



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

**REKONSTRUKCE EXTRAHOVANÉHO KREVNÍHO
ŘEČIŠTĚ VE SNÍMCÍCH SÍTNIC OKA**

RECONSTRUCTION OF EXTRACTED BLOODSTREAM IN IMAGES OF RETINAS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VOJTĚCH KOZEL

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ SEMERÁD

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce



21546

Student: **Kozel Vojtěch**
Program: Informační technologie
Název: **Rekonstrukce extrahovaného krevního řečiště ve snímcích sítnice oka**
Reconstruction of Extracted Bloodstream in Images of Retinas
Kategorie: Umělá inteligence

Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se sítnice lidského oka, onemocnění sítnice oka a algoritmů zpracování krevního řečiště.
2. Navrhněte algoritmus pro doplnění chybějících částí krevního řečiště (např. způsobených projevy onemocnění).
3. Pomocí existujících algoritmů zvýrazněte krevní řečiště ve snímcích sítnice oka a implementujte ve druhém bodě navržený algoritmus.
4. Vámi navržené řešení otestujte na dostupné databázi, zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte možnosti dalšího vylepšení.

Literatura:

- Drahanský M., Orság F. et al.: *Biometrie*, Brno, CZ, Computer Press, 2011, s. 294, ISBN 978-80-254-8979-6.
- Sehu K.W., Weng W.R. *Ophthalmic pathology: An illustrated guide for clinicians*, Oxford, Blackwell Publishing, 2005, s. 289, ISBN 978-0-727917-79-9.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body zadání 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Vedoucí práce: **Semerád Lukáš, Ing.**
Konzultant: Mňuk Tomáš, MUDr., FNUSA
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2018
Datum odevzdání: 15. května 2019
Datum schválení: 27. března 2019

Abstrakt

Cévní řečiště díky svým vlastnostem hraje roli hned v několika oborech. V lékařství je díky snímkům sítnic možno diagnostikovat různou řadu onemocnění pacientů. Díky své unikátnosti u každého jedince hraje sítnice velký význam v oblasti biometrie. Obyčejný zdravý člověk má sítnici po celý svůj život konzistentní. V případě onemocnění se můžou vlastnosti sítnic měnit, docházet k jejímu krvácení, porušení a podobně. Při automatizovaném zpracování poté nastávají problémy. Ať už z důvodu chyb snímacích zařízení, vlivem onemocnění, nebo chybami algoritmů, které provádí extrakci cévních řečišť. Tato práce se věnuje problému vzniku přerušení v extrahovaném cévním řečišti. Obsahuje popis důvodů vzniku přerušení a implementaci řešení rekonstrukce přerušovaných cévních řečišť. Algoritmus je implementován v jazyce Java s použitím volně dostupné knihovny OpenCV.

Abstract

Retinal bloodstream plays a significant role in many specializations. In medicine, retinal images are used for automatic disease diagnosis. The blood vessel tree is unique for each individual, and as such this feature is often used in biometric systems for person-recognition. Healthy individuals possess consistent retinas throughout their life, however, there are many reasons why retinal changes may occur. The most common reason for physical changes is disease. In such cases problems arise in automated processing of retina images. These problems may also lie with retinal scans errors or blood vessel extraction algorithm error. This thesis describes reasons why segmented blood vessels are interrupted. Main goal of this thesis is to create a program which can automatically locate interrupted vessel segments and reconstruct them. The program is implemented in Java with OpenCV library.

Klíčová slova

lidské oko, sítnice oka, onemocnění oka, rekonstrukce krevního řečiště, Java, zpracování obrazu, OpenCV

Keywords

human eye, eye retina, eye diseases, bloodstream reconstruction, Java, image processing, OpenCV

Citace

KOZEL, Vojtěch. *Rekonstrukce extrahovaného krevního řečiště ve snímcích sítnic oka*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Lukáš Semerád

Rekonstrukce extrahovaného krevního řečiště ve snímcích sítnic oka

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáše Semeráda. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Vojtěch Kozel
10. května 2019

Poděkování

Děkuji Ing. Lukáši Semerádovi za jeho odborné rady, doporučení jakým směrem postupovat při vzniklých problémech a pečlivé vedení.

