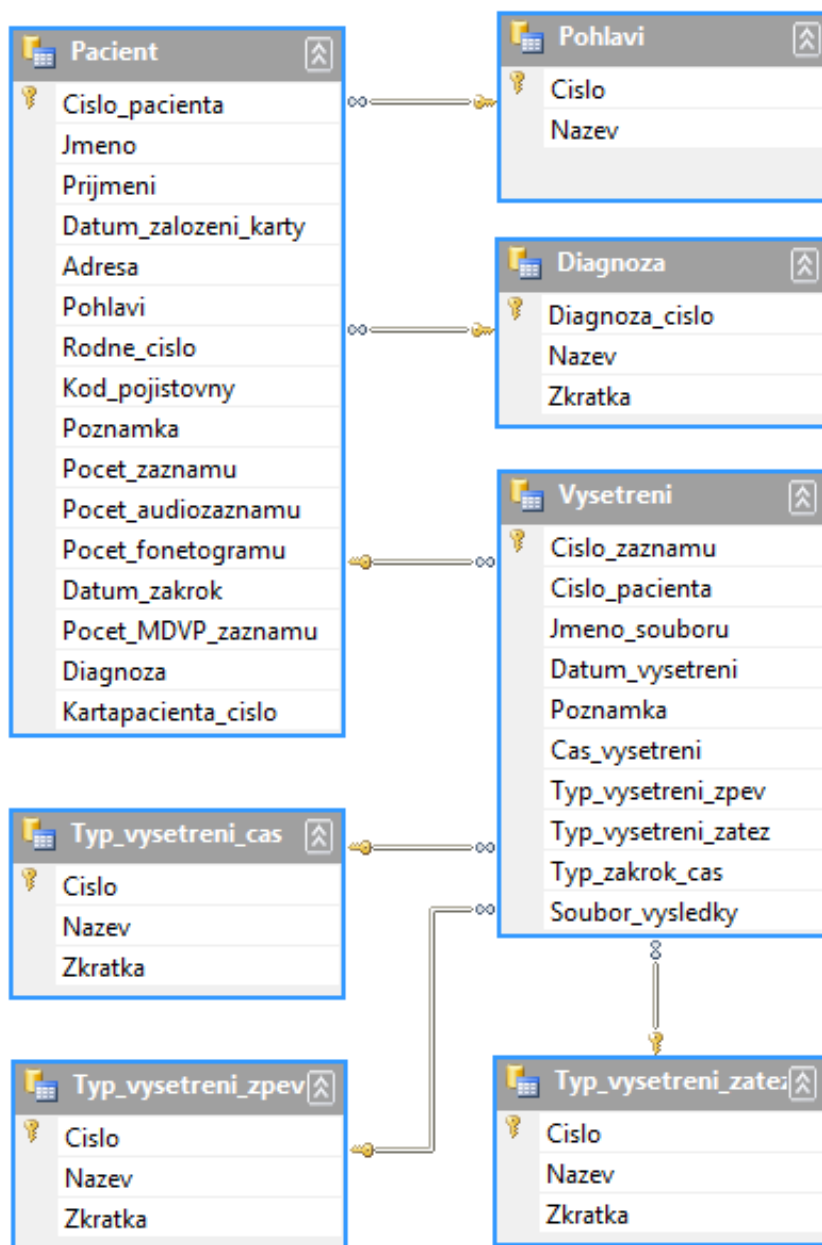
Pro snadnou přenositelnost programu mezi počítači je databáze ukládána do XML souboru a o její správu se stará jednoduchá aplikace, opět napsaná v jazyce C# (viz kap. A.1.1). Jako prostředek pro práci s daty byla využita integrovaná komponenta DataSet a pro zobrazení komponenta DataGridView.

6.1 Struktura databáze

Hlavní tabulkou je tabulka *Pacient*, která obsahuje obecné informace o pacientovi. Data o jednotlivých vyšetřeních včetně odkazů na soubor s videozáznamem a výsledky jsou uloženy v tabulce *Vysetreni*. Schéma celé databáze je vidět na obr. 6.1.

