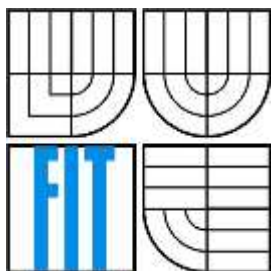




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

LOKALIZACE BIFURKACÍ VE SNÍMCÍCH SÍTNICE

BIFURCATION LOCALIZATION IN RETINA IMAGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ANETA KVAPILOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LUKÁŠ SEMERÁD

BRNO 2016

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2015/2016

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Kvapilová Aneta**

Obor: Informační technologie

Téma: **Lokalizace bifurkací ve snímcích sítnice**
Bifurcation Localization in Retina Images

Kategorie: Zpracování obrazu

Pokyny:

1. Prostudujte metody pro vyhledávání bifurkací ve snímcích sítnic.
2. Experimentálně určete parametry algoritmu pro zvýraznění cév.
3. Implementujte aplikaci, která pro danou sadu snímků lokalizuje výskyty křížení cév na snímcích.
4. Porovnejte dosažené výsledky s expertně anotovanými snímky a navrhnete možnosti dalšího vylepšení.

Literatura:

- Dražanský M., Orság F., Doležel M. et al.: *Biometrie*, Brno, CZ, Computer Press, 2011, s. 294, ISBN 978-80-254-8979-6.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- První dva body zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Semerád Lukáš, Ing.**, UITS FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2015

Datum odevzdání: 18. května 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav inteligentních systémů
612 66 Brno, Božetěchova 2

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček
vedoucí ústavu

Abstrakt

Tato práce se zabývá zpracováním snímků sítnic lidského oka. Cílem je vytvořit systém, který dokáže v zadaném snímku lokalizovat místa, která jsou důležitá při tvorbě biometrické šablony – bifurkace a křížení cév. První část práce se detailněji zaměřuje na biometrii a na vybrané pojmy z této oblasti. Rovněž je zde uvedena anatomie lidského oka s bližším zaměřením na sítnici. V druhé části jsou potom detailně popsány všechny fáze a algoritmy, které byly při tvorbě aplikace použity.

Abstract

This thesis deals with processing images of human retina. Its main goal is to create a system which is able to localize places important in a process of creating biometrical template – bifurcations and crossing of blood vessels. The first part focuses on biometrics in detail and explains certain concepts of this area. It also mentions the anatomy of the human eye focusing on retina. The second part provides detailed description of all the stages and algorithms that were necessary in the process of creation of the application.

Klíčová slova

biometrie, oko, sítnice, segmentace, skeletonizace, lokalizace, bifurkace, OpenCV

Keywords

biometrics, eye, retina, segmentation, skeletonization, localization, bifurcation, OpenCV

Citace

KVAPILOVÁ, Aneta. Lokalizace bifurkací ve snímcích sítnice. Brno 2016. 34 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Semerád Lukáš.

Lokalizace bifurkací ve snímcích sítnice

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Lukáše Semeráda.

Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

.....
Aneta Kvapilová
18. 05. 2016

Poděkování

Chtěla bych poděkovat panu Ing. Lukáši Semerádovi za odborné vedení, cenné rady a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

© Aneta Kvapilová, 2016

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Biometrie.....	2
2.1	Pojem biometrie.....	2
2.2	Historie	2
2.3	Moderní využití	3
2.3.1	Identita osob.....	3
2.3.2	Zabezpečení	4
2.3.3	Kriminalistika	4
2.4	Vlastnosti biometrických prvků.....	5
2.5	Biometrický systém	8
2.6	Vybrané pojmy z oblasti biometrie.....	9
2.6.1	Identifikace	10
2.6.2	Verifikace	10
2.6.3	Vnitrotřídní vs. mezitřídní variabilita	10
2.6.4	Unimodální vs. multimodální systémy	10
2.6.5	Biometrická šablona	11
2.6.6	Určení živosti.....	11
2.7	Výhody	12
2.8	Nevýhody.....	12
3	Anatomie lidského oka.....	13
3.1	Oko	13
3.2	Sítnice	14
3.2.1	Fotoreceptory	15
3.3	Nemoci sítnice	15
3.3.1	Makulární degenerace.....	15
3.3.2	Uzavření sítnicových žil a artérií.....	15
3.3.3	Diabetická retinopatie	16
4	Rozpoznávání pomocí oční sítnice	18
4.1	Fundus kamera.....	18
4.2	Databáze snímků sítnice	19
4.3	Reprezentace sítnice	19
5	Struktura aplikace	20
5.1	Předzpracování snímku fundus kamery.....	21
5.1.1	Velikost a převod do zeleného kanálu	21
5.1.2	Úprava kontrastu.....	21
5.1.3	Gaussovo rozostření.....	22

5.1.4	Segmentace obrazu	22
5.2	Generování masky	25
5.3	Skeletonizace obrazu	26
5.4	Odstranění šumu	26
5.5	Lokalizace bifurkací	28
5.5.1	Kontrola délky	29
5.5.2	Grafické uživatelské rozhraní	30
5.6	Testování	30
5.7	Návrh dalších úprav	32
6	Závěr	33
A.	Obrazový výstup aplikace.....	38
B.	Obsah příloženého CD	39
C.	Uživatelský manuál.....	40

1 Úvod

Ačkoli si to spousta lidí neuvědomuje nebo nad tím vůbec neuvažuje, jisté prvky biometrie používá každý člověk v běžné každodenní komunikaci. Osoby od sebe rozeznáváme pomocí základních biometrických charakteristik, jako je tvar obličeje, barva vlasů, řeč, styl chůze a mnoho dalších vlastností, kterými jsou jedinci charakterizováni a které je činí unikátními.

Pokud je však biometrie chápána jako vědní obor, pak je spojována obecně se zajišťováním bezpečnosti prostřednictvím identifikace jedinců. Předem dané fyzické vlastnosti lidí jsou snímány a využívány ke kontrole přístupu k majetku, ověřování totožnosti osob a potažmo i k ochraně širších skupin lidí. Jako prostředek k těmto úkonům tedy musí být využit takový fyziologický rys člověka, který splňuje určité požadavky – především jedinečnost a univerzálnost. Podrobnější informace o biometrii a pojmech s ní spojených se nacházejí v kapitole 2.

Všeobecně pravděpodobně nejznámějším a hojně používaným biometrickým rysem jsou otisky prstů. Dalším vhodným rysem je oční sítnice. Jedná se o vrstvu cév, které se nachází uvnitř lidského oka. Ty jsou v každém oku jedinečné. Je tedy nemožné, aby existovali dva jedinci se stejnými vzory, které cévy na sítnici tvoří [5]. Protože se sítnice nachází uvnitř oka, je ke snímání použito speciální zařízení, které se nazývá fundus kamera. Bližší informace o anatomii oka a činnosti kamery jsou vysvětleny v kapitolách 3 a 4.

Snímky zachycené touto kamerou jsou dosti odlišné v závislosti na světelných podmínkách a kvalitě použité kamery. Aby tedy bylo možné ze snímku extrahovat právě biometrické rysy, je nutné jej upravit.

Mezi základní úpravy snímku patří především použití filtrů k rozostření, případné vyhlazení obrazu, a tedy odstranění šumu, který by mohl způsobit nechtěné artefakty při dalším zpracování. Dále je nutné snímek převést na černobílý za použití algoritmů prahování. Použitý algoritmus by měl být takový, který se přizpůsobí světelným podmínkám, které mohou být odlišné pro různé části snímku. Dalšímu zpracování obrazových dat je věnována kapitola 5.

Tato bakalářská práce se zabývá úpravou snímků získaných fundus kamerou, jejich zpracováním za účelem extrakce biometrických rysů a uložením získaných rysů. Konkrétně se jedná o nalezení míst na sítnici (snímku), kde dochází ke křížení a rozdvojování cév. Jako programovací jazyk je použit C/C++. K úpravě snímků je využita volně dostupná grafická knihovna OpenCV. Použitými algoritmy, postupy a bližší funkčností programu včetně testů a výsledků se zabývají další kapitoly.

2 Biometrie

2.1 Pojem biometrie

Pojem biometrie je odvozen od řeckých slov „*bios*“, což značí život, a „*metron*“, které znamená měření [2]. Lze ji tedy chápat jako vědní obor zabývající se zkoumáním živých organismů, se zaměřením především na člověka, a jejich měřitelnými vlastnostmi. Mezi tyto měřitelné vlastnosti řadíme především fyziologické tvary a míry různých částí těla, ale patří sem i některé behaviorální vlastnosti.

V některých případech je tento pojem považován přímo za proces rozpoznávání a identifikace jedinců na základě měřitelných biometrických údajů.

2.2 Historie

Přestože je biometrie spojována hlavně s rozvojem počítačů a automatizace, její kořeny sahají daleko do minulosti. Už od nepaměti je při identifikaci jedinců mezi sebou používáno tvaru obličeje, který, jak již bylo zmíněno, je nejběžnější i dnes, a to hlavně pokud se jedná o identifikaci bez využití počítačů. Ovšem nejznámějším prvkem, který bývá využíván v automatizovaných biometrických systémech, je otisk prstu. Právě důkazy o jeho využití patří mezi nejstarší dochované.

Do období několika tisíc let před naším letopočtem jsou datovány rytiny, které zobrazují lidskou ruku s vyznačenými liniemi na kůži, tzv. papilárními liniemi. Rytiny byly objeveny na území dnešní Indiany a pocházejí od indiánských kmenů, které na tomto území sídlily [2].

Mezi další dochované předměty s pozůstatky otisků prstů patří úlomky hliněných tabulek nalezených v části tzv. Aššurbanipalovy knihovny založené již v 9. století před naším letopočtem. Otisky prstů se nacházejí hned vedle jmen a sloužily pravděpodobně k tomu, aby zabránily falzifikaci tabulky. Otisky byly nalezeny na mnoha předmětech, které pocházejí z různých území – především Egypta, Řecka a římského impéria – a sloužily především jako způsob podpisu [2].

Moderní historie biometrie se datuje od druhé poloviny devatenáctého století. V souvislosti s průmyslovou revolucí, a tedy i rozvojem měst a manufaktur, vznikla potřeba formální identifikace jedinců. Jeden ze způsobů vymyslel v roce 1882 antropolog a člen pařížské policie Alphonse Bertillion, který hledal nějaký způsob umožňující identifikovat již jednou odsouzené zločince. Princip spočíval v tom, že míry různých částí těla byly zapisovány na karty. Záhy však bylo zjištěno, že i tyto míry mohou být společné pro více lidí, a mohl by tak být identifikován někdo jiný, proto se od této metody upustilo [2].

Další přístup vznikl v Evropě, Jižní Americe a Asii, kde policejní oddělení začala používat mnohem spolehlivější metodu – identifikaci na základě vzorů na otiscích prstů [1].

Od té doby začaly postupně vznikat sofistikovanější systémy využívající otisků prstů, ale také se objevují první myšlenky využít i jiných prvků, než jsou právě otisky. Postupně se objevují články a studie poukazující na využití oční duhovky, identifikace obličeje nebo řeči. Rovněž i již zavedené postupy se dále automatizovaly.

Moderní biometrické systémy však vznikaly postupně v druhé polovině dvacátého století a jsou úzce spjaty s rozvojem počítačů, protože právě jejich rozvoj umožnil automatizovanou tvorbu i vyhledávání v rozsáhlých databázích s různými biometrickými šablonami.

2.3 Moderní využití

Hlavně po seznámení se s historií se může zdát, že biometrie byla využívána převážně v kriminalistice, případně jako bezpečnostní prvek. K postupné změně dochází již od 60. let 20. století, právě s již zmiňovaným rozvojem techniky [2].

2.3.1 Identita osob

Již několik stovek let před Kristem lidé používali k identifikaci jména a příjmení. S postupem času se ale ukázalo, že jen jména a příjmení nedostačují. Proto se k nim přidávaly další identifikátory, z nichž lze jmenovat tituly, datum narození, místo trvalého bydliště, místo narození atd. Takto vznikly osobní doklady, ve kterých byly (a stále ještě jsou) některé tyto identifikátory uvedeny. Historicky nejstarším dokladem je pas, který vznikl ve 13. století na území Anglie [3]. Ten na dlouhou dobu sloužil jako univerzální doklad pro cestování. Vytěsněn byl až začátkem 21. století, a to osobními plastovými kartami s čipy [3]. K pasům se dále přidávaly další – občanské průkazy, rodné listy, řidičské průkazy apod. Jakousi revolucí oproti papírovým dokladům představovaly právě plastové karty s čipy, které se hojně používají dnes. Údaje o majiteli karty jsou uloženy v elektronické podobě na malém čipu, který je součástí karty. Používány jsou jak v občanských či řidičských průkazech, tak i v platebních či jiných kartách.

Všechny tyto doklady mají hned několik nevýhod. Mezi hlavní patří to, že jsou na sobě závislé – většina z nich je vydávána na základě rodného listu, takže stačí falsifikace jednoho dokladu, a mohou být lehce falsifikovány i ostatní. Další nevýhodou je to, že nejsou s člověkem fyzicky pevně svázány, takže může dojít k jejich ztrátě a následnému zneužití.

Do jisté míry by k omezení těchto nevýhod mělo napomoci zavedení biometrických prvků právě do těchto průkazů. Minimalizuje se možnost zfalšování dokladů a jejich zneužití v případě ztráty. Tento trend je již všude po světě hojně využíván.