Obsah

1 Úvod	3
1.1 Cíl práce	4
1.2 Obsah práce	4
2 Lidské oko	5
2.1 Anatomie lidského oka	6
2.2 Sítnice	7
2.2.1 Světločivné buňky	7
2.2.2 Žlutá skvrna	7
2.2.3 Optický disk	8
3 Vyšetření a snímání sítnice	9
3.1 Oftalmologie	9
3.1.1 Přímá oftalmoskopie	9
3.1.2 Nepřímá oftalmoskopie	10
3.2 Fundus kamera	10
3.3 Oční koherenční tomograf	10
4 Choroby sítnice	12
4.1 VPMD	12
4.2 Diabetická retinopatie	13
4.3 Další onemocnění	16
4.3.1 Uzavření sítnicových žil a artérií	16
4.3.2 Odchlípení sítnice	16
4.3.3 Zánět sítnice	17
4.4 Laserová léčba	17
4.5 Shrnutí vlastností nemocných sítnic	18
5 Techniky zpracování obrazu	19
5.1 Vyhlazování obrazu	19
5.1.1 Průměrování	19
5.1.2 Gaussovo vyhlazování	20
5.2 Prahování	20
5.3 Morfologické operace	20
5.4 Houghova transformace	21
5.5 Semínkové vyplňování	21
5.6 Vzorce pro ohodnocení koncových bodů	22
5.7 Algoritmy pro extrakci krevních řečišť	22

6	Návrh algoritmu	26
6.1	Shrnutí důvodů vzniku přerušení	26
6.2	Úprava rozlišení a definice parametrů	28
6.3	Lokalizace masky pozadí	29
6.4	Detekce optického disku	29
6.5	Detekce fovey	31
6.6	Získání krevního řečiště	31
6.7	Detekce oblastí exsudátů a drúz	32
6.8	Skeletonizace řečiště a získání koncových bodů	32
6.9	Segmentace cév, získávání informací	34
6.10	Vyhledávání míst pro rekonstrukci	36
6.11	Rekonstrukce řečiště	41
7	Implementace a testování	45
7.1	Struktura programu a jeho výstupy	45
7.2	Použití programu	46
7.3	Zdrojové databáze	46
7.4	Testování detekce optického disku	47
7.5	Testování identifikace přerušení a rekonstrukce polynomem	47
7.6	Testování rekonstrukce s použitím dodatečné extrakce	49
8	Závěr	50
	Literatura	52
A	Obsah přiloženého CD	55
B	Výsledky testování jednotlivých snímků	56

Kapitola 1

Úvod

Sítnice lidského oka je jediným místem v těle, kde lze bez operativních zásahů pozorovat cévní systém. Spolehlivě můžeme pouze ze snímků určovat hned několik věcí na základě sledování cévního systému a dění kolem něj.

Z hlediska lékařského, sledováním sítnice lze odhalit a diagnostikovat oční choroby již v jejich počátku a včasnou léčbou zamezit tomu nejhoršímu, ztrátě vidění. Lidské oko je totiž jedním z nejdůležitějších smyslových orgánů a také jedním z nejcitlivějších. Jakékoliv sebemenší poškození kterékoliv části lidského oka může zapříčinit neměnné a vážné změny tohoto orgánu a tím pádem zhoršení vidění. V extrémních případech může dojít až ke ztrátě úplné. Vzhledem k vzrůstajícímu počtu pacientů se ale často stává, že léčba očních chorob přichází později, než by bylo vhodné. Právě u nemocných pacientů hraje největší roli čas. Čím dříve se na onemocnění přijde, tím se zvyšuje šance, že nemoc nebude mít pro pacienta vážné následky a včasná léčba zamezí šíření změn v oblasti oka a tím pádem eliminuje možnost poškození orgánu. Naštěstí již v dnešní době existují programy a algoritmy, kde dochází k automatizované detekci nejčastějších onemocnění, což urychluje proces počátku léčby pacientů. Ne všechna onemocnění jsou bohužel úplně léčitelná a tak dochází i k případům, kde lze postup nemoci pouze zpomalit, avšak pacientovi se v průběhu let zrak zhoršuje, v některých případech přichází o zrak úplně.

Ve světě informatiky se sítnice lidského oka využívá k biometrii. Všeobecně nejznámějším a nejrozšířenějším biometrickým rysem jsou otisky prstů. Mnohem lepším a dalším rysem je právě sítnice oka. Jedná se o skupinu cév, které se nachází uvnitř lidského oka. Její vlastnosti jsou naprosto ideální. Každý jedinec má totiž naprosto unikátní vzor krevního řečiště. Výjimku netvoří ani jednovaječná dvojčata či levé a pravé oko [8]. Je tedy nepravděpodobné, aby se na světě našli dva jedinci, kteří budou mít stejný vzor. Ke snímání lidského oka se používá nejčastěji speciální nástroj nazývaný fundus kamera.