Výsledky jednotlivých videosekvencí jsou uloženy v textovém souboru, kde hlavičku tvoří data, která platí pro celou sekvenci, a následuje tabulka (jako oddělovač sloupců byl použit tabulátor) vypočtených parametrů jednotlivých snímků. Na konci souboru se nachází tabulka period s parametry. Tento soubor je uložen spolu s videosekvencí v podadresáři aplikace.

Jednotlivé soubory s výsledky je možné importovat do tabulkového procesoru, kde lze provést další výpočty, statistiky parametrů a jejich vizualizaci. Grafy v této práci byly vytvořeny v aplikaci Excel od firmy Microsoft.



Obrázek 6.1: Schéma databáze

7 Zhodnocení výsledků

V rámci této práce bylo provedeno testování výsledků nad vybraným souborem videozáznamů z vysokorychlostní kamery. Tento soubor obsahuje 20 videozáznamů sekvencí kmitání hlasivek. Soubor byl pro tento účel vybrán tak, aby obsahoval spektrum typů záznamů podle kvality², a jednotlivé záznamy obsahovaly rozdílné sekvence kmitání. Např. nesymetrie způsobené obrnou zvrátaného nervu, příklad vyrůstající hmoty na jedné hlasivce (polyp) a několik případů zdravých hlasivek. Přehledově je tento soubor záznamů uveden v tab. 7.1.

záznam	popis	snímků	period	F^1	kvalita ²	detekce ³	osa ⁴
01.avi	nesymetrie	332	24	363,6	1a	aut.	aut.
02.avi	obrna	384	16	173,4	2a	man.	aut.
03.avi	po léčbě obrny	394	18	192,5	1a	aut.	aut.
04.avi	nesymetrie	126	7	280,7	1a	aut.	aut.
05.avi	nestejné kmity	101	4	181,8	1a	aut.	aut.
06.avi	polyp	359	9	107,4	2a	aut.	aut.
07.avi	zdravé hlasivky	39	3	333,3	1a	aut.	aut.
08.avi	zdravé hlasivky	41	2	195,1	1a	aut.	aut.
09.avi	nesymetrie	102	6	266,7	2b	aut.	aut.
10.avi	zdravé hlasivky	30	2	285,7	1a	aut.	aut.
11.avi	nesymetrie	105	5	190,5	1b	man.	aut.
12.avi	zdravé hlasivky	59	2	135,6	2a	man.	aut.
13.avi	nesymetrie	56	3	285,7	1a	aut.	aut.
14.avi	nesymetrie	66	3	250,0	1a	aut.	aut.
15.avi	obrna	77	3	176,5	2a	man.	aut.
16.avi	nedomykavost	64	3	235,3	1a	aut.	aut.
17.avi	zdravé hlasivky	44	2	242,4	1a	aut.	aut.
18.avi	zdravé hlasivky	59	3	260,9	1a	aut.	aut.
19.avi	zdravé hlasivky	52	2	222,2	1a	aut.	aut.
20.avi	zdravé hlasivky	39	2	285,7	2a	aut.	aut.

Tabulka 7.1: Testovací sekvence se základními vlastnostmi

¹Frekvence kmitání hlasivek.

²Kvalita snímku určena subjektivním zhodnocením záznamu - viz kap. 3.4.3.

³Způsob detekce hlasivkové šterbiny; aut. = automaticky, man. = manuálně, tzn. s ruční úpravou parametrů pro zpracování.

⁴Způsob nalezení osy; aut. = automaticky, man. = polohu osy bylo nutné určit ručně.

7.1 Testování metody detekce hlasivkové štěrbiny

Většina sekvencí (16 z 20) byla zpracována zcela automaticky, tj. vstupem byl pouze videozáznam a nebyl nutný žádný zásah uživatele. U některých sekvencí (4 z 12), zvláště u těch ze druhé kategorie kvality, bylo však nutné ručně upravit hodnotu prahu, která byla určena chybně (nebyla detekována celá štěrbina nebo bylo do oblasti štěrbin zahrnuto i okolí), nebo upravit masku. Lokalizace regionu, který obsahuje oblast hlasivkové štěrbin, a nalezení osy proběhlo správně u všech testovacích sekvencí (20 z 20). U záznamu, kde byl diagnostikován polyp, lze však obtížně ověřit správnost umístění osy.