Například v České republice je již zavedena databáze biometrických údajů lidí, kteří žádají o nový pas, občanský nebo řidičský průkaz. Podle nařízení Rady EU č. 2252/2004 o normách pro bezpečnostní a biometrické prvky v cestovních dokladech, ze dne 13. 12. 2004, jsou všechny členské státy EU povinny zavést první biometrické prvky (obličej) do nově vydávaných cestovních dokladů od

září 2006 a další biometrické prvky (otisky prstů) od března 2008. Tyto biometrické charakteristiky jsou používány jak pro ověřování autenticity pasů a víz, tak pro ověřování identity držitele pasu [9].

2.3.2 Zabezpečení

Na základě biometrických prvků probíhá ověřování osob rovněž na místech, kde k němu dochází automatizovaně. Z nejběžnějších lze jmenovat:

- Na mnoha letištích po světě je používán sken oční duhovky místo toho, aby lidé museli stát fronty kvůli kontrole pasů.
- Pro přístup do více střežených budov nebo jejich částí jsou využívány nejen otisky prstů, ale rovněž skeny duhovky. Mezi takto střežené budovy patří i některé školy, kde si žáci otvírají dveře právě pomocí otisků prstů.
- Nic neobvyklého nejsou ani osobní automobily, které lze odemknout kromě klíčů i hlasovým povelům. Na ně potom reagují i některé prvky ovládání, jako je rádio, handsfree apod.

Obecně lze biometrické prvky využít k zabezpečení ať už majetku či osobních informací, tak i k řízení přístupu např. na pracoviště či jakýchkoli více či méně přísně střežených míst.

2.3.3 Kriminalistika

Nedílnou součástí boje proti kriminalitě téměř ve všech státech světa jsou databáze biometrických znaků především jedinců, kteří už trestnou činnost provedli. Už v předešlé kapitole je uvedeno, že některé znaky jsou jedincům odebírány automaticky při výdeji průkazů, takže už není problém ani identifikovat jedince, který zatím žádnou trestnou činnost nespáchal, ale má novější typ dokladu. K tomuto účelu jsou využívány především otisky prstů a tvary obličeje, ale není nutné se omezovat pouze na tyto dvě metody.

Pro analýzu DNA je celosvětově používán systém CODIS (*Combined DNA Index System*), který zahrnuje jak samotné databáze, tak i software, který s nimi dokáže pracovat. Podle statistik FBI (*Federal Bureau of Investigation*) bylo jen v americkém NDIS (*National DNA Index* – část CODISu) za březen 2016 provedeno 325 615 vyhledání při celkovém počtu přesahujícím patnáct milionů genetických profilů [12].

Největší světovou kriminalistickou databází obsahuje systém IAFIS (*Integrated Automated Fingerprint Identification System*), který byl v září 2014 nahrazen systémem NGI (*Next Generation Identification system*). Oba jsou spravovány americkým FBI, který stojí i za jejich vznikem. IAFIS byl poprvé spuštěn v roce 1999 a zahrnuje databázi biometrických záznamů v elektronické podobě, prostředky pro jeho porovnávání a případnou výměnu dat. Systém obsahuje přes sto milionů záznamů, mezi které nepatří jen otisky prstů, ale i další údaje jako například barva vlasů, očí, výška, tetování

apod. Nevyskytují se zde jen údaje o kriminální činnosti, ale rovněž informace o armádních či vládních zaměstnancích USA. Přibližná doba odpovědi se pohybuje průměrně od půl hodiny do dvou hodin [13].

V České republice existuje Národní databáze DNA, která je provozována od roku 2002. Zde jsou zaznamenány DNA profily získané při trestním stíhání, nálezích těl apod., avšak jejich zavedení do databáze je do jisté míry omezeno. Ve specifických případech jsou vzorky odebírány pouze za účelem porovnání v systému CODIS, ale nejsou zařazeny do Národní databáze [14].

2.4 Vlastnosti biometrických prvků

Lidské rysy, které jsou z biometrického hlediska vhodné pro zkoumání, musí mít tyto základní vlastnosti:

- univerzálnost – musí existovat u všech osob
- unikátnost – musí být unikátní u všech osob, aby bylo možné jejich odlišení s velkou mírou přesnosti
- stálost – každá fyzická osoba si v průběhu času (přirozené stárnutí) prvek uchovává neměnný

Další vlastnosti se dále spíše týkají získání, zpracování a uchování biometrických dat a patří mezi ně:

- měřitelnost – prvek musí být měřitelný a schopen vyjádřitelnosti v jednotkách
- přijatelnost (akceptace) – ochota lidí poskytnout daný prvek k měření (s tímto problémem se setkávají hlavně metody sejmutí snímku oční sítnice za použití fundus kamery)
- uchovatelnost – je nutné umět charakteristiky daných prvků uchovat bez ztráty kvality
- exkluzivita – metoda by měla taková, která sama o sobě postačuje, a není tudíž potřeba žádné podpůrné [3]
- spolehlivost – s jakou pravděpodobností dojde k (ne)správnému porovnání
- výkonnost – jak rychle se dokáže daný faktor porovnat a vyhodnotit výsledky

Tento výčet ovšem nezahrnuje všechny vlastnosti, kterých mohou prvky nabývat, pouze udává přehled některých z nich. V mnoha zdrojích je možné nalézt stejné lišící se pouze v pojmenování. Rovněž mohou být pojaty z dalších hledisek – např. finančního.

Zcela odlišné je pak rozdělení podle toho, zda se jedná o prvky fyziologické, nebo behaviorální.

Mezi prvky fyzické se řadí:

- *otisky prstů* – zkoumány jsou vzory papilárních linií na konečcích prstů. Místa, kde linie končí nebo se rozdvíhají, jsou označena a je z nich vytvořena biometrická šablona. Otisky prstů stále platí jako nejvíce rozšířené biometrické prvky ve forenzních i komerčních využitích.

- *DNA* – ve forezních vědách, zejména pak kriminologii, je hojně využíváno porovnávání DNA. Porovnávání proto, že na základě DNA nelze určit identitu, ale pouze porovnat, zda jsou dva vzorky totožné. Zkratka značí kyselinu deoxyribonukleovou, jejíž struktura je opět pro každého jedince unikátní. Tato metoda není pro použití v komerčních aplikacích vhodná, protože její analýza trvá poměrně dlouho a není plně automatizovaná [5].
- *tvar, termosnímek obličeje* – jedná se o druhý nejčastěji pozorovaný biometrický prvek. Snímání ani detekování není invazivní, naopak je bezkontaktní. Automatizovaná detekce a rozpoznávání má oproti DNA široké využití v komerčních aplikacích jako ochrana na letištích, střežení hranic apod. Nové systémy pro detekci obličeje jsou tak vyspělé, že je nelze oklamat ani brýlemi či mimikou a obecně jakoukoli změnou vizáže. Pro zpracování snímku tváře může být využito různých metod – neuronových sítí, optických toků, grafů aj.
- *geometrie, krevní řečiště ruky* – mezi geometrii ruky se řadí délka prstů, šířka dlaně, šířka nebo rozpětí prstů, 3D geometrie. Protože existuje více měřitelných prvků, lze najít i veliké množství používaných metod. V případě krevního řečiště může jít buďto o její spodní část – tedy řečiště dlaně, nebo naopak hřbetu ruky. I přesto, že metod a prvků je hodně, není tato metoda vhodná všude. Problémem může být změna geometrie vlivem zranění, stárnutí nebo nemocí. Rovněž při porovnávání většího množství může dojít k chybám.
- *oční duhovka* – naopak oční duhovka se jeví jako spolehlivý a dosti využívaný prvek. Jedná se o na první pohled viditelnou barevnou část oka, lemující černou zornici. Snímání je neinvazivní, rychlé a jednoduché. Používány jsou systémy, kde se stačí déle zadívat na kameru, která udělá snímek oka, extrahuje duhovku a její rysy a následně porovná s databází. Porovnání je rychlé, protože i informace o rysech je malá. Nevýhodou je primárně snadné podvržení očními čočkami nebo fotografií.
- *oční sítnice* – podrobné informace o biometrii oční sítnice jsou v kapitole 4.
- *dentální rentgenové snímky, snímek nehtu, tvar ucha, podpis aj.*

Mezi behaviorální prvky (tedy dynamické) patří:

- *dynamika stisku kláves* – jedná se o způsob psaní na klávesnici počítače. Vhodný je zejména pro zabezpečení počítačová, tedy při přihlašování na různé účty atd.
- *obličejová mimika* – sem spadá hlavně odvětví zabývající se pohybem rtů. Zejména je potom spojováno s rozpoznáváním řeči. Mohou se zde rozlišovat dva přístupy – buďto je snímáno

vyřčení předem dohodnuté fráze, nebo se snímá komunikace při běžném hovoru. Na snímání jsou používány podobné přístroje jako ke snímání obličeje.

- *hlas* – pokud jde o rozpoznávání řeči, jedná se o velice obsáhlé odvětví biometrie, které lze rozdělit na několik podskupin podle toho, kterou částí se zabývají. Jedná se o rozpoznávání významu řeči, verifikaci mluvího, identifikaci mluvího a speciální rozpoznávání [5]. Každé z těchto odvětví zpracovává hlasové signály mluvího naprosto odlišným způsobem a také očekává jiné výsledky. Hlasové rozpoznávání má rovněž širokou škálu použití ať už za účelem ovládnutí elektronických zařízení, nebo pro řízení přístupu.
- *chůze* – pro každého jedince by měl být specifický i typ chůze a pohyby, které jsou při ní vykonávány. Tento typ porovnávání umožňuje vysokou vzdálenost od osoby, ale je ovlivněn vysokým množstvím proměnlivých faktorů, jako je obuv a oblečení nebo aktuální zdravotní stav.

Používané prvky se liší hlavně ve výše zmíněných vlastnostech. Následující tabulka 2.a udává přehled vybraných vlastností a jejich hodnoty rovněž pouze u vybraných prvků.

	univerzálnost	unikátnost	stálost	výkonnost	akceptace	odolnost
obličej	vysoká	nízká	průměrná	nízká	vysoká	nízká
otisk prstu	průměrná	vysoká	vysoká	vysoká	průměrná	vysoká
geom. ruky	průměrná	průměrná	průměrná	průměrná	průměrná	průměrná
duhovka oka	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	nízká	vysoká
sítnice oka	vysoká	vysoká	průměrná	vysoká	nízká	vysoká
podpis	nízká	nízká	nízká	nízká	vysoká	nízká
hlas	průměrná	nízká	nízká	nízká	vysoká	nízká

Tabulka 2.a – porovnání biometrických prvků z hlediska vybraných vlastností [5]

V tabulce si lze všimnout, že mnohem lepší vlastnosti vykazují prvky, které jsou člověkem běžně neovlivnitelné – tedy duhovka, sítnice a otisk prstu. Ovšem tyto metody se neseťkávají s takovou oblibou u uživatelů. Především potom u sítnice a duhovky je míra akceptace nízká i přesto, že se jeví jako velice vhodné pro porovnávání. Oproti tomu prvky, které jsou proměnné, jako je podpis, tvar obličeje a hlas, jsou uživatelsky mnohem přívětivější, ale právě kvůli proměnnosti mnohem méně vhodné.

Nelze ovšem opomenout ještě jedno velice důležité hledisko, a to jsou finanční náklady na pořízení systému. Mezi systémy s nejnižšími náklady patří ty pro rozpoznávání otisků prstů, obličejů, podpisu a hlasu. O něco dražší jsou systémy na zpracování geometrie ruky a nejdražší pak pro oční duhovku a sítnici [5].

Z těchto poznatků tedy plyne, že nelze určit prvek, který je ve všech směrech nejvhodnější, ale při volbě systému je nutné zvážit kromě finančních možností také to, co přesně se od systému očekává – tedy hlavně jak spolehlivý systém je potřeba a také množství vzorků, které bude zpracovávat.

2.5 Biometrický systém

Biometrický systém je technologický systém, který používá informace o biologickém organismu k identifikaci daného organismu. Systém se při tom spoléhá na specifická a unikátní data.