Jedním z kroků zpracování snímků sítnice oka je extrakce cévního systému. Jedná se o proces, kdy se ze vstupního snímku pomocí různých typů algoritmů snažíme zvýraznit cévní řečiště. Protože se jedná o automatizované procesy, nastávají v extrahovaných snímcích situace, kdy cévní řečiště není úplně a vyskytují se v něm přerušené cévní segmenty. Při dalším zpracování zvýrazněných řečišť mohou tyto chybějící části způsobovat chyby a nebo negativně ovlivňovat výsledky.

1.1 Cíl práce

Ve své práci jsem se zaměřil na problémy spojené s přerušením v extrahovaném krevním řečišti sítnice při zvýraznění pomocí algoritmu pracujícím pomocí metody Matched filters. Vznik přerušeného řečiště může nastat například vlivem šířícího se onemocnění sítnice oka, zásahy do sítnice v rámci léčby nemocného pacienta anebo chybami na straně snímacích zařízení. Posledním vlivem, kterému se tato práce věnuje, jsou relativní chyby samotných algoritmů pro extrakci. Pro tuto práci jsem se snažil zaměřit na nejčastější příčiny vzniku přerušení krevního řečiště. Jejím cílem je ve snímcích nalézt přerušené části, nalézt cévu na kterou má přerušená část navazovat a provést napojení k cévnímu řečišti (rekonstrukci). V případě přesnosti algoritmu dále navrhnout možná rozšíření a zlepšení.

1.2 Obsah práce

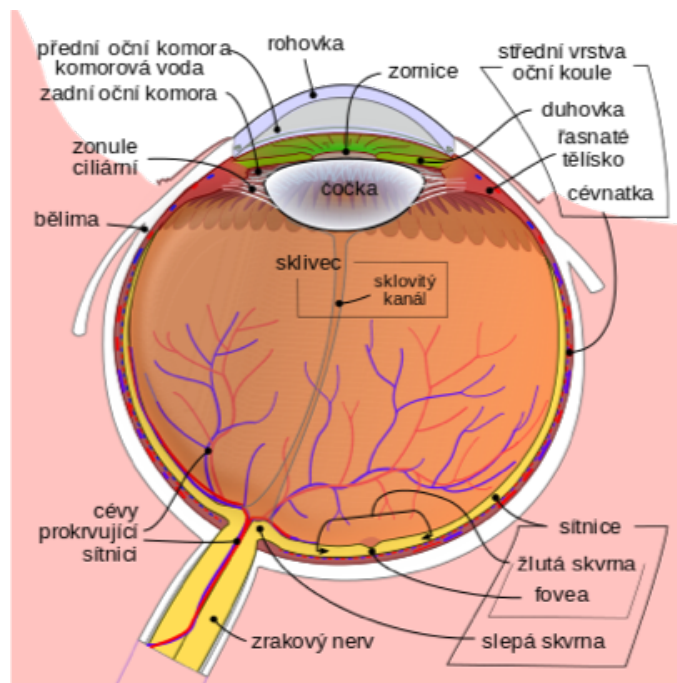
V kapitole 2 je popsána základní anatomie oka, kde se zaměřuji především na popis sítnice, která je z hlediska práce nejdůležitější částí oka. V kapitole 3 jsou shrnuty metody, kterými se provádí vyšetření a snímání sítnice oka. Kapitola 4 se věnuje onemocněním sítnice a zaměřuje se na jejich projevy v pořízeném obrazu. Na konci kapitoly se nachází shrnutí projevů onemocnění a zdůvodnění, které projevy mohou způsobovat problémy při extrakci cévního řečiště. Metody a techniky zpracování obrazu použité v této práci jsou popsány v kapitole 5. V této kapitole se také nachází popis principu algoritmů extrahujících ze snímků sítnice cévní řečiště. V kapitole 6 jsou na začátku uvedeny nejčastější příčiny vzniku přerušení při extrakci pomocí metody Matched filters, dále se tato kapitola věnuje samotnému popisu činnosti algoritmu. To zahrnuje předzpracování obrazu, získávání informací, hledání míst pro rekonstrukci a v posledním kroku provedení rekonstrukce samotné. Struktura aplikace, její použití a výsledky testování jsou popsány v kapitole 7.