Podle tabulky 7.1 je patrné, že ohodnocení kvality snímků nebylo provedeno zcela přesně za předpokladu z kap. 3.4.3, že snímky z první kategorie lze prahovat automaticky a pro snímky ze druhé kategorie je nutný ruční zásah. Soubory 09.avi a 20.avi byly zařazeny do druhé kategorie kvality, ale bylo možné je zpracovat automaticky, naopak u snímku 11.avi byl nutný ruční zásah, ačkoliv byl zařazen do první kategorie. Pro přesnější ohodnocení kvality snímků by byla nutná podrobnější analýza.

7.2 Parametry vyšetření a jejich popis

V tabulce 7.2 jsou u jednotlivých sekvencí vypsány vybrané parametry, které byly vypočteny v aplikaci.

Parametry A_r a P_r (viz kap. 5.6.1, 5.6.2) mají v ideálním případě pro úplný uzávěr hlasivek hodnotu 0, protože při úplném závěru je minimální plocha a obvod štěrbin v sekvenci nulová. Tomu v našem souboru odpovídá 7 záznamů - 03.avi, 04.avi, 05.avi, 07.avi, 17.avi, 18.avi a 20.avi. Nejvyšších hodnot obou zmíněných parametrů dosahoval záznam 16.avi, u kterého byla diagnostikována nedomykavost a více než třetina hlasivek byla stále otevřená.

Další dva parametry, maximální hodnoty A_d a P_d , vypovídají o symetrii hlasivek (kap. 5.3.4, 5.3.5). Nejnižší hodnoty se vyskytují u záznamu 07.avi, 08.avi, 10.avi, 17.avi a 20.avi, které odpovídají zdravým hlasivkám.

Maximální členitost (max. S , viz kap.) indikuje tvar hlasivkových řas, ale podle výsledků testování nad tímto souborem videosekvencí nebyla nalezena souvislost s poškozením hlasivek. Z posledních dvou parametrů, maximální vychýlení těžiště plochy a těžiště elipsy (max. D_x a D_{ex} , viz kap. 5.3.7, 5.5.2), lze opět určit symetrii hlasivek, kdy parametry záznamů symetrických hlasivek dosahovaly nejnižších hodnot.

záznam	A_r	P_r	max. A_d	max. P_d	max. S	max. D_x	max. D_{ex}
01.avi	0,13	0,43	71,32	90,38	1,15	3	3
02.avi	0,24	0,57	41,83	46,19	0,47	4	4
03.avi	0	0	44,97	68,23	1,87	2	2
04.avi	0	0	38,46	71,83	1,69	3	3
05.avi	0	0	27,19	20,06	1,84	3	3
06.avi	0,17	0,18	44,55	41,86	0,68	4	3
07.avi	0	0	4,3	13,69	1,66	1	1
08.avi	0,1	0,3	19,4	12,88	0,79	1	1
09.avi	0,02	0,08	67,85	76,9	1,73	2	2
10.avi	0,14	0,39	11,6	5,41	0,34	1	1
11.avi	0,17	0,41	33,37	45,41	0,47	2	2
12.avi	0,11	0,32	9,26	49,12	0,68	1	1
13.avi	0,31	0,7	47,61	31,95	0,67	2	2
14.avi	0,21	0,66	30,61	50,38	1,21	2	2
15.avi	0,07	0,23	49,12	63,7	0,8	4	4
16.avi	0,35	0,69	28,1	17,22	1,12	3	4
17.avi	0	0	8,38	10,66	1,6	1	1
18.avi	0	0	32,59	22,78	1,13	1	1
19.avi	0,15	0,43	22,5	27,03	1,04	2	2
20.avi	0	0	18,04	46,98	1,71	0	0