Typický biometrický systém je celek, který se skládá z pěti základních částí. Patří sem:

- *snímač* – neboli senzor, který slouží k získávání a shromažďování dat a jejich převodu do digitální podoby
- *algoritmy pro zpracovávání signálů* – slouží k zajišťování kvality a dále rozvíjejí a zpracovávají biometrický vzor získaný ze snímače
- *databáze* – slouží jako úložiště pro data a biometrické vzory, které se budou porovnávat
- *vyhledávací algoritmy* – pomocí nich je přímo porovnáván např. nový prvek s již existujícím v databázi
- *rozhodovací algoritmy (proces)* – může být buďto čistě automatizovaný, nebo i se zásahem člověka. Na základě výsledků vyhledávacích algoritmů podává výsledky (pouze na úrovni systému) [4]

Biometrické systémy jsou charakterizovány především vlastnostmi, které definují míru správné reakce systému na předložený vzorek dat (udávají tedy reálnou výkonnost daného systému). Mezi tyto vlastnosti patří:

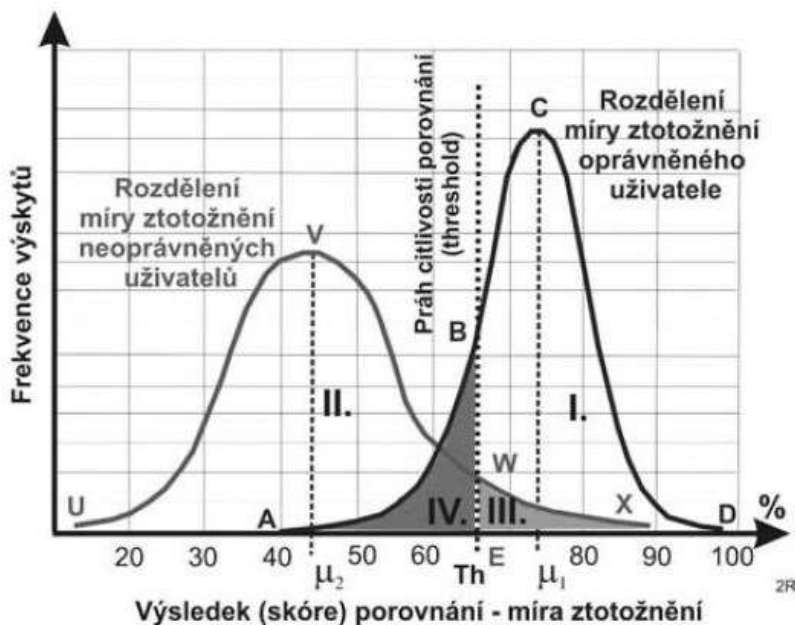
- *senzitivita* – pravděpodobnost přijetí správné osoby
- *specifita* – pravděpodobnost odmítnutí špatné osoby

V praxi jsou považovány především míry nežádoucích jevů:

- *pravděpodobnost chybného odmítnutí osoby s autorizací* – označováno jako False Rejection Rate (FRR)
- *pravděpodobnost chybného přijetí neoprávněné osoby* – též False Acceptance Rate (FAR)

Vzhledem k tomu, že nelze tyto hodnoty přesně matematicky spočítat, používá se pro znázornění graf. Jeden z takovýchto grafů je znázorněn na obrázku 2.1.

Ovšem nejdříve je nutné definovat ještě jednu důležitou vlastnost, a tou je tzv. práh citlivosti. Na obrázku je vidět, že nastavení prahu výrazně ovlivňuje požadované vlastnosti, a tudíž musí být nastaven pro daný systém co nejvhodněji. Pro vzorky, které mají míru ztotožnění nižší než je práh, dojde k zamítnutí a naopak pro vyšší míru dojde k přijetí. Práh rovněž rozděluje systém na čtyři části, které značí možné stavy systému po vyhodnocení daného vzorku.



Obrázek 2.1 – metriky biometrických systémů

Popis jednotlivých segmentů označených římskými číslicemi:

- I. – pravdivě pozitivní (korektní chování), neboli správná akceptace oprávněného uživatele
- II. – pravdivě negativní (korektní chování), neboli správné odmítnutí neoprávněného uživatele
- III. – nepravdivě pozitivní (nekorektní chování), neboli špatné přijetí neoprávněného uživatele
- IV. – nepravdivě negativní (nekorektní chování), neboli špatné odmítnutí oprávněného uživatele

Výsledek porovnávání ovlivňuje také to, zda se snažíme najít shodu pouze u jednoho biometrického prvku, nebo je k porovnávání určeno i více prvků najednou. Takto jsou systémy rozdělovány na unimodální (jeden prvek) a multimodální (více prvků) systémy.

2.6 Vybrané pojmy z oblasti biometrie

Jako s každou vědou, tak i s biometrií jsou spojeny pojmy, které nepatří mezi obecně známé, ale jejich význam je nutné správně pochopit. Z toho důvodu budou v následujících kapitolách některé z nich vysvětleny.

2.6.1 Identifikace

Samotné moduly, které zajišťují identifikaci, nespádají přímo do oblasti biometrických systémů. Jejich úkolem je určit, zda nově získaný prvek vykazuje shodu s nějakým prvkem, který se již v databázi, která je určená k porovnání, nachází. Porovnává tedy stylem 1:n, kde n je celkový počet prvků databáze. Identifikační systémy jsou nejčastěji používány v kriminalistice k porovnávání získané DNA, případně otisku prstu.

2.6.2 Verifikace

Verifikace se proti identifikaci snaží porovnat stylem 1:1. Porovnává tedy biometrický profil jednoho jedince oproti druhému. Vzhledem k tomu, že nemusí prohledávat mnohdy obsáhlé databáze, bývají výsledky verifikace k dispozici mnohem dříve a za spotřebování menšího množství výpočetních zdrojů.

2.6.3 Vnitrotřídní vs. mezitřídní variabilita

Pojem variabilita značí podobnost mezi jednotlivými prvky. Například pokud se jedná o otisky prstů, jsou si na první pohled dosti podobné, a to i v případě, že se jedná o otisky jinak zcela odlišné – od jiných uživatelů, je použit jiný prst atd. Pokud se jedná o otisky různé, tak ty potom značí mezitřídní variabilitu. Nemusí se však jednat pouze o otisky, může jít také o snímky obličeje, nejčastěji jednovaječných dvojčat. Systém musí být schopen odlišit i na první pohled neviditelné rozdíly, což v praxi není úplně jednoduché.

Naproti tomu vnitrotřídní variabilita představuje podobnost v rámci jednoho vzorku – dva různé otisky jednoho a téhož prstu nebo obličej jednoho uživatele při odlišné mimice. Jen s velice malou pravděpodobností se totiž stane, že bude sejmut otisk prstu naprosto totožně, ba naopak bude spíše vypadat na první pohled úplně jinak, i když po zpracování by měly vyjít shodné výsledky.

2.6.4 Unimodální vs. multimodální systémy

Z pojmu „systémy“ je zřejmé, že se jedná přímo o druhy celých identifikačních celků. Rozdíl mezi nimi spočívá v počtu biometrických prvků, které pro porovnávání používají. V případě unimodálních systémů je k porovnávání využito pouze jednoho biometrického prvku. Z finančního hlediska se většinou jedná o systémy nižší cenové kategorie, ale i nižšího stupně zabezpečení. Oproti tomu multimodální systémy využívají kombinaci dvou a více prvků. Příkladem může být rozpoznávání obličeje v kombinaci s dynamikou pohybu rtů. Kvůli tomu, že potřebují porovnávat více prvků, jde o systémy rozsáhlejší, složitější a také většinou dražší. Přinášejí ale také některé výhody. Falsifikace více znaků je mnohem náročnější než jen jednoho, tudíž se stávají více odolné, a tak i bezpečnější. Porovnávání více znaků rovněž činí systém více spolehlivý, protože pravděpodobnost nesprávné identifikace se tímto rapidně snižuje.

2.6.5 Biometrická šablona

Pro správné pochopení tohoto výrazu je nutné si uvést alespoň ve zkratce celý proces získávání biometrického vzorku, jeho zpracování a způsob uložení (ten je u každého prvku značně odlišný).

Celý proces zachycuje schéma na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 – proces zpracování vzorku

Proces zpracování určitého biometrického prvku tedy probíhá tak, že se pomocí snímacího zařízení získá daný vzorek (otisk prstu, snímek duhovky atd.), který se v případě nutnosti převede do digitalizované formy. Pomocí algoritmů, které jsou pro každý prvek speciální, se extrahují biometrické charakteristiky, v některých zdrojích nazývané jako markanty, což jsou charakteristiky využitelné pro identifikaci nebo verifikaci [3]. Výsledkem takového zpracování je získání šablony – uložitelného souboru charakteristik potřebných pro porovnávání.

Při samotném porovnávání dochází k porovnání již uložené šablony s nově vzniklým vzorkem. Na základě výsledků porovnání se určí, zda si vzory odpovídají (dojde k přijetí), nebo ne (dojde k odmítnutí).

2.6.6 Určení živosti

Jedním z problémů při získávání vzorku i identifikaci uživatele při žádosti o přístup je tzv. určení živosti. Jde o snahu vyloučit možnosti falsifikace takovým způsobem, že by byla místo reálného prvku použita fotografie, gumový otisk apod. Některé systémy se již dnes snaží živost kontrolovat, avšak stále existuje spousta systémů, které lze oklamat i těmi nejjednoduššími způsoby, jako jsou fotografie.

Živost oka se dá ověřit hned několika způsoby. První možností je za pomoci aktivní účasti subjektu – mrknutí na povel, pohyby, reakce na změnu světelných podmínek apod. Další možností jsou potom metody automatizované.

Sítnice je vzhledem k tomu, že se nachází uvnitř oka, těžce přístupnou. Její falsifikace by se tak stala velice náročným procesem sama o sobě [5].

2.7 Výhody

Důvodů, proč je biometrie stále hojněji využívána, je hned několik. Mezi ty hlavní patří to, že představuje jednoznačný a prakticky okamžitě dostupný nástroj pro rozeznávání jednotlivců. Šance, že dva odlišní jedinci budou mít stejné biometrické rysy, je téměř nulová [4].

Může být dále kombinována s jinými dostupnými technologiemi pro přesnější nebo jednoznačnější určení výsledků porovnávání mezi několika jedinci. Biometrické znaky navíc nemohou být zapomenuty na rozdíl od obyčejných hesel. Hesla a kódy PIN, které jsou nyní stále převažující, nejsou navíc úplně spolehlivé. Mnoho lidí si je volí tak, aby byly dobře zapamatovatelné, ale nedbají už na to, že mohou být lehce dohledatelné.

Právě to, že není nutné si nic pamatovat či nosit s sebou, a také to, že celý proces může být plně nebo částečně automatizován, činí biometrii vhodným nástupcem těchto technologií.

2.8 Nevýhody

Bohužel i použití biometrie k zabezpečení může mít svoje nezanedbatelné nevýhody. Tyto nevýhody mohou být pro každý prvek dosti odlišné.

Co se týče otisků prstů, nacházejí se všude, kde se pohybujeme, a na všem, čeho se dotýkáme. Není tudíž problém je sejmout a vytvořit kopii například do silikonu. Na trhu už však nejsou výjimkou snímače, které dokáží umělý otisk od reálného rozeznat.

Podobně jako na spoustě míst zanecháváme otisky prstů, stejně tak zanecháváme všude i svoji DNA v podobě zbytků kůže a vlasů, které jsou také nedílnou součástí každého jednotlivce. Další spíše behaviorální znaky, jako je řeč, gesta a mimika obličeje, mohou být zachyceny a nahrávány kamerami. Kvalitní kamerou či fotoaparátem lze získat i snímek oční duhovky.

Každý z neoprávněně získaných biometrických znaků jedince může být snadno zneužitelný, ale to není jediný důvod, proč je jejich neoprávněné získání problémem. Hlavním důvodem je to, že tyto znaky člověk dokáže jen stěží změnit, protože jejs doslova charakterizují, a to nejen z pohledu vědeckého.

Oproti tomu je také možné autorizaci zkomplikovat i nechtěně. Do této kategorie je možné zařadit různé trvalé nebo přechodné onemocnění či zranění, které představuje vzhledem ke svojí neovlivnitelnosti nezanedbatelný problém.

3 Anatomie lidského oka

Jak již bylo výše zmíněno, jednou z pro biometrii nejvhodnější částí lidského těla je oko. Oko jako smyslový orgán je komplexní a je možné ho rozdělit na více částí. První z nich je samotná oční koule, dále to jsou nervové dráhy, po kterých se přenášejí informace do mozku, a potom samotná část mozku, ve které jsou vjemy zpracovávány. Více o jeho anatomii a fyziologii je popsáno v následující kapitole.

3.1 Oko

Oko je párový orgán, který je vysoce citlivý na světlo. Pomocí něj jsou zachytávány vjemy, které jsou za pomoci mozku vnímány jako obrazy. Okem je člověk schopen zpracovávat až dvě třetiny vjemů [10].

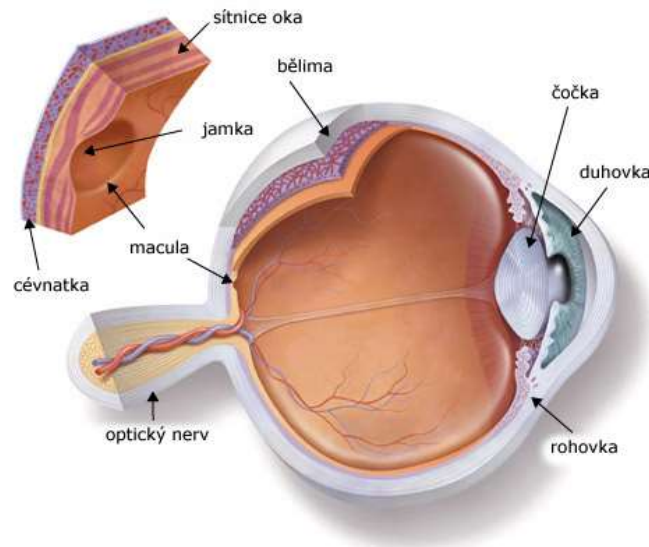
Většina částí lidského oka je soustředěna dovnitř oční koule. Oční koule je napojena přímo na mozek pomocí zrakového nervu [6]. Zrakový nerv je jediný z nervů, který je přímo viditelný (za pomoci oftalmoskopu).

Jednotlivé části oční koule jsou popsány níže a vizuálně znázorněny na obrázku 3.1.