Kapitola 2

Lidské oko

Lidské oko je nejkomplexnější smyslový párový orgán, pomocí kterého vnímáme okolní svět. Jedná se o orgán, který nám umožňuje přijímat informace z venkovního prostředí a poskytuje kolem 80 % informací o okolním světě. Dokáže nám poskytnout informace o tvarech, barvách, velikosti, a také pohybu různých předmětů v prostoru [7] [12].

Samotný vznik obrazu a vidění je složitý proces. Podstatou vzniku obrazu takového jako ho vnímáme je ve výsledku přeměna světelné energie na elektrický signál, který je přenášený až do mozku, který ho zpracuje. Při pohledu na předmět se tedy světelné paprsky odrážejí od tohoto předmětu a vstupují do oka skrze rohovku, poté prochází čočkou a sklivcem na sítnici. Tyto tři struktury mají za úkol právě to, aby soustřeďovaly a ohýbaly světelné paprsky do místa nejostřejšího vidění [11]. Z tohoto místa jsou následně transformovány v elektrické signály, které jsou pomocí nervového ústrojí přenášeny až do mozku, kde dochází k jejich dalšímu zpracování. To obnáší například převrácení obrazu nebo kompenzaci chybějících částí zachyceného obrazu.



Obrázek 2.1: Schéma lidského oka [32].

2.1 Anatomie lidského oka

Lidské oko je tedy velice složitý a dokonalý systém skládající se z velkého množství částí, které spolu musí dokonale spolupracovat. Jakékoliv poškození některé z částí může mít za příčinu vážné následky na samotné fungování oka jako orgánu. Pro člověka to má poté za následky poruchy zraku, které kolikrát ani nemusí vnímat (například špatná citlivost barev). Jednotlivé části lze vidět popsané na obrázku 2.1.

- **Rohovka** (cornea) je čirá, zakřivená vrstva s tvarem horizontálně uložené elipsy. Její tloušťka dosahuje v centru kolem 0,6 mm v periferiích kolem 14 mm. Je bezbarvá, naprosto průhledná a nenajdeme v ní žádný cévní systém. Nachází se před duhovkou, a tvoří tak společně s bělmem pevný obal oka, který je tak pomyslnou bariérou mezi vnitřním a vnějším prostředím orgánu. Je nejcitlivější tkání v těle, vyživuje se z komorové vody a ze slz [14].
- **Přední oční komora** je štěrbinovitý prostor mezi rohovkou a duhovkou, resp. čočkou. Cirkuluje v ní komorová voda tvořená krevní plazmou. Pokud mluvíme o zdravém jedinci, nachází se zde také místo, odkud může přebytečná tekutina odtékat. V opačném případě má ucpaní odtoku za příčinu zvýšení nitroočního tlaku, a také se tento problém může rozvinout v zelený zákal [14].
- **Zadní oční komora** je opět štěrbinovitý prostor mezi duhovkou a sklivcem. Stejně jako přední komora obsahuje komorovou vodu tvořenou krevní plazmou. Tato tekutina zpravidla protéká do přední komory, kde se buď vstřebává, anebo je její přebytečné množství vylučováno z oka ven.
- **Bělma**, jinak také známa jako oční bělmo nebo skléra, je neprůhledná, bílá, ochranná vnější vrstva oka obsahující kolagen a elastická vlákna. Její šířka je zhruba od 0,5 do 1,5 mm. Největší tloušťky nabývá v zadní části oka, kde se také nachází otvor, kudy do oka vstupuje zrakový nerv. V dětství je tenčí a může skrz ni prosvítat pigment, což má za příčinu namodralou barvu. Ve stáří ale naopak vlivem uloženého tuku může vypadat mírně nažloutle [14].
- **Duhovka** (iris) odděluje přední a zadní komoru oční. Tato tkáň se skládá z předního a zadního listu. Její barva je závislá na množství pigmentu a skladbě duhovkové tkáně (albíni například nemají žádný pigment). V jejím středu se nachází zornice [14].
- **Řasnaté tělísko** (corpus ciliare) je část střední vrstvy oční koule, kde se tvoří nitrooční tekutina. Ta slouží k vyživování tkání oka, které nemají cévy (rohovka a čočka). Její součástí je také ciliární sval, jehož stahy ovládají akomodaci čočky (její optickou mohutnost) [32].
- **Cévnatka** (choroidea) vyplňuje prostor mezi bělmem a sítnicí. Její funkcí je zajištění výživy některých částí sítnice [14].
- **Čočka** (lens crystallina) je transparentní bikonvexní struktura v oku, která spolu s rohovkou láme dopadající světlo, aby mohlo být zaměřeno na sítnici. Její hlavní funkcí akomodace. Akomodace je proces, který zvětšuje zakřivení čočky a pomáhá k zaostření blízkých předmětů na sítnici oka [14].