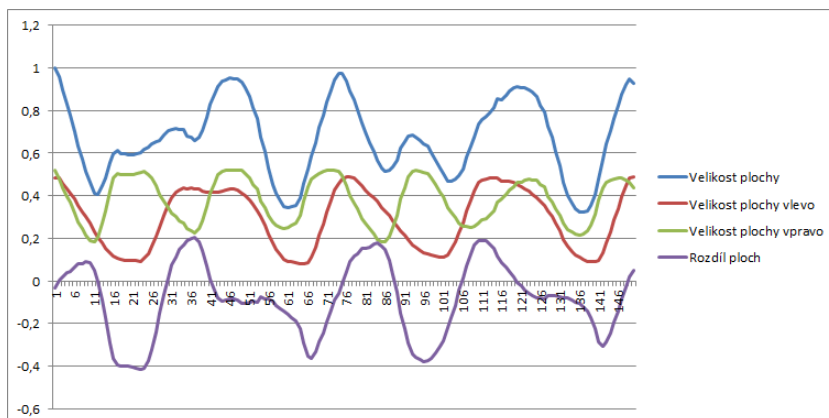
Tabulka 7.2: Testovací sekvence s vybranými vypočtenými parametry

7.3 Analýza vývoje parametrů

U záznamu 02.avi, kde hlasivky byly postiženy obrnou zvrtného nervu, nelze z vybraných parametrů v tab. 7.2 určit poškození. Lze ho ale rozpoznat zobrazením vývoje velikosti plochy v sekvenci (obr 7.1), kde chování levé a pravé hlasivkové řasy je zcela náhodné.

7.4 Problém dlouhých záznamů

U sekvencí, které obsahují více než 300 snímků, je již poměrně velký problém s pohybem kamery při snímání. Osa je zafixována na jednom místě a při vzájemném pohybu kamery a hlasivek dochází k postupnému nárůstu plochy na jedné straně osy a poklesu na straně druhé. Proto jsou u těchto záznamů hodnoty maximálních rozdílů velikostí ploch a obvodů v tab. 7.2 poměrně vysoké. Řešením tohoto problému je zpracování pouze části sekvence, další možností je u již vypočtených hodnot považovat za správná pouze část dat blízko středu sekvence. Pro ukázkou



Obrázek 7.1: Vývoj velikosti plochy u hlasivek postižených obrnou zvratného nervu

je v tab. 7.3 z první videosekvence zpracována pouze její část (prvních 40 snímků) a vypočteny parametry (a) a následně vybrány parametry pro 40 snímků ze střední části původně vypočtených dat (b). Oba řádky obsahují podobné a relevantní informace. Další možností, jak řešit problém dlouhých záznamů, je nefixovat osu štěrbinu na celou sekvenci, ale rozdělit sekvenci na části a počítat polohu osy pro každou část zvlášť.

videosekvence	A_r	P_r	max. A_d	max. P_d	max. S	max. D_x	max. D_{ex}
01.avi (a)	0,56	0,89	42,18	30,14	0,62	1	1
01.avi (b)	0,58	0,86	32,57	11,01	0,67	1	1

Tabulka 7.3: 40 snímků z první testovací sekvence s vybranými vypočtenými parametry

7.5 Další možné postupy získávání parametrů

Při testování metod a tvorbě této práce byly navrženy další možné postupy, které by mohly poskytnout jiný způsob detekce štěrbinu a nové parametry.

Jednou z metod je zpracování většího množství kymogramů z jedné sekvence na různých místech snímků a jejich pomocí určovat velikost a chování štěrbinu. V jednotlivých rádcích kymogramu by podle tvaru jasové křivky byla detekována hranice štěrbinu.

Další metodou je Fourierova analýza hranice štěrbinu. V této práci byla použita 1. harmonická pro aproximaci elipsy, dále by bylo možné využít více harmonických k získání tzv. Fourierových deskriptorů pro popis tvaru hlasivkové štěrbinu. Tyto deskriptory a jejich vývoj v čase by mohly poskytnout další parametry.

Rozšířením práce by dále mohla být analýza získaných parametrů pomocí statistiky (výpočet rozptylů, středních hodnot apod.) nebo Fourierovy analýzy.