- **Rohovka (*cornea*)** – hladká a průhledná část oka o šířce přibližně 1mm. Obsahuje spoustu nervových vláken (ale žádné cévy), a dala by se tedy zařadit mezi nejcitlivější tkáně vůbec. [6]
V zadní části oka potom přechází v bělimu.
- **Bělima (*sclera*)** – bílá, neprůhledná část o šířce od 0,5 do 1,5mm. Největší tloušťky nabývá v zadní části oka, kde se rovněž nachází otvor, kterým do oka vstupuje zrakový nerv. Společně s rohovkou v přední části udržují tvar oka.
- **Duhovka (*iris*)** – spolu se zornicí tvoří rozdělení přední a zadní oční komory a vzniká oddělením od bělimy. Jedná se o část oka, kterou vidíme jako barevnou a pomocí níž se odlišuje barva očí. Obsahuje v sobě totiž pigment a právě jeho množství udává barvu oka. V jejím středu se nachází zornice.
- **Zornice (*pupila*)** – je otvor kruhovitěho tvaru nacházející se ve středu duhovky. Pomocí něj vniká do oka světlo. Zornice řídí přístup světla do oka tím, že v sobě obsahuje svaly, kterými je buďto smršťována, nebo rozpínána – svěrač a rozvěrač [6].
- **Čočka (*lens crystallina*)** – je zavěšena na tzv. řasnatém tělísku, které pomocí svalů dokáže s čočkou hýbat. Tímto pohybem dochází k jejímu vyklenutí/zploštění, a tím ovlivňuje její

optickou mohutnost. Změnou mohutnosti dochází ke změně indexu lomu, a tak k ostření.

- **Cévnatka (*chorioidea*)** – lemuje bělimu od místa, kde do oka vstupuje zrakový nerv, až do místa, kde postupně přechází v řasnaté tělísko, a slouží k výživě oka. Řasnaté tělísko udržuje čočku a pomocí hladkého ciliárního svalu ji smršťuje a roztahuje. V řasnatém tělísku se rovněž tvoří nitrooční tekutina [6].
- **Sítnice (*retina*)** – část, na které je přímo vytvářen obraz. Její činnost bude blíže popsána v kapitole 3.2.
- **Sklivec (*corpus vitreum*)** – tvoří výplň oka. Je to čirá, spíše rosolovitá hmota, která zajišťuje správný nitrooční tlak a napětí stěny oka. Rovněž poskytuje výživu tkáním uvnitř oka.



Obrázek 3.1 – průřez lidského oka

3.2 Sítnice

Sítnice je nejdůležitější částí oka sloužící pro vnímání světla a vidění. Obraz, který přichází do oka přes zornici a čočku, je tvořen a zpracováván právě na sítnici a až odtud je jako sada elektrických impulzů po nervových drahách zasílán do mozku. Pokud čočka nefunguje správně, obraz nedopadne na sítnici, ale v případě dalekozrakosti až za sítnici, v případě krátkozrakosti ještě před ní.

Na obrázku 4.2 lze vidět snímek sítnice pořízený tzv. fundus kamerou, jejíž princip je podrobněji vysvětlen v následující kapitole. Na snímku si lze kromě cév, které sítnicí procházejí, všimnout také dvou skvrn. Ta, která se nachází na pravé straně a jeví se jako světlá, se nazývá **slepá skvrna**. Je to místo, kterým do oka vstupují zrakové nervy.

Tmavá skvrna, která se na snímku sítnice nachází uprostřed, se nazývá **žlutá skvrna**. Jamce ve středu žluté skvrny se pak říká **fovea** a jedná se o místo nejostřejšího vidění. Nejostřejšího proto, že jsou v něm hustě nahromaděny buňky, které zajišťují vidění – fotoreceptory.

3.2.1 Fotoreceptory

Fotoreceptory obecně jsou buňky, které reagují na světlo. Pokud dojde k jejich podráždění, začne proces vidění.

Fotoreceptory, které se na sítnici nacházejí, se dají rozdělit do dvou skupin podle toho, jaký druh vidění zajišťují. První z nich jsou tzv. **čípky**, které zajišťují barevné vidění za denního světla. V oku se jich nachází odhadem asi sedm milionů a jejich největší koncentrace je právě na žluté skvrně [6].

Druhou skupinou receptorů jsou tzv. **tyčinky**. Jejich počet je oproti čípkům mnohem větší – cca. 120 milionů. Slouží k vidění za šera a v noci a zajišťují černobílé vnímání [10].

3.3 Nemoci sítnice

Stejně jako veškeré části lidského těla i sítnice může být ovlivněna poškozením ať už způsobeného zraněním, nebo nemocí. V následující části jsou zmíněny jen vybrané nemoci, protože jich je poměrně vysoké množství.

3.3.1 Makulární degenerace

Toto onemocnění je spojováno hlavně s postupujícím věkem. Způsobuje poškození žluté skvrny, které má za následek postupnou ztrátu ostrého vidění [7].

Projevuje se tak, že obrazy se pak jeví jako rozmazané a bez detailů. V některých případech se objevuje ve středu zorného pole černá (nebo rozmazaná) skvrna. Rovněž dochází ke zhoršení barevného vidění. Sice je způsobováno převážně věkem, ale vysoký vliv na něj mohou mít i negativní faktory, jako je kouření, obezita, špatné stravování, vysoký krevní tlak nebo v neposlední řadě genová výbava. Jedná se o onemocnění neléčitelné, jeho projevy mohou být pouze mírně zpomaleny. Sítnice poškozená tímto onemocněním je na obrázku 3.2.

3.3.2 Uzavření sítnicových žil a artérií

Přestože se jedná o dvě různé nemoci, jejich projevy a následky jsou stejné. V obou případech dochází buďto k okamžité, nebo postupné (v průběhu několika dní až týdnů) ztrátě zraku, která však není doprovázena žádnou bolestí [7].

V případě uzavření může dojít poměrně rychle (v řádu hodin) k trvalému a nenávratnému poškození, a to v důsledku nedostatečného prokrvení, krvácení a otoku. Rozdíl v závažnosti rovněž udává to, zda dojde k uzavření hlavní žíly (arterie), nebo některé z jejich větví. V případě uzavření větví

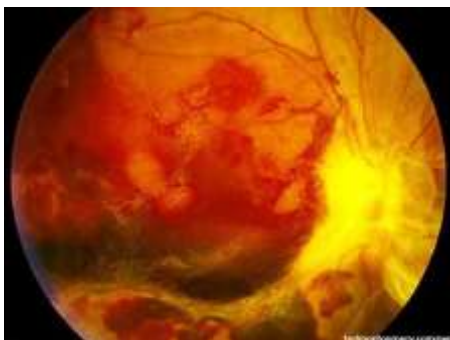
je dost vysoká šance, že pacient uvidí poměrně dobře, v opačném případě dochází i při správné a včasné léčbě k trvalé ztrátě zraku. Rozdíl mezi uzavřením větvové a hlavní žíly je ukázán na obrázcích 3.4 a 3.5.

3.3.3 Diabetická retinopatie

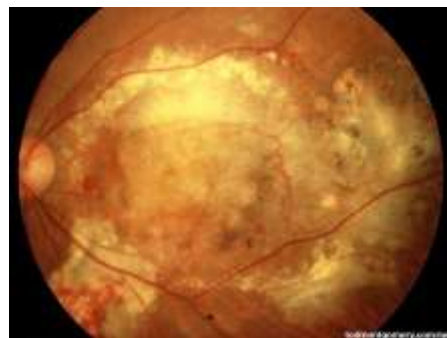
Vzniká v důsledku celkového poškození cév způsobeného cukrovkou (diabetes mellitus). Závažnost onemocnění závisí na tom, jak je kontrolována hladina cukru v krvi a velikost krevního tlaku u lidí, kteří tuto nemoc buďto už mají, nebo mají zvýšenou pravděpodobnost jejího výskytu [7].

V průběhu nemoci dochází k poškození cév, které potom mohou mít tendenci nadměrného růstu, ale vznikají už poškozené a na nesprávných místech. Pokud již k růstu nových cév dochází, jedná se o tzv. proliferativní diabetickou retinopatii, která přímo způsobuje ztrátu zraku. Mírnější formou je tzv. neproliferativní, kde se nové cévy prozatím netvoří [7].

Přes poškozené cévy prosakuje krev nebo tekutina, která se v oku shromažďuje a způsobuje skvrny a rozmazané vidění a v neposlední řadě celkový otok. Rovněž dochází k zjizvení cév (především nově rostoucích) a ke krevním sraženinám. Sraženiny mohou být dvojího druhu – měkké, nebo tvrdé. Diabetická retinopatie je nejčastější příčinou slepoty a je do určité míry léčitelná laserovým zásahem.



Obrázek 3.2 – makulární degenerace [15]



Obrázek 3.3 – proliferativní diabetická retinopatie [15]



Obrázek 3.4 – uzávěr větve sítnicové žíly [15]



Obrázek 3.5 – uzávěr hlavní sítnicové žíly [15]

Z dalších nemocí lze jmenovat sítnicové nádory, Retinitis Pigmentosa (dědičné onemocnění, při kterém dochází k ukládání pigmentu ve fotoreceptorech, a důsledku toho ke zhoršenému vidění končící slepotou) nebo odchlípení sítnice.

Na snímcích nemocných sítnic lze vidět, že zejména na obrázcích 3.3 a 3.4 je poškození tak veliké, že vytvoření biometrické šablony ani její porovnání není možné. Ve většině případů se navíc jedná o poškození trvalé.

4 Rozpoznávání pomocí oční sítnice

Historie identifikace pomocí oční sítnice je poměrně nedávnou záležitostí. S myšlenkou využití sítnice přišli v roce 1935 Dr. Carleton Simon a Dr. Isodore Goldstein při studiu očních nemocí [8]. Koncepty prvních zařízení se však objevily až mnohem později, v polovině sedmdesátých let, a první sériově vyráběná zařízení ještě o deset let později. Od té doby přišlo na trh několik zařízení, ale vzhledem k problematickosti tohoto odvětví jeho výzkum stále pokračuje.

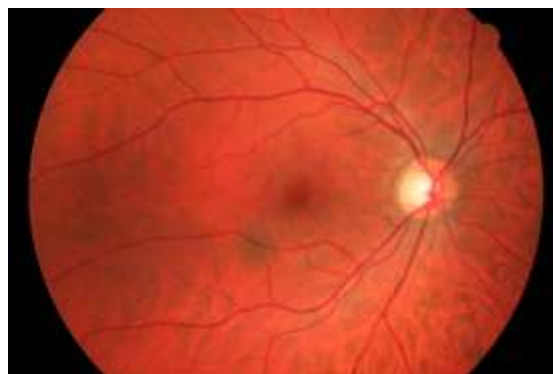
4.1 Fundus kamera

K získávání snímků slouží speciální zařízení, které dokáže snímat tzv. zadní část oka – zrakový nerv a sítnici. Jedná se o speciální mikroskop s připevněnou kamerou. Pomocí optiky uvnitř mikroskopu je možné ovládat světelné paprsky vnikající do oka (přisvětlující oční pozadí) a při správného natočení oka a nastavení kamery získat snímek určité části očního pozadí. Příklad fundus kamery je znázorněn na obrázku 4.1.

Použití této kamery je neinvazivní, a tedy nepoškozuje ani nijak nezasahuje do oka samotného. Její použití je ovšem značně nepohodlné a jedná se o poměrně zdoluhavý proces. U samotných uživatelů se neseťkává s oblibou kvůli tomu, že mohou mít pocit, že jim paprsek využívaný pro nasvícení může ublížit. Příklad snímku z kamery je ukázán na obrázku 4.2.



Obrázek 4.1 – fundus kamera



Obrázek 4.2 – snímek zachycený fundus kamerou (databáze HRF)

4.2 Databáze snímků sítnice

Pro lékařské i biometrické účely jsou na internetu volně dostupné komplexní databáze snímků, obsahující snímky zdravých i poškozených sítnic. I v programové části této práce byly využity snímky některých z nich. Zmiňováno je více databází z toho důvodu, že každá z nich má sadu poněkud odlišnou od ostatních, zejména v barvách, rozlišení a světelných podmínkách. Mezi ty více známé (všechny volně dostupné) databáze patří DiaRetDB, DRIONS, DRIVE, HRF a STARE. Pro prvotní testování byly rovněž použity vlastní snímky z fundus kamery, která je k dispozici ve školní laboratoři.

4.3 Reprezentace sítnice

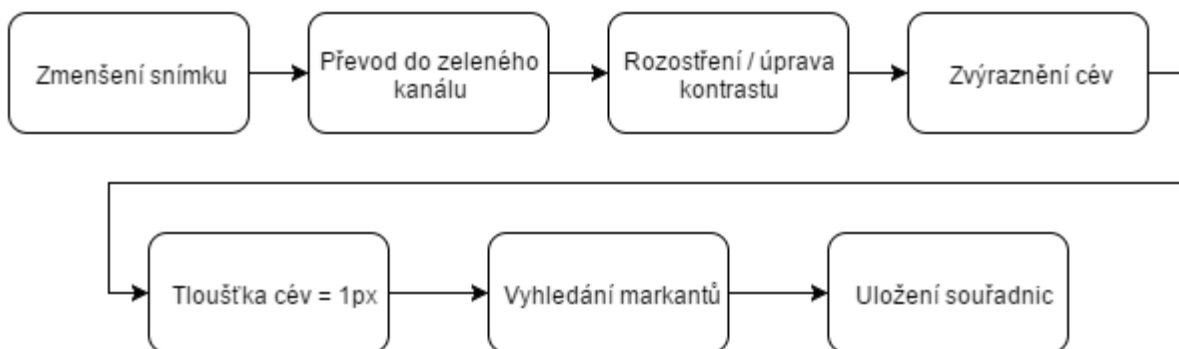
V kapitole 2.6.5 byl popsán proces získávání biometrické šablony, avšak pro každý z biometrických rysů může mít šablona odlišnou reprezentaci. Pro sítnici jsou využívány následující.