- **Sklivec** (corpus vitreum) je průhledné rosolovité těleso s řídkou vláknitou strukturou, která vyplňuje zhruba dvě třetiny vnitřního prostoru oční bulvy. Je tak nejobjemnější částí oka. Zajišťuje správný nitrooční tlak a napětí stěny oka. Poruchy sklivce vedou k onemocněním sítnice a tím pádem i k poruchám vidění [14].
- **Sítnice** (retina) je pro nás nejdůležitější částí, a proto jí je věnovaná samostatná následující podkapitola.

2.2 Sítnice

Sítnice (retina) je světlo–citlivá vrstva nacházející se na očním pozadí. Pokrývá zadní vnitřní stěnu oka ve formě tenké vrstvy (zhruba 0,2 až 0,5 mm). Jedná se o nejdůležitější část našeho oka. Je to tenká, jemná průhledná blána, která je s mozkiem spojená mozkovou dráhou. Její vnitřní plocha sousedí s cévnatkou a venkovní se sklivcem. Obsahuje velké množství světločivných buněk, které nám umožňují samotné vidění. Dále také obsahuje nervová vlákna.

Sítnice tedy zachycuje obraz, transformuje světelnou energii na chemické impulzy a pomocí zrakového nervu posílá zachycené informace zrakovou dráhou přímo do mozku, kde jsou dále zpracovávány. Jakékoliv onemocnění a poškození sítnice je závažné, v mnohých případech nevratné a při některých případech může vést až ke ztrátě zraku samotného [14].

2.2.1 Světločivné buňky

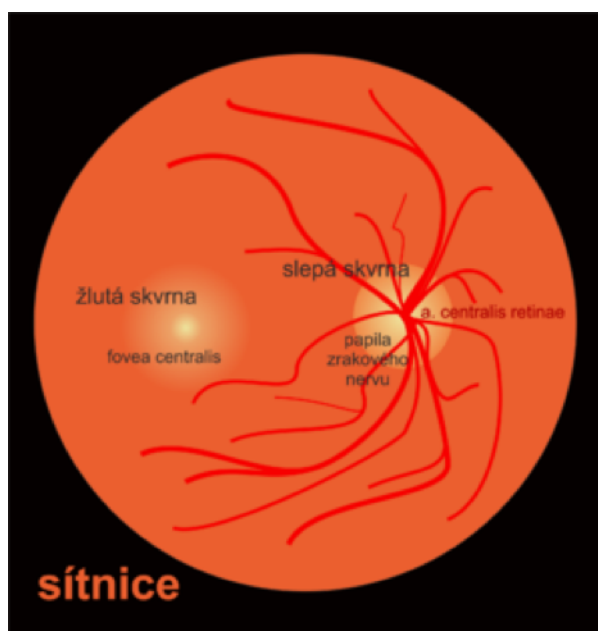
Světločivné buňky (fotoreceptory) jsou souborem buněk, které jsou schopny zachytit foton a na tento podnět způsobit depolarizaci buněčné membrány gangliových buněk a následně pak tento vzruch zpravidla předávají nervovým buňkám zrakového nervu. Jednoduše řečeno se jedná o buňky, které reagují na světlo. Tyto buňky se dělí na základní dva typy: čípky a tyčinky. **Čípky** zajišťují vidění za dobrých světelných podmínek. Vnímají barvy a jsou zodpovědné i za zrakovou ostrost. Největší hustotu mají v okolí žluté skvrny (fovey) a směrem k periferii sítnice jejich hustota klesá. **Tyčinky** jsou naopak světločivné buňky reagující na nižší intenzitu než čípky, ale nemají vlastnost rozpoznávat barvy. Nachází se spíše ve více okrajových částech sítnice. Zajišťují vidění při slabé intenzitě světla v okolí. Vnímají tedy pouze jas, nikoliv barevné spektrum [30].