8 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá zpracováním a hodnocením obrazových záznamů pohybu hlasivek, které byly pořízeny vysokorychlostní kamerou. Použitím navržených metod zpracování obrazových dat a postupů byla detekována hlasivková štěrbina a byla automatickou metodou vypočítána osa symetrie hlasivek. Byl navržen soubor parametrů, který je charakteristický pro chování hlasivek během jejich otevírání a uzavírání. Tyto parametry budou po další analýze a vyhodnocení použity v rámci včasné diagnostiky onemocnění hlasivek.

V první části práce je popsána anatomie a fyziologie hlasivek. Následně je uveden přehled používaných vyšetřovacích metod, zvláště pak vysokofrekvenční snímání. Také jsou zde shrnuty publikované a používané metody pro automatickou detekci hlasivkové štěrbiny.

V další části jsou testovány běžně používané metody automatického prahování. Pro získání celkového přehledu o jejich chování pro dané spektrum snímků byly aplikovány nejprve na celý snímek. Pak byl navržen vlastní postup lokalizace těsného okolí hlasivkové štěrbiny, tzv. region, ve kterém bylo prováděno automatické prahování.

Ve třetí části práce je popsán postup nalezení osy symetrie hlasivek, která je nezbytná pro další vyhodnocení a porovnávání symetrie kmitání hlasivek. Dále jsou v této části navrženy a popsány jednotlivé parametry, které je možné získat ze snímku po detekci štěrbiny. Mezi nejdůležitější patří velikost plochy a délka obvodu štěrbiny. Dále jsou uvedeny parametry popisující symetrii hlasivkových řas a kinematiku hlasivek, např. pohyb těžiště plochy štěrbiny.

V práci je dále uveden způsob uložení a archivace dat, která obsahují videozáznamy a výsledky analýzy hlasivkové štěrbiny. Pro tento účel byla navržena a realizována databáze, která obsahuje kartu pacienta a záznamy jednotlivých vyšetření.

Výsledkem této práce je programová aplikace, pomocí které lze automaticky detekovat hlasivkovou štěrbinu, osu symetrie a vypočítat soubor definovaných parametrů ze záznamu videosekvence z vysokorychlostní kamery. Aplikace má experimentální charakter, tj. je možné ji dále rozvíjet v oblasti metod detekce hlasivkové štěrbiny, měřených a počítaných parametrů hlasivek a metod hodnocení vývoje vybraných parametrů během jedné periody a sekvence. Tyto parametry budou dále sloužit k podrobnější analýze s cílem diagnostiky poškození hlasivek. Pro účely zpracování dat je součástí aplikace jejich export dat do souboru určeného pro taulkový procesor. Součástí hodnocení v této práci je porovnání několika parametrů mezi různými záznamy hlasivek u pacientů, kteří byli v minulosti již vyšetřeni a byla určena diagnóza.

Literatura

- [1] Čihák R.: Anatomie 2. 1. vyd. ISBN 80-060-88. Avicenum Praha, 1988.
- [2] Darling D.: SOUNDS INTERESTING: The Science of Acoustics, Making Music URL:<http://www.daviddarling.info/childrens_encyclopedia/sound_Chapter4.html>, 5.5.2012
- [3] Novák A.: Foniatrie a pedaudiologie II, Poruchy hlasu - základy fyziologie hlasu, diagnostika, léčba, reedukace a rehabilitace. UNITISK, Praha, 1996.
- [4] Vokřál J.: Akustické parametry chraplavosti, Doktorská disertační práce. Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze, 1998.
- [5] Isshiki N.: Phonosurgery - Theory and practice. Springer Verlag, 1989.
- [6] Kučera M., Frič M, Halíč M.: Praktický kurz hlasové rehabilitace a reedukace. ISBN 978-8025465929. Opočno, 2010.
- [7] Multi-Dimensional Voice Program (MDVP), Operations manual, Kay Elemetrics Corp. 1995.
- [8] Titze I.R.: Principles of Voice Production, Prentice Hall (currently published by NCVS.org), ISBN 978-0137178933. 1994.
- [9] Pešta J., Slípka J., Nový P., Vávra F.: Hodnocení kvality závěru glottis. Otorinolaryngologie a foniatrie, 4 / 2010.
- [10] Laryngoskopie. uLékaře.cz. URL:<<http://www.ulekare.cz/clanek/laryngoskopie-1031>>, 13.4.2011.
- [11] Kastner J.: Videokymografie a digitální kymografie, kymografické nálezy u pacientů po thyreoidektomii. Endoskopie 18 (2). Praha, 2009.
- [12] DV Data in the AVI File Format, Microsoft. URL:<<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms783421.aspx>>, 30.4.2012.
- [13] Bleau A., Leon L.: Watershed-based segmentation and region merging. Computer Vision and Image Understanding 2000;77(3):317–70.