Nová reprezentace má velikost 48 bytů, ve kterých jsou zakódovány informace o kontrastu (který představuje 96 čísel, která jsou normalizována na rozsah $\langle -8,7 \rangle$) společně s časem. Oproti starší reprezentaci je větší, ale více efektivní [5].

Porovnávání dvou šablon se skládá z několika částí. Zaprvé je nutné zajistit, aby došlo k vzájemnému překrytí šablon. Poté je provedena jejich normalizace a teprve po ní může dojít k samotnému porovnání [5].

5 Struktura aplikace

Celá výsledná aplikace by se dala rozdělit do více částí, které sice nelze kvůli návaznosti zpracovávat nijak paralelně, ale tvoří určité logické celky. Návrh rozdělení je zobrazen na diagramu 5.1.



Obrázek 5.1 – rozdělení výsledného programu do více logických celků

Diagram popisuje činnost již spuštěného programu se správně zadanými parametry. Tyto parametry je vhodné zadávat programu ručně. Jednotlivé snímky jsou na první pohled dosti odlišné, a to nejen snímky pocházející z různých databází, ale i v rámci jedné databáze. Proto je velice obtížné všechny části provést plně automatizovaně. Rovněž postupy ve zdrojích, které jsem při této práci využívala, byly ve většině případů testovány pouze na malém množství vybraných databází.

Při řešení programové části byla použita grafická knihovna OpenCV ve verzi 3.0.0, která je volně dostupná pro akademické komerční užití. Jako programovací jazyk jsem zvolila C/C++, který je knihovnou podporován. Kromě něj jsou podporovány také jazyky Python, Java a většina běžných operačních systémů [21].

5.1 Předzpracování snímku fundus kamery

Před vlastním procesem vyhledávání rysů sítnice je nutné vstupní obraz upravit tak, aby vyhledávání bylo jednoznačné a nebyly jako potenciální body větvení identifikovány jiné části jako například změna světelných podmínek apod. Následující podkapitoly vysvětlují potřebné úpravy včetně jejich teoretických základů.

5.1.1 Velikost a převod do zeleného kanálu

Snímky z databázi jsou v některých případech rozměrově příliš velké na to, aby byly vhodné k dalšímu zpracování bez patřičných úprav. Největší rozlišení mají snímky z kolekce vytvořené ve školní laboratoři a DiaRetDB.

Přílišná velikost snímků způsobuje to, že v dalším zpracování jsou určitá místa, která představují pouze jakékoli přirozené útvary nebo změny světelných podmínek, vyhodnocena jako část cévy. Při patřičném zmenšení velikosti a stupni rozostření lze tomuto jevu předejít. Velikost snímku, která je v programu používána, se pohybuje kolem 800 x 600px (záleží na rozměru původního obrazu, nesmí dojít k deformaci změnou poměru stran). Je ovšem možné zmenšení velikosti vynechat.

Dalším krokem je upravení snímku tak, aby byl co nejvíce znatelný rozdíl mezi cévami sítnice a zbytkem obrazu. Lépe než v barevné podobě je lze vidět v černobílé, ale nejvíce kontrastní je zelený kanál. Z tohoto důvodu se dále zpracovává pouze tento kanál.

5.1.2 Úprava kontrastu

I přesto, že je využit nejvýraznější kanál, zůstávají světelné podmínky v různých částech obrazu nevyrovnané. Nejvíce světla je ve středu obrazu a kolem slepé skvrny, oproti tomu okraje jsou již dosti tmavé a cévy v nich bez úprav nejsou rozpoznatelné. Z toho důvodu je nutné zvýšit kontrast tak, aby byly i cévy kolem okrajů detekovatelné.

Při volbě metody úpravy kontrastu jsem uvažovala nad dvěma možnostmi. První z nich byla **ekvalizace histogramu**. Světelný histogram představuje frekvenci výskytu hodnot intenzit v celém obrazu. Tyto hodnoty bez vnějších úprav nepokrývají rovnoměrně celý možný rozsah intenzit, ale jsou při některých hodnotách mnohem vyšší [20]. Ekvalizace histogramu je proces, který se snaží zmírnit tyto rozdíly v zastoupení hodnot. Cílem je tyto hodnoty upravit tak, aby bylo pokrytí co nejrovnoměrnější v celém možném rozsahu, čímž dojde ke změně světelných podmínek obrazu. Vliv této úpravy na snímky sítnic je takový, že dojde k zvýraznění především malých cév, které byly v původním snímku špatně viditelné. Rovněž se zvýší kontrast celého obrazu, takže i ostatní cévy jsou více rozpoznatelné.

Druhou variantou byla implementace algoritmu pro **lokální zvýšení kontrastu** (angl. *local contrast enhancement*). Při tomto postupu je použit IHS (*Intensity, Hue, Saturation*) barevný model,

který je z běžně používaného RGB snadno získatelný. Pro samotný výpočet je dále využita pouze intenzita společně s jejím průměrem a odchylkou. Výpočet probíhá tak, že je celý obraz rozdělen na čtverce stejné velikosti a změna kontrastu pixelu se počítá na základě intenzit celého obrazu a čtverce kolem daného pixelu. Přesný matematický popis je uveden v [11].

Po zvážení jsem zvolila první zmíněnou metodu, ekvalizaci histogramu. Výhodou této metody je, že je snadná a rychlá. Rovněž je podporovaná přímo zvolenou knihovnou, tudíž se dá předpokládat větší optimalizace a menší výpočetní náročnost než ta, kterou by měla druhá varianta.

Nevýhodou ovšem je (ostatně jako u většiny metod pro zvýšení kontrastu), že v případě snímku sítnice nezvýrazní jen cévy, ale i tzv. šum. Šumem se rozumí prvky obrazu, které jsou nežádoucí a představují nedokonalosti a chyby.

5.1.3 Gaussovo rozostření

Jako prevence nežádoucích artefaktů je použit filtr určený k vyhlazení a rozmazání obrazu, tzv. Gaussovo rozostření. Při tomto filtru se k určení nové barvy středového pixelu používá vážený průměr pixelů z jeho okolí spočítaný pomocí Gaussova filtru [22]. Proces výpočtu je tedy pro každý z nich ještě náročnější o to, že je potřebné spočítat váhy jednotlivých pixelů matice o rozměru okolí, a až na jejich základě hodnotu pixelu požadovaného.

Výhoda této metody tkví v tom, že do obrazu promítne i bližší vztah těsně sousedních pixelů oproti vzdálenějším, tudíž ve výsledném obrazu zůstanou více zachovány souvislosti tvarů.

Také zde platí přímá úměra mezi velikostí okolí a rozostřením (čím více sousedních pixelů se bere v potaz, tím znatelnější je rozostření).

Funkce realizující Gaussovo rozostření tak, jak je výše popsáno, je dostupná jako knihovní funkce `GaussianBlur()`, která vyžaduje kromě vstupního a výstupního obrazu také právě velikost okolí. Nebyla tedy nutná vlastní implementace.

5.1.4 Segmentace obrazu

Segmentací obrazu se rozumí proces jeho rozdělení na určité logické celky, které spolu souvisí. Příkladem může být oddělení toho, co je pro nás důležité, od nepodstatného pozadí. Z toho plyne, že segmentace je jednou z nejdůležitějších částí v předzpracování obrazu.

Přístupů k segmentaci je mnoho. Blíže vysvětlen však bude pouze jeden z nich, a to metoda prahování.

Prahování (angl. *thresholding*) patří mezi metody statistické. Ty určují výslednou hodnotu pixelu pouze na základě jeho aktuální hodnoty, případně okolí. Neberou tedy v potaz žádnou logickou stavbu

obrazu. Podstatou těchto metod je určení hodnoty udávající barvu na základě matematického porovnání s předem známým prahem. Hodnota prahu může být počítána z histogramu obrazu, hodnotou mediánu, ale i na pevně zvolená uživatelem [22].

Při volbě algoritmu prahování je nutné uvažovat možné světelné podmínky obrazu, protože jejich případný rozdíl neberou všechny algoritmy v potaz. Nejjednodušším způsobem je určení globálního prahu pro celý obraz. Celé porovnání pak probíhá pro každý pixel obrazu podle vzorce:

$$S_{\text{image}}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{if } D(x, y) \leq T(x, y) \\ 1, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

přičemž: $S_{\text{image}}(x, y)$ značí výslednou hodnotu pixelu na souřadnicích x, y

$D(x, y)$ značí aktuálně spočítanou hodnotu pixelu

$T(x, y)$ značí hodnotu prahu pro daný pixel (v tomto případě bude shodná pro všechny pixely)
hodnota pixelu 1 představuje maximální možnou hodnotu (tedy 255).

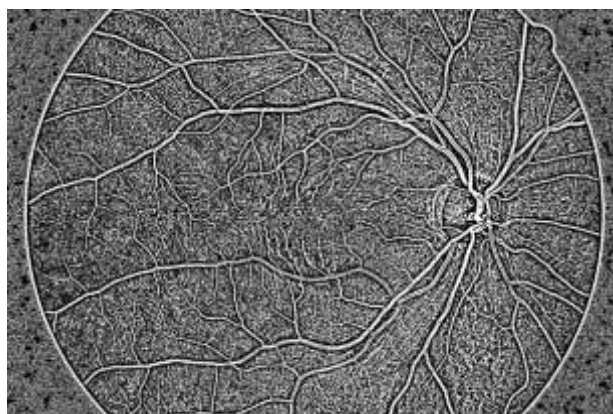
Kvůli její nepřizpůsobivosti tato metoda patří mezi ty, které jsou nevhodné pro obrazy s odlišnými světelnými podmínkami.

Pro zpracování obrazů sítnice je vhodná metoda **adaptivního prahování** (angl. *adaptive thresholding*). V ní je počítána hodnota prahu pro každý pixel zvlášť (tedy $T(x, y)$ ve vzorci bude v každém případě odlišné) na základě hodnot pixelů z jeho okolí. Podle způsobu výpočtu prahu z okolí lze tuto metodu dále rozdělit.

Knihovna OpenCV, která je v programu použita, podporuje dva způsoby výpočtu prahu. První z nich je definovaný konstantou `ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C` a počítá práh jako průměr hodnot pixelů v okolí. Rozměry okolí jsou předávány jako parametry algoritmu pomocí hodnoty `blockSize`. Okolí pak má velikost `blockSize` x `blockSize`. Tato metoda ovšem při testování vykazovala menší úspěšnost, proto není dále používána.

Druhý způsob výpočtu je definován konstantou `ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C` a při testování vykazoval lepší výsledky. Způsob výpočtu prahu je komplikovanější než u předchozího způsobu. Počítá se jako vážená suma okolí, kde váhy jsou počítány na základě Gaussova okna. Okolí při výpočtu je definované stejně jako v prvním případě.

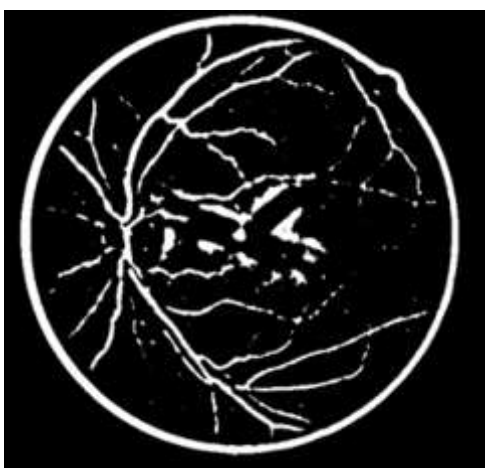
Při obou způsobech je možné zadat pevnou konstantu c , která se bude od vypočítané hodnoty prahu odečítat. Hodnota této konstanty má zásadní vliv na šum výsledného obrazu. Příklad nevhodně zvolené konstanty, a v důsledku toho silně zašuměného obrazu, je na obrázku 5.2. Nejlepší výsledky při testování ukazovaly snímky s $c=2$.



Obrázek 5.2 – konstanta $c=1$, velikost snímku 3504 x 2336px

Již několikrát bylo v předešlém textu zmíněno okolí počítaného pixelu. Hodnota tohoto okolí má na výsledek největší vliv. Čím větší počet okolních pixelů bude brán v úvahu, tím více se do obrazu zanáší jeho celková souvislost. V případě snímků sítnice to znamená, že při správně zvoleném dostatečně velkém okolí po převodu obrazu zůstanou zvýrazněny pouze navazující cévy, nespojitě fragmenty a šum budou zanedbány. Pokud však bude bráno v potaz až příliš velké okolí, menší cévy se ztratí vlivem toho, že v jejich sousedství je cév málo, a převáží tak pozadí. Rovněž u velkých cév dochází ke ztrátě návaznosti. Také platí, že čím vyšší okolí je ve výpočtu uvažováno, tím vyšší je výpočetní náročnost programu.

Potřebná ideální velikost okolí má také souvislost s rozlišením obrazu. Pokud je obraz příliš velký, je potřeba pro odpovídající převod zvolit mnohem rozsáhlejší okolí, než vyžaduje obraz s nižší kvalitou. Porovnání vlivu velikosti obrazu na potřebnou velikost uvažovaného okolí je znázorněno na obrázcích 5.3 a 5.4. Na obrázku vlevo si lze všimnout, že při menším rozlišení i při výrazně nižším okolí dochází ke ztrátě návaznosti, a tím k jeho naprostému znehodnocení. Oproti tomu snímek vpravo s vyšším okolím stále ještě dokáže poměrně dobře určit i nejmenší cévy, i když už s jistými ztrátami v návaznosti. Aby došlo ke stejné deformaci obrazu vpravo, potřebná velikost okolí překračuje hodnotu 200.