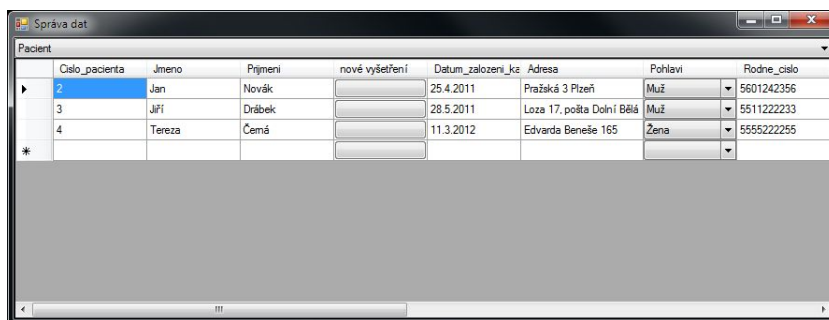
- [14] Osma-Ruiz V., Godino-Llorente J. I., Sáenz-Lechón N., Fraile R.: Segmentation of the glottal space from laryngeal images using the watershed transform. *Computerized Medical Imaging and Graphics* 32, 193–201, 2008.
- [15] Palm C., Keysers D., Lehmann T., Spitzer K.: Gabor Filtering of Complex Hue/Saturation Images for Color Texture Classification. *Proc JCIS 2000*, Atlantic City, USA, pp. 45-49, 2000.
- [16] Mendez A., Garcia M., Ruiz I., Iturricha I.: Glottal Area Segmentation without Initialization using Gabor Filters. *Communications Department. University of Deusto*, 2008.
- [17] Méndez A., Ismaili Alaoui E.M., García B., Ibn-Elhaj E., Ruiz I.: Glottal Space Segmentation from Motion Estimation and Gabor Filtering. *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*. Minneapolis, Minnesota, USA, 2009.
- [18] Peng B., Zhang L.: Automatic Image Segmentation by Dynamic Region Merging. *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 12, no. 12, pp. 3592-3605, 2011.
- [19] Demeyer J., Dubuisson T., Gosselin B., Remacle M.: Glottis Segmentation with a High-Speed Glottography: a Fully Automatic Method. *3rd Advanced Voice Function Assessment International Workshop*. Madrid, 2009.
- [20] Otsu N.: A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.* 9 (1): 62–66, 1979.
- [21] Morse B.: *Thresholding*, Brigham Young University, 2000.
- [22] Ng H. F.: Automatic thresholding for defect detection, *Pattern Recognition Letters*, (27): 1644-1649, 2006.
- [23] Kittler J., Illingworth, J.: *Minimum error thresholding*, SERC Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon OX11 0QX, U.K, 1986.
- [24] Pun T.: *A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram*, Laboratoire de Traitement des Signaux, 16 ch. de Bellerive, CH-1007 Lausanne, Switzerland, 1979.
- [25] Shapiro, L., and Stockman, G.: *Computer Vision*. Prentice Hall. pp. 69–73. 2002.

A Přílohy

A.1 Uživatelská dokumentace k aplikaci

A.1.1 Správa pacientů

Aplikace pro správu pacientů, videozáznamů a zpracovaných výsledků je tvořena dvěma okny. Po spuštění aplikace, při kterém se načtou data z databáze, se zobrazí první, základní okno (obr A.1), které obsahuje vše pro jednoduchou správu dat. V horní části se nachází výběr tabulky databáze, která bude aktuálně zobrazena. Po výběru tabulky se okno překreslí a zobrazí se všechna data uložená ve vybrané tabulce.