Obrázek 5.3 – velikost snímku 800x533px, okolí 37x37px



Obrázek 5.4 – velikost snímku 3504 x 2336px, okolí 51x51px

5.2 Generování masky

Maska je používána k odlišení toho, co je v obraze důležité, od částí, které nejsou pro další zpracování tolik podstatné. Při zpracovávání snímků sítnice odpovídá maska přibližně černé části, která se nachází běžně kolem okrajů snímků. V některých databázích jsou přímo dostupné masky individuálně pro každý snímek. Vzhledem k tomu, že nejsou dostupné všude a jejich použití může ovlivnit další zpracovávání, rozhodla jsem se pro možnost jejich automatické tvorby.

Jako vstupní obraz pro generování masky je použit ten, který byl načten a není žádným způsobem upraven. Protože na každém snímku je odstín černé mírně odlišný, je jako vzorek barvy použita vždy ta z pixelu se souřadnicemi [0,0]. S mírnou tolerancí je pak tato barva používána při porovnávání – pokud má pixel tyto nebo nižší hodnoty, je nastaven jako černý. V opačném případě je barva nastavena na bílou. Dále už je maska pouze přidána k zpracovávanému obrazu.

Generování masky probíhá ve funkci `maskImage()` a její generování je možné vynechat a místo něj jako parametr programu přidat soubor s již hotovou maskou. Takto je tomu pro případ, že bude program testován na jiných databázích, které je mají k dispozici. Tento postup byl testován na těch snímcích, ke kterým byla maska dostupná za účelem porovnání funkčnosti. Výsledky byly ve většině případů shodné, případné odlišnosti byly minimální. V menším počtu případů dokonce ukazoval lepší výsledky než přiložená maska.

5.3 Skeletonizace obrazu

Pojmem skeletonizace rozumíme získávání kostry tvarů, které jsou v obrazu obsaženy a mají společný prvek, například barvu. V již segmentovaném obrazu se tedy jedná o ztenčení cév se společnou bílou barvou na tloušťku přesně jednoho pixelu, přičemž nesmí dojít k jakékoli ztrátě návaznosti linií.

Existuje mnoho možností, jakým způsobem skeletonizaci provést. Mezi jedny z nejznámějších algoritmů patří Zhang-Suen a Guo-Hall. Oba dva jsou programem podporovány a jsou převzaty z [16][17].

Princip fungování je u obou dost podobný. Pro výpočet toho, zda daný pixel zůstává, nebo může být smazán, používají jeho osmi-okolí.

První z nich, Zhang-Suen, využívá především počty přechodů $0 \rightarrow 1$ / $1 \rightarrow 0$, součet pixelů s hodnotou 1 v okolí a další. Přesná definice je uvedena v [18]. Jde o výpočet mírně jednodušší a rychlejší, ale nevrací tak přesné výsledky.

Algoritmus Guo-Hall z prvního vychází a jeho výpočet je mírně složitější za účelem dosažení přesnějších výsledků. Přesný výpočet podle tohoto postupu je uveden v [19].

Ačkoli jsou oba přístupy podobné a co se výsledků týče na první pohled těžce rozpoznatelné, pro další zpracování ukazoval lepší výsledky algoritmus Guo-Hall. Z tohoto důvodu je i přes vyšší časovou náročnost nastaven jako implicitní. Je ovšem možné za použití přepínače zvolit algoritmus Zhang-Suen.

5.4 Odstranění šumu

Už v části věnované úpravě kontrastu bylo zmíněno, že při úpravách dochází k zvýraznění šumu. Jeho jistá redukce je provedena pomocí rozostření, ale nedochází při ní k úplnému odstranění. Je proto nutné použít ještě další úpravy za účelem jeho co největšího odstranění. Protože jsem nikde nenašla žádný spolehlivý algoritmus, který by vyhovoval mým požadavkům, rozhodla jsem se použít vlastní.

Myšlenka vychází z předpokladu, že všechny cévy na sebe navazují a nikde nejsou rozděleny. Samotný algoritmus pak funguje na poměrně jednoduchém principu – rozdělí vstupní obraz (který je pouze černobílý) na menší čtverce různých velikostí. Pokud žádná céva čtverec neprotíná, všechny pixely uvnitř něj jsou označeny jako černé. Cílem je tedy odstranit převážně menší části šumu.

Program prochází každý pixel vstupního obrazu a zpracovává čtverec, který je definovaný tak, že aktuální prohledávaný pixel je jeho levým horním rohem a délka strany se cyklicky mění. Takovýto čtverec je prohledán funkcí `isWhiteInRect()`. Ta vrací `true`, pokud se v krajních pixelech čtverce nachází alespoň jeden bílý (tedy pokud jej něco protíná), `false` v opačném případě. Protínat by jej měla v ideálním případě pouze céva, ale nemusí tomu tak být vždycky.

Pokud je snímek sítnice takový, že cévy mohou vést až k jeho úplným krajům (především pak u spodního a vrchního okraje), tak se stává, že se i bílé pixely nacházejí na krajích. Potom funkce `isWhiteInRect()` vrátí `true` i v případě, že tam bude jen pár pixelů šumu a bez cévy. Jako prevence jsou proto před samotným začátkem zpracování všechny krajní pixely původního obrazu označeny jako černé. Samotná lokalizace bifurkací tímto postupem není nijak ovlivněna, a umožní se tak odstranění malých částí i při okrajích.

Za účelem větší efektivity jsou velikosti stran čtverců generovány cyklicky, přičemž nejmenší z nich má stranu délky 10px, největší 90px s krokem 15px. Tyto hodnoty byly určeny na základě experimentů. Protože pro každou velikost je nezbytné projít znovu celý vstupní obraz, bylo nutné zvolit kompromis mezi počtem průchodů a délkou zpracování. Čím více průchodů, tím více roste čas nutný ke zpracování.

Aby bylo možné tímto způsobem odstranit co největší množství šumu, je nezbytné procházet a generovat čtverce od všech pixelů. Na první pohled se může zdát, že je to zbytečné, ale není tomu tak. Protože cílem je odstranit co největší množství šumu, musí být brána v úvahu všechna možná posunutí, čehož je takto spolehlivě dosaženo.

Veškerou tuto funkčnost pokrývá funkce `reduceNoiseByRect()` za využití výše zmíněné `isWhiteInRect()`.

Příklad úpravy podle popsaného principu je ukázán na obrázcích 5.5 a 5.6. Na prvním z nich je snímek po ztenčení, který obsahuje značné množství šumu. Na druhém z nich je potom výsledek po zpracování tímto algoritmem. Je vidět výrazná redukce šumu – kromě cév se na snímku téměř žádné jiné artefakty nevyskytují.



Obrázek 5.5 – před odstraněním šumu



Obrázek 5.6 – po odstranění šumu

V mnoha zdrojích, které jsem při studiu využívala, je prováděno odstraňování šumu ještě před fází skeletonizace. Už při ní se tedy předpokládá, že se na obraze nacházejí jen cévy a další úpravy prakticky nejsou nutné.

V této práci je však pořadí opačné (první je provedena skeletonizace a až na základě výstupu dochází k redukci šumu). Na základě popisu uvedeného výše může být snáze pochopitelné, z jakého důvodu je tak prováděno – po ztenčení zabírá bílá plocha méně místa a jednotlivé části cév i šumu nejsou v tak těsné blízkosti, jako tomu je při zachování původní tloušťky. Proto je výrazně větší pravděpodobnost, že bude alespoň jedna z použitých velikostí čtverce dostatečně vyhovující a dokáže obsáhnout šum takovým způsobem, že nebude nic protínat a skutečně dojde k odstranění.

Ovšem i tento postup nefunguje stoprocentně. Kdybych chtěla dosáhnout stoprocentního odstranění šumu, bylo by nutné použít mnohem více velikostí čtverců, případně použití i jiného tvaru než právě čtverce. Při pohledu na některé z výstupů se jako další vhodný tvar jevil obdélník. Implementace tohoto postupu je jednoduchá – pouze by se přidaly další průchody s upravenými velikostmi. Při některém z testů byl tento postup dokonce i využit a prokazoval jisté zlepšení. Ovšem po porovnání zlepšení výsledků vs. zvýšení času, který byl potřebný pro zpracování jednoho snímku, jsem od tohoto postupu ustoupila. Při aktuálním nastavení průchodů se doba potřebná pro zpracování jednoho snímku pohybuje kolem 25s, přičemž nejvíce času zabírá právě odstranění šumu.

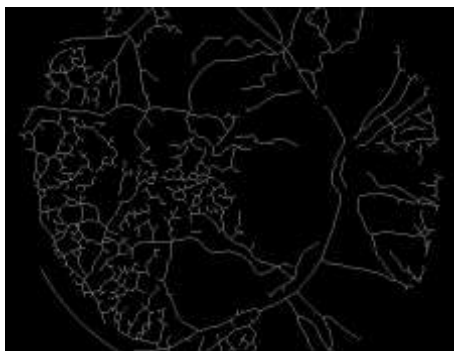
5.5 Lokalizace bifurkací

Pokud došlo ke správné úpravě obrazu, samotná lokalizace bifurkací je již poměrně rychlou záležitostí. Černobílý obraz je procházen pixel po pixelu a probíhá kontrola jeho osmi-okolí. Pokud se v okolí nacházejí tři nebo čtyři bílé pixely, je tento pixel označen jako bifurkace.

V případě menšího počtu sousedů se o žádné větvení jednat nebude – půjde o pozadí, konec linie, nebo linii samotnou. Ani jedno z nich není v tento moment podstatné.

Běžně nastává situace, kdy je okolních pixelů více. Tento stav je programem ignorován, protože se nemůže jednat o validní křížení či bifurkaci.

Jak ovšem bylo zmíněno v kapitole 5.4, není použitý algoritmus na odstraňování šumu stoprocentně spolehlivý a některé jeho části v obraze stále zůstávají. Ukázkou těchto artefaktů je obrázek 5.7. Je na něm rovněž vidět, že by v používaném postupu nebylo úspěšné ani použití jakéhokoli jiného tvaru než čtverce, protože žádný takový bychom nenašli.



Obrázek 5.7 – nežádoucí artefakty



Obrázek 5.8 – originál snímku

Na obrázku vpravo je vidět originální vstupní snímek. Na první pohled jde vidět, že snímek nemá dobré světelné podmínky. Oblast, která se vyznačuje vysokým šumem je tmavá, což má značný vliv na veškeré fáze zpracování. Rovněž je sítnice postižena onemocněním, které téměř znemožňuje správné určení bifurkací bez ohledu na to, o jakou nemoc se jedná.

Na obrázku 5.7 je rovněž možné si všimnout společného rysu v celé levé části – množství potencionálního větvení blízko u sebe s malou délkou čisté linie mezi nimi. A právě této malé délky je využito při poslední části programu.

5.5.1 Kontrola délky

Tento postup vychází z předpokladu, že na skutečných cévách nedochází ke křížení či bifurkacím tak často, jako tomu je v šumu – tedy cévy mají mnohem větší délku linie.

Z toho důvodu tedy ještě předtím, než je bod definitivně označen jako bifurkace nebo křížení, probíhá kontrola toho, jak daleko potencionální cévy vedou. Na daný pixel je několikrát zavolána funkce `getLength()`, která jako parametry přebírá dvojice souřadnice – aktuálního pixelu a jednoho ze sousedních. Je tedy volána přesně tolikrát, kolik je pixelů sousedních (tedy třikrát nebo čtyřikrát). Zadáním druhé souřadnice se určuje směr, kterým se má délka prohledávat. V tomto směru se dále pokračuje a získává se počet sousedních pixelů z osmi-okolí dalšího následujícího pixelu. V případě, že s ním sousedí právě dva, kterými jsou jeden předcházející a jeden následující, pokračuje dále. Pokud ovšem bude sousedních pixelů více, funkce končí. Návratovou hodnotou je počet pixelů, které byly v linii.

Tento počet je posléze kontrolován a porovnáván s předem danou minimální délkou, která je nastavená na 15px.

5.5.2 Grafické uživatelské rozhraní

Program je navržen takovým způsobem, že je uživatel schopen určité části zpracování ovlivnit nastavením parametrů, případně je úplně vynechat. Protože je těchto parametrů větší množství, rozhodla jsem se vytvořit grafické rozhraní, pomocí kterého je možné parametry programu před jeho spuštěním zadat.

Pro tvorbu tohoto rozhraní jsem zvolila framework Qt společně s programovacím jazykem C/C++ stejně jako zbytek aplikace. Používaná verze Qt je 4.8.6.

Možnosti okna jsou stejné jako možnosti nastavení pomocí příkazové řádky, které je podrobně popsáno v příloze B. Možnosti, které jsou programem používány jako výchozí, jsou předem označeny i v grafickém okně (s možnostmi jejich změny). Výsledný vzhled okna je znázorněn v příloze C.

5.6 Testování

Testování aplikace jsem rozdělila na dvě části. První z nich je kompletní funkčnost aplikace – tedy nakolik efektivní jsou postupy od začátku zpracování v takovém pořadí, v jakém byly popsány, až po vyhledávání bifurkací. Druhou částí potom je porovnání toho, jak efektivně pracují pouze algoritmy pro skeletonizaci a následné označení bifurkací.

Obě části jsou porovnávány se snímky manuálně segmentovaného řečiště. Přestože program byl vyvíjen a testován primárně na méně poškozených snímcích databáze DiaRet, bylo nutné zvolit pro finální určení spolehlivosti aplikace databázi jinou, protože DiaRet snímky manuálně segmentovaného řečiště neobsahuje. Mezi dostupné databáze obsahující potřebné snímky patří Aria, HRF, DRIVE a HEI-MED. Zvoleny nakonec byly databáze HRF a Aria, protože jejich snímky jsou ze všech, které byly na výběr nejvíce podobné právě DiaRet.

První byla testována skeletonizace a následné vyhledání bifurkací. Efektivita skeletonizačního algoritmu se ukázala jako vyhovující. Na všech testovacích snímcích (část „a“ databáze Aria) dokázala aplikace správně určit všechny body větvení.

Některé z bodů byly ovšem označeny jako křížení nesprávně. K tomu dochází v místech, kde je nedokonale segmentované řečiště – uprostřed bílé linie se nachází alespoň jeden černý pixel, nebo alespoň jeden bílý pixel vybočuje z linie. V ojedinělých případech nedojde k označení, ačkoli na první pohled zde křížení je. K tomu dochází z toho důvodu, že cévy na sebe správně nenavazují.

Ani jedna z výše zmíněných chyb ovšem není zapříčiněna nesprávnou funkčností aplikace. Tři zmíněné chyby a výsledek jejich skeletonizace jsou znázorněny na obrázku 5.9. Tato nesprávná označení představují přibližně 9% všech bodů, které jsou na snímku identifikovány.



Obrázek 5.9 – chyby manuálně segmentovaného řečiště – (zleva) vyčnívající pixel, nespojené cévy a černé pixely uprostřed cév

Výsledná aplikace byla potom testována primárně na snímcích zdravých sítnic databáze HRF. Ukázalo se, že skeletonizace a vyhledávání fungují dostatečně správně, takže jsem se rozhodla k jejich využití při testování aplikace jako celku. Následující tabulka 5.a ukazuje procentuální podíl správně a špatně identifikovaných bodů větvení.

Správně	Špatně
89.3%	10.7 %

Tabulka 5.a – správnost určení bodů větvení a křížení

Tabulka ukazuje, že téměř devadesát procent bodů, které algoritmus označí jako bifurkaci nebo křížení, jsou označeny správně. Takovéto výsledky jsou uspokojivé.

Při porovnání se snímky manuálně segmentovaného řečiště jsou výsledky podstatně horší. Testování ukázalo, že takto navržené řešení je schopno správně identifikovat pouze necelých 35% bodů, a to ještě v závislosti na kvalitě vstupních snímků. Snímky poškozených sítnic dosahují ještě nižšího procenta. Příklad výstupu zpracovaného snímku je znázorněn v příloze A.

Takové zhoršení je způsobeno nedokonalostmi v použitých postupech v kombinaci s kvalitou vstupních snímků, a to vše v porovnání s dokonalostí ručně zpracovaného snímku. Dané výsledky jsou specifické pro použité databáze a na jiných budou diametrálně odlišné.

Je také nutné podotknout, že ani profesionálně vyvíjené aplikace nejsou schopny označit všechny body větvení tak, jak je schopen je označit neautomatizovaně expert v daném oboru.

Jako poměrně efektivní se jeví metoda odstraňování šumu pomocí čtverců. Provedena byla analýza dvou databází – DiaRet a DRIVE. Na poslední zmiňovanou aplikaci není optimalizována, tudíž se dala očekávat mnohem nižší efektivita. Rovněž je nutné zmínit, že přibližně 40% procent snímků má špatné

světelné podmínky a většina z nich je dosti výrazně ovlivněna nemocí. Obojí má na výsledek vysoký vliv. Výsledky efektivity jsou zapsány do tabulky 5.b.

Databáze	Přibližná efektivnost odstranění
DiaRet	80%
DRIVE	50%

Tabulka 5.b – efektivita odstraňování šumu

Celý program byl otestován nejdříve na vlastním notebooku a posléze i na školním serveru Merlin. Tím bylo zjištěno, že je zásadní rozdíl ve verzích použitých knihoven. Na více zařízeních s OpenCV 3.0.0 vše pracuje tak, jak je výše uvedeno a ukázáno, avšak na serveru při OpenCV v. 3.1.0 jsou výsledky zásadně odlišné. Proto je nutné pro správné zobrazení použít verzi 3.0.0. Výstupem aplikace jsou dva soubory – první z nich je textový, s názvem *localized.txt*. Ten obsahuje souřadnice bodů větvení podle pixelů, na kterých se nacházejí. Druhý výstup je obraz (stejný jako zdrojový), na kterém jsou graficky znázorněny body větvení a křížení cév. Název tohoto souboru je možné před spuštěním programu změnit.

5.7 Návrh dalších úprav

Z výsledků testování vychází, že nejvýraznější problém je v části předzpracování obrazu. Právě této části by se mělo týkat případné vylepšení aplikace. Bylo by vhodné zpracovat obraz tak, aby vznikl co nejčistší obraz už po jeho segmentaci. Z této části je potom nejvíce problematická vhodná úprava kontrastu. Tento problém je obecně známý a potýká se s ním řada publikovaných algoritmů.

I přesto, že program umožňuje zadávání parametrů pomocí příkazové řádky nebo uživatelského rozhraní, je schopen pracovat i samostatně. Pokud má být samostatný, tak parametry, které jsou pro zpracování důležité (tj. parametry pro adaptivní prahování, Gaussovo rozostření), mají pevně zadané hodnoty – stejné pro všechny vstupy. Jejich velikost byla určena na základě experimentů. Tento způsob by ovšem při případném dalším využití nebyl vhodný. Všechny tyto hodnoty mohou zůstat uživatelem ovlivnitelné, ale měly by být počítány automaticky a individuálně pro každý vstup. Tím by se dalo dosáhnout mnohem větší efektivity.

Případné úpravy by se mohly týkat i odstraňování šumu. Čtverce se zdají být v určitých obrazech nedostačující a mohly by být nahrazeny obdélníky. Pouhé přidání další velikosti pro procházení je ovšem nevyhovující kvůli časové náročnosti. Velikosti by se tedy musely počítat automaticky. Jednou z takovýchto možností by byla úprava funkce pro hledání délky úsečky od bodu větvení, která by se nezastavovala v dalším větvení, ale spočítala by reálnou délku od bodu větvení po její konec. Na základě takto určených délek by bylo možné alespoň přibližně odhadnout rozměry a polohu obdélníku.

6 Závěr

Teoretická část bakalářské práce byla zaměřena především na biometrii jako samostatný vědní obor. Byly uvedeny jak její historické souvislosti, tak využití v moderní technologii. Zde se uplatňuje při identifikaci osob, kde nachází využití v kriminologii či řízení přístupu. Postupně nahrazuje dnes hojně používané prvky, jako jsou přístupové karty, platební karty apod.

Biometrické charakteristiky se dají rozdělit do dvou částí – na prvky fyzické, mezi které se řadí DNA, otisky prstů, sítnice a duhovka oka, krevní řečiště a geometrie ruky, tvar a termosnímek obličeje, a prvky behaviorální, kam patří dynamika stisku kláves, hlas, chůze a obličejová mimika. Všechny biometrické prvky se musí vyznačovat vlastnostmi, jako je univerzálnost, stálost, unikátnost, výkonnost či odolnost. Vlastností systémů, které takové prvky zpracovávají, jsou určeny především mírou senzitivity a specificity.

I přesto, že využití biometrie přináší spoustu výhod, existují zde i určité nevýhody. Mezi ty hlavní patří možnosti zfalšování, které se do určité míry týkají všech využívaných prvků. Jako jedním z velice vhodných prvků se jeví využití oční sítnice.

Mezi biometricky využitelné prvky nacházející se na sítnici patří cévy, které tvoří poměrně rozsáhlou síť. Kromě nich se zde nacházejí dvě skvrny – žlutá, jejíž střed tvoří fovea, která představuje místo nejostřejšího vidění, a slepá, která značí místo, kudy do oka vstupuje zrakový nerv.

Aby bylo možné sítnicové cévy použít pro biometrické porovnávání, je nutné její snímek vhodně zpracovat takovým způsobem, aby se dala vytvořit biometrická šablona.

Samotný proces úpravy obsahuje mnoho kroků, jejichž vhodná kombinace má značný vliv na výkonnost výsledné aplikace. Jako první krok se provádí převod do zeleného kanálu a zmenšení velikosti vstupního obrazu na rozměry přibližně 800 x 600px. Nezměněný kontrast obrazu není pro další zpracování dostačující a je nutné jej dalšími prostředky zvýšit. Rychlou a výpočetně nenáročnou metodou je ekvalizace histogramu.

Jakákoli úprava světla obrazu s sebou nese negativní jevy v podobě zvýraznění nedokonalostí obrazu – tzv. šumu. Za účelem jeho redukce je používán filtr určený pro rozmazání obrazu, Gaussovo rozostření. Pro oddělení cév od pozadí se používá segmentace obrazu, konkrétně pak metoda adaptivního prahování. Pro větší zvýraznění podstatné části (s cévami) se k obrazu přidává maska.

Použitím jednoho ze skeletonizačních algoritmů je tak provedeno ztenčení cév na tloušťku přesně jednoho pixelu. Takto je možné křížení cév vyhledat tak, že je procházeno osmi-okolí pixelů a kontrolován počet sousedních pixelů.

Takovýchto míst je ovšem v obraze více, než je reálných větvení cév. Proto je nutné tato místa odstranit. K tomuto účelu byl navrhnut a implementován nově zvolený postup, který využívá odlišné vlastnosti než běžně dostupné algoritmy. Ještě před vyhledáváním křížení jsou z obrazu odstraňovány takové bílé části, které jsou osamoceny a nemají žádnou návaznost na jiné větší celky. Takovéto části

nemohou být cévami, protože ty na sebe bez výjimky navazují. Takto navržený způsob je schopen správně odstranit přibližně 80% nežádoucích artefaktů pro databáze, na něž je primárně navržen.

Otestována byla zvláště část realizující skeletonizaci a vyhledání obrazu, která vykazuje výsledky nad míru očekávání. Pokud nejsou nedostatky ve vstupním souboru, je schopna určit všechny správné body. Kromě nich označí přibližně 9% bodů jako křížení nesprávně, což může být způsobeno také nedokonalostmi vstupních obrazů.

Výrazně nižší výkonnosti je schopen program dosáhnout jako celek. Při použití kvalitních snímků sítnic je schopen označit body takovým způsobem, že téměř v devadesáti procentech se správně jedná o křížení či bifurkaci. Při použití na snímky postižené nemocemi je úspěšnost výrazně nižší. Ovšem při srovnání s manuálně segmentovanými snímky je schopen dosáhnout přibližně třetinové výkonnosti. To je způsobeno kombinací automatizovaných postupů zpracování a odlišnou kvalitou snímků ve srovnání s nejdokonalejším existujícím zpracováním (kterého nejsou schopny plně dosáhnout ani komerční aplikace).

Výsledkem zpracování jsou pak dva soubory. Textový, který obsahuje pořadí a souřadnice bodů větvení, a obraz s vyznačenými body větvení.

Literatura

- [1] MAYHEW, Stephen. *History of Biometrics*. In: BiometricUpdate.com [online]. Biometrics Research Group, 14 January 2015. [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.biometricupdate.com/201501/history-of-biometrics>
- [2] VACH, Martin. *Historie biometrik a jejich využití ve výpočetní technice*. Fakulta informatiky Masarykovy univerzity [online]. [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003/xvach_biometriky.htm
- [3] RAK, Roman aj. *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. Praha: Grada Publishing a.s., 2008. 664 s. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [4] HOANG Bichlien a Ashley CAUDILL. *Biometrics*. In: IEEE Emerging Technology portal [online]. IEEE Emerging Technology portal, 2006 – 2012 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <https://www.ieee.org/about/technologies/emerging/biometrics.pdf>
- [5] DRAHANSKÝ, Martin aj. *Biometrie*. Brno: Computer Press a.s., 2011. ISBN 987-80-254-8979.
- [6] HROMÁDKOVÁ, Lada. *Šilhání*. 2. doplnění. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1995. ISBN 80-7013-207-8
- [7] Retinal disorders. In: Merck Sharp & Dohme Corp. *Merck Manual* [online]. [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.merckmanuals.com/professional/eye-disorders/retinal-disorders>
- [8] LI, Stan Z. *Encyclopedia of Biometrics*. New York: Springer Science+Business Media, LLC., 2009. ISBN 978-0-387-73002-8
- [9] Cestovní doklady s biometrickými prvky (CDBP). In: *Ministerstvo vnitra České republiky* [online]. [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.mvcr.cz/clanek/cestovni-doklady-s-biometrickymi-prvky-cdbp.aspx>
- [10] Videni.cz. Anatomie lidského oka. In: Videni.cz | SWAMI s.r.o. Videni.cz [online]. 2. únor 2010, aktualizováno 15. duben 2014, [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.videni.cz/oko/32-anatomie-oka>
- [11] SINTHANAYOTHIN, C., J. BOYCE, H. COOK a T. WILLIAMSON. Automated localization of the optic disc, fovea, and retinal blood vessels from digital color fundus images. *British Journal of Ophthalmology* [online]. 1999, , 902–910 [cit. 2016-04-22]. ISSN 1468-2079. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1723142/>
- [12] Combined DNA Index System (CODIS). *The FBI Federal Bureau of Investigation* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <https://www.fbi.gov/about-us/lab/biometric-analysis/codis>
- [13] Integrated Automated Fingerprint Identification System. *The FBI Federal Bureau of Investigation* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: https://www.fbi.gov/about-us/cjis/fingerprints_biometrics/iafis
- [14] FOLDA, Jan. Databáze DNA. In: *Úřad pro ochranu osobních údajů* [online]. 2007 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <https://www.uouu.cz/databaze-dna/ds-2479/p1=2479>