The screenshot shows a window titled 'Správa dat' with a dropdown menu set to 'Pacient'. Below the menu is a table with the following data:

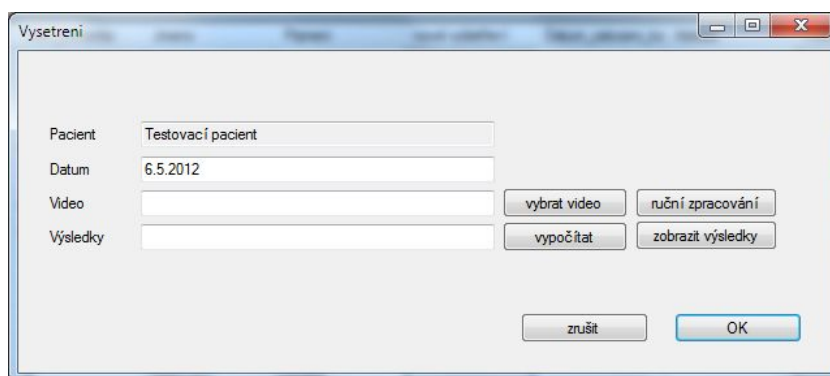
	Číslo_pacienta	Jméno	Příjmení	nové vyšetření	Datum_založení_kz	Adresa	Pohlaví	Rodné_číslo
▶	2	Jan	Novák		25.4.2011	Pražská 3 Plzeň	Muž	5601242356
	3	Jiří	Drábek		28.5.2011	Loza 17, pošta Dolní Bělá	Muž	5511222233
	4	Tereza	Černá		11.3.2012	Edvarda Beneše 165	Žena	5555222255
*								

Obrázek A.1: Základní okno pro práci s databází

Hned po spuštění se automaticky zobrazí data pacientů. V hlavním okně je možné pacienty přidávat, upravovat i mazat. Ve čtvrtém sloupci se nachází tlačítko pro přidání záznamu vyšetření. Zobrazí se druhé okno (obr A.2), ve kterém je možné k pacientovi přiřadit videozáznam (pomocí tlačítka vybrat video) a nechat jej zpracovat pro vygenerování souboru s výslednými parametry. Toto je možné buď provést zcela automaticky pomocí tlačítka *vypočítat* nebo ručně tlačítkem *ruční zpracování*, pokud automatické zpracování selže. Vypočtené výsledky je možné prohlédnout tlačítkem zobrazit výsledky. Potvrzením tlačítkem OK jsou tato data uložena do databáze do tabulky vyšetření.

A.1.2 Ruční zpracování videozáznamu

Pokud je zvoleno ruční zpracování videozáznamu, je spuštěna aplikace pro zpracování videozáznamu, která umožňuje projít všechny kroky a případně upravit některé parametry zpracování. Zobrazí se okno, které obsahuje textové pole s výběrem souboru ke zpracování. Pokud byla aplikace spuštěna z okna *Vyšetření*, je toto pole předvyplněné.



Obrázek A.2: Okno pro vložení a zpracování videozáznamu

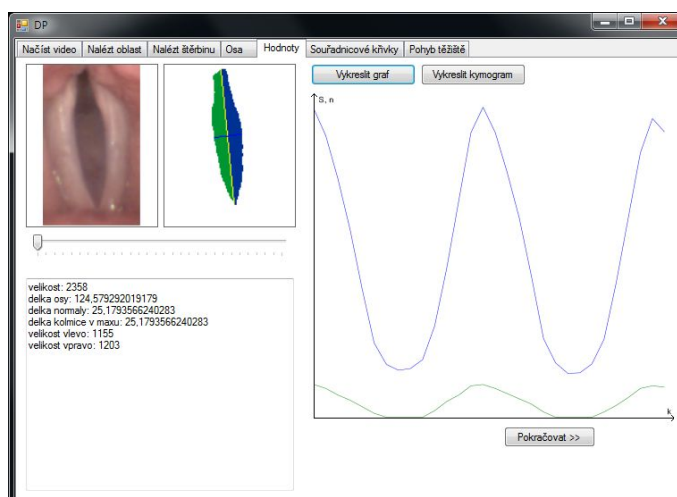
Pro načtení videozáznamu, jehož adresa je v textovém poli, slouží tlačítko *Pokračovat*. Po načtení souboru je zobrazen první snímek sekvence s již automaticky vybraným regionem pro zpracování a posuvníkem pod snímkem lze zobrazit další snímky ze sekvence. Pokud tento region chcete změnit, vyberte myší nový region a potvrďte volbou *použít tento region*. Vybrat původní region lze po kliknutí na snímek volbou *použít původní*. Region by měl obsahovat celou šterbinu ve všech snímcích.