- [15] *Ocular Pathology Photos* [online]. Ted M. Montgomery, O.D., 2016 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: http://www.tedmontgomery.com/the_eye/eyephotos/
- [16] NASH. Implementation of thinning algorithm in OpenCV. In: *OpenCV-Code* [online]. 2012 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://opencv-code.com/quick-tips/implementation-of-thinning-algorithm-in-opencv/>
- [17] NASH. Implementation of Guo-Hall thinning algorithm. In: *OpenCV-Code* [online]. 2013 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://opencv-code.com/quick-tips/implementation-of-guo-hall-thinning-algorithm/>
- [18] ZHANG, T.Y. a C.Y. SUEN. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. *Communications of the ACM* [online]. New York, NY, USA, 1984, **1984**(3), 236-239 [cit. 2016-04-30]. DOI: 10.1145/357994.358023. Dostupné z: <http://www-prima.inrialpes.fr/perso/Tran/Draft/gateway.cfm.pdf>
- [19] GUO, Z. a R.W. HALL. Parallel thinning with two-subiteration algorithms. *Communications of the ACM* [online]. New York, NY, USA, **1989**(3), 359-373 [cit. 2016-04-30]. DOI: 10.1145/62065.62074.
- [20] SONKA, Milan, Vaclav HLAVAC a Roger BOYLE. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. 3. United States of America: Thomson Learning, 2008. ISBN 978-0-495-08252-1.
- [21] *OpenCV* [online]. Itseez, 2016 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://opencv.org/>
- [22] ŠPANĚL, Michal a Vítězslav BERAN. Obrazové segmentační techniky: Přehled existujících metod. In: VUT FIT: ispanel [online]. 2006 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~spanel/segmentace/>

Seznam použitých obrázků

Obrázek 2.1 – metriky biometrických systémů	9
Obrázek 2.2 – proces zpracování vzorku	11
Obrázek 3.1 – průřez lidského oka	14
Obrázek 3.2 – makulární degenerace [15].....	16
Obrázek 3.3 – proliferativní diabetická retinopatie [15]	16
Obrázek 3.4 – uzávěr větve sítnicové žíly [15]	16
Obrázek 3.5 – uzávěr hlavní sítnicové žíly [15].....	16
Obrázek 4.1 – fundus kamera.....	18
Obrázek 4.2 – snímek zachycený fundus kamerou (databáze HRF).....	18
Obrázek 5.1 – rozdělení výsledného programu do více logických celků	20
Obrázek 5.2 – konstanta $c=1$, velikost snímku 3504 x 2336px.....	24
Obrázek 5.3 – velikost snímku 800x533px, okolí 37x37px	25
Obrázek 5.4 – velikost snímku 3504 x 2336px, okolí 51x51px.....	25
Obrázek 5.5 – před odstraněním šumu	27
Obrázek 5.6 – po odstranění šumu	27
Obrázek 5.7 – nežádoucí artefakty	29
Obrázek 5.8 – originál snímku	29
Obrázek 5.9 – chyby manuálně segmentovaného řečiště – (zleva) vyčnívající pixel, nespojené cévy a černé pixely uprostřed cév	31

A. Obrazový výstup aplikace



B. Obsah přiloženého CD

1. Složka *doc* obsahující dokumentaci a programový manuál
2. Složka *src* obsahující zdrojové kódy programu
3. Složka *images* se vzorovými vstupními snímky
4. Skript *example*, který několikrát vzorově spustí program s různými vstupními snímky
5. Soubor *readme* se základními informacemi o programu a autorovi
6. Soubor *localize*, který byl pomocí přiloženého *Makefile* přeložen a je spustitelný na školním serveru Merlin
7. *Makefile*

C. Uživatelský manuál

Překlad

Překlad programu v prostředí Linux proved'te pomocí přiloženého *Makefile* souboru. Pro správné přeložení je potřebné mít nainstalované knihovny *Qt*¹ verze 4.8.6 a *OpenCV*² ve verzi 3.0.0.

Zdrojové soubory potřebné pro překlad:

- *bp.h*
- *bp.cpp*
- *skeletonization.h*
- *guo-hall.cpp*
- *zhang-suen.cpp*
- *gui.h*
- *gui.cpp*
- *BP.pro*
- *ui_gui.h*
- *gui.ui*

Parametry

Program je schopen pracovat téměř bez zásahu uživatele (kromě vstupního souboru, který je nutné zadat). Rovněž je možné některé z klíčových parametrů zadat manuálně, případně některé části úplně přeskočit. V závorce je uveden pro každý přepínač jeho ekvivalent pro pole v grafickém rozhraní.

Povinné

Jako povinný je vstupní soubor, kde je na výběr jedna ze dvou možností – přepínače `-i` / `-b`.

Přepínač `-i` (*source*)

Slouží pro zadání standardního barevného snímku sítnice z libovolné databáze. Program při zpracování provede všechny nutné kroky pro správné zpracování. Program by měl být schopen zpracovávat libovolný formát obrazu.

Příklad použití: `./localize -i color_image.png`

Přepínač `-b` (*source* + přepínač *binary*)

Tato možnost slouží k zadání již částečně zpracovaného binárního obrazu, kterým může být snímek s manuálně segmentovaným krevním řečištěm. Při zpracování již neprobíhají úvodní fáze a provede se pouze ztenšení linií a vyhledání bifurkací.

Příklad použití: `./localize -b binary_image.png`

¹ Viz <http://www.qt.io/developers/>.

² Viz <http://opencv.org/>.

Volitelné

Tyto přepínače slouží k volnějším ovládní. Není nutné zadání ani jednoho z nich a je možné je mezi sebou libovolně kombinovat.

Přepínač -h

Vypíše stručnou nápovědu k programu a ukončí se.

Přepínač -e (*histogram equalization*)

Slouží k vypnutí funkce ekvalizace histogramu obrazu (defaultně zapnuta). Nevyžaduje argument.

Přepínač -r (*neoznačené resize image*)

Slouží k vypnutí funkce zmenšení obrazu (defaultně zapnuta – zmenšuje vstupní obraz na velikost 600 x k*600 podle poměru stran vstupního obrazu). Nevyžaduje argument.

Přepínač -p (*show phases*)

Zapne zobrazení všech fází zpracování obrazu. Při barevném vstupním obrazu ukáže: původní obraz, zelený kanál, zlepšený kontrast, rozmazání, prahovaný obraz, ztenčení cév na 1px, odstranění šumu, výsledný obraz s vyznačenými bifurkacemi. Při již prahovaném pouze originální, ten se ztenčenými cévami a výsledný s vyznačenými bifurkacemi. Nevyžaduje argument.

Přepínač -n (*destination name*)

Pomocí něj lze zadat jméno výstupního souboru (zpracovaného obrazu) včetně koncovky.

Příklad použití: `./localize -i input_image.png -n output.png`

Přepínač -a (*sekce Adaptive Thresholding*)

Nastavuje parametry pro funkci adaptivního prahování. Parametry lze zadávat oddělené čárkou, kde první z nich udává velikost okolí a druhý konstantu, která je od výsledku odečítána. Musí se jednat o celá čísla, v případě okolí musí být lichá.

Příklad použití: `./localize -i input_image.png -a 37,2`

Přepínač -g (*sekce Gaussian Blur*)

Nastavuje velikost okna pro rozostření obrazu pomocí Gaussova rozostření. Musí se jednat o jedno celé liché číslo.

Příklad použití: `./localize -i input_image.png -g 9`

Přepínač **-m** (*input mask*)

Přidává soubor s vlastní maskou k obrazu (automatické generování masky nemusí mít vždy uspokojivé výsledky).

Příklad použití: `./localize -i input_image.png -m mask.png`

Přepínač **-s** (*sekce thinning method*)

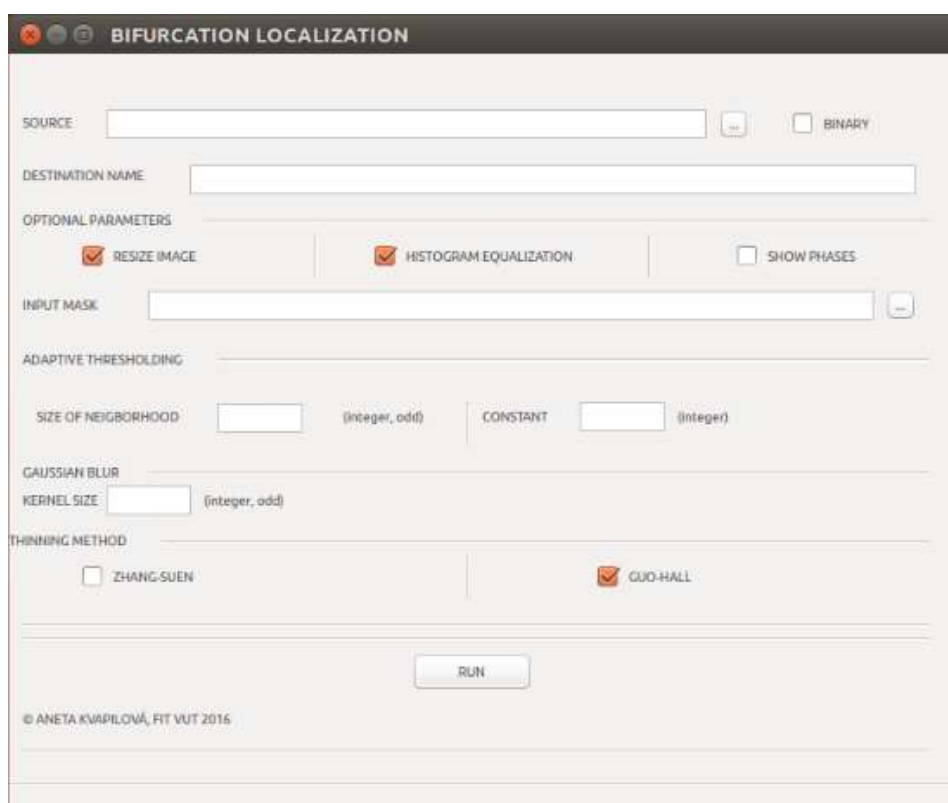
Slouží ke změně algoritmu pro ztenčování cév. Program defaultně používá *Guo-Hall* algoritmus, který je možné změnit na *Zhang-Suen*.

Příklad použití: `./localize -i input_image.png -s zhang-suen`

Grafické uživatelské rozhraní (parametr **-G**)

Při zadání parametru **-G** se spustí grafické uživatelské rozhraní. Umožňuje zadání všech parametrů stejně jako je to možné pomocí příkazové řádky. Předem označená pole (oranžový čtverec s fajfkou) ukazují defaultně nastavené hodnoty, které je ovšem možné změnit.

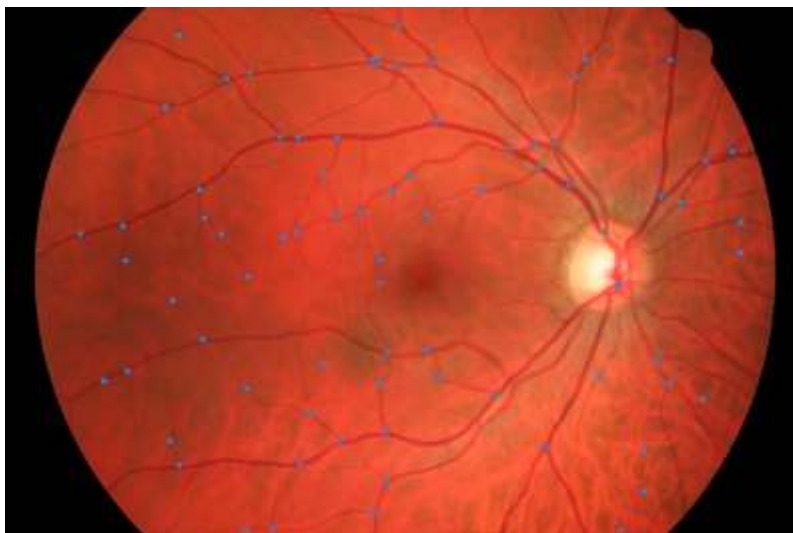
Pokud má být vstupní soubor binární, je nutné označit možnost *BINARY*. Po skončení zadávání je program spuštěn stiskem tlačítka *RUN*. V závorkách je naznačeno, jaké hodnoty jsou pro daný parametr povoleny.



Vzhled grafického rozhraní (systém Ubuntu)

Výstup

Výstupem programu jsou dva soubory. Prvním z nich je obraz (defaultně pojmenován jako `localized.png`), ve kterém jsou modře naznačeny body větvení a křížení cév. Druhý soubor je textový, pojmenován `localized.txt` bez možnosti změny. V něm jsou uloženy souřadnice bodů větvení. Ukázky výstupů jsou znázorněny níže.



Grafický výstup

```
localized.txt
1: [6,548]
2: [61,466]
3: [68,284]
4: [95,267]
5: [99,594]
6: [142,388]
7: [153,532]
8: [194,263]
9: [196,416]
10: [199,519]
```

Textový výstup – soubor localized.txt