Vedle snímku s regionem je zobrazen maximální a minimální snímek a zvětšený obsah vybraného regionu. Pokud je region nastaven správně, pokračujte tlačítkem *Pokračovat*.

Na další kartě je zobrazen maximální snímek s automaticky naprahovanou šterbinou, která se zobrazuje jako poloprůhledná maska přes snímek. Úpravou posuvníku pod snímkem lze změnit hodnotu prahu a upravit tak masku, která určuje maximální velikost šterbiny. Pokud maska ani po změně hodnoty prahu nevyhovuje, je možné ji ještě omezit kliknutím a pohybem myši na obrázku. Levé tlačítko myši slouží k omezení masky a pravé tlačítko pro její opětovné rozšíření. Výsledek prahování na všech snímcích v sekvenci lze ověřit v pravé části okna. Posuvníkem lze procházet jednotlivé snímky. Pokud je maska šterbiny vyhovující, stiskněte tlačítko *Pokračovat*.

Na další kartě je zobrazena vypočítaná osa šterbiny. Pokud tato osa není v místech, kde by měla být, můžete se zkusit vrátit na předchozí kartu a upravit práh, nebo zkusit definovat vlastní osu myší podobně jako u volby regionu. Tlačítkem *Pokračovat* se přepnete na další kartu, kde jsou již zobrazeny některé výsledky. Vlevo je aktuální snímek a vedle něj snímek naprahovaný a podle osy rozdělený na dvě části se zobrazenou osou a normálou. Posuvníkem lze procházet všechny snímky v sekvenci. Pod snímky je textové pole, které zobrazuje některé vypočtené hodnoty pro každý snímek. Vpravo je pak do grafu vynesena délka normály (zeleně) a velikost plochy (modře). Tlačítkem *Vykreslit kymogram* je možné vykreslit kymogram pro střed snímku. Pro další výsledky stiskněte tlačítko *Pokračovat*.

Dále je zobrazen obvod šterbiny s aproximovanou elipsou, která je vypočítána pomocí souřadnicových křivek, které jsou vyobrazeny vpravo červeně, nahoře podle osy x a dole podle osy y. Modře je pak zobrazena Fourierova aproximace těchto křivek. Na poslední kartě je pak zobrazen pohyb těžiště plochy (zeleně) a elipsy (červeně).



Obrázek A.3: Zobrazení některých hodnot v aplikaci pro zpracování videozáznamu

Ve spodní části je možné vybrat soubor pro export naměřených dat a tlačítkem *Export dat* data uložit. Pokud byla aplikace spuštěna z aplikace *Správa pacientů*, je adresa souboru pro export předvyplněna.

Pro zpracování další videosekvence je možné vrátit se na první kartu aplikace, vybrat nový soubor a opakovat předchozí postup. Aplikaci je možné kdykoliv zavřít křížkem v pravém horním rohu.

Data se ukládají do textového souboru. Jeho hlavička obsahuje celkové informace o videosekvenci, dále následuje seznam všech parametrů jednotlivých snímků a na konci je uveden seznam period s parametry. Jako oddělovač parametrů je použit tabulátor. Soubor lze importovat do tabulkového procesoru pro další zpracování a vizualizaci dat.

A.2 Obsah přiloženého DVD

Na přiloženém DVD se nachází:

- Spustitelná aplikace pro zpracování videozáznamů včetně zdrojových kódů
- Spustitelná aplikace pro správu dat včetně zdrojových kódů
- Text této práce ve formátu PDF a zdrojová data
- Testovací soubor videosekvencí
- Tabulky vypočtených hodnot
- Testovací snímky pro prahování
- Některé citované zdroje v elektronické podobě