2.2.2 Žlutá skvrna

Žlutá skvrna (makula) je místo nejostřejšího vidění na sítnici. Jak již bylo zmíněno, na tomto místě se nachází největší hustota koncentrace čípků (tyčinky se zde vůbec nenachází). Při zaostření oka na předmět dopadá jeho obraz právě na tuto část sítnice (zdravé oko směřuje obraz do tohoto místa, v opačném případě se člověk setkává s problémy ostrosti vidění). Její průměr dosahuje v dospělosti zhruba 5 mm. Ve středu žluté skvrny se nachází fovea. **Fovea** je oblast s nejvyšší zrakovou ostroší. Ve snímcích sítnice zdravého oka se tato část jeví jako nejtmaší část, často velmi sytě červená přecházející až do tmavě šeda. Tato barevnost hodně záleží na nastavení snímacího zařízení, avšak obecně můžeme tuto skvrnu lokalizovat jako nejtmaší kulovitou část zhruba uprostřed snímku sítnice oka (pokud se nejedná o nemocné oko, tam se můžou nacházet i tmavší oblasti vlivem projevů onemocnění) [14].

2.2.3 Optický disk

Optický disk (slepá skvrna, papila) je místo, kudy vystupují oční nervy ven z bulvy. Nena-
jdeme zde žádné fotoreceptory. Velikost je přibližně kolem $3mm^2$. Jelikož se v tomto místě
nenachází žádné tyčinky ani čípky, musí mozek tuto část chybějícího obrazu kompenzovat.
Děje se tak na základě informací z okolí optického disku a pomocí informací získaných
z druhého oka. Na snímcích sítnice tuto oblast můžeme lokalizovat na základě jejího jasů
a intenzity. V případě zdravého oka se jedná o nejsvětlejší část ve snímku sítnice, její barva
je žlutá až bílá, opět na základě nastavení snímacího zařízení. Navíc z tohoto místa vy-
stupuje cévní řečiště (této vlastnosti je možné využít při automatickém zpracování snímků
řečiště).



Obrázek 2.2: Schéma sítnice [6].

Kapitola 3

Vyšetření a snímání sítnice

Po dlouhou dobu bylo oko pro člověka záhadným orgánem. Toto se z hlediska medicíny začalo měnit až v druhé polovině 19. století díky vynálezu oftalmoskopu. Pomocí něho je možné sledovat určitou část vnitřku oka. Toto zařízení a samotné vyšetření má několik variant, které jsou popsány v samostatných podkapitolách.

Využití oční sítnice pro identifikaci osob je dokonce z hlediska historie ještě celé století za prvními zařízeními pro nahlédnutí do oka. Tyto nápady na využití sítnice pro tyto účely zaznamenali kolem roku 1935 Dr. Carleton Simons a Dr. Isodor Golstein, kteří se věnovali právě studiu očních nemocí. Mezi hlavní objev patřilo faktické zjištění, že každé oko má naprosto unikátní strukturu krevního řečiště sítnice oka a díky této vlastnosti může sloužit k jednoznačné identifikaci osob. První návrhy a prototypy specializovaných zařízení k těmto účelům se objevily až zhruba o 30 let později. Nárůst užívání a nástup sériové výroby přišel v polovině devadesátých let [17]. Od té doby se díky technologickému vzestupu, věnování se studiím lidského oka a možnostem zlepšovat kvalitu těchto zařízení na trhu objevilo několik typů zařízení, avšak i v dnešní době vzhledem k problematičnosti a složitosti lidského těla stále probíhá výzkum v tomto odvětví a pracuje se na nových zařízeních, které by poskytly co nejlepší informaci o struktuře lidského oka a umožnily získat co nejvíce informací. Nejznámějšími přístroji pro zkoumání lidského oka jsou oftalmoskop, fundus kamera nebo oční koherenční tomograf.

3.1 Oftalmologie

Oftalmologie je obor medicíny, který se zabývá zkoumáním zadního segmentu oka. Cílem tohoto vyšetření je zkoumání sítnice, cévnatky a místa výstupu očního nervu. Existuje hned několik metod tohoto vyšetření, mezi nejznámější patří přímá a nepřímá.

3.1.1 Přímá oftalmoskopie

Lékař při tomto druhu vyšetření používá přímý ruční oftalmoskop. Oční pozadí je sledováno přímo zorničkou pacienta ze vzdálenosti zhruba 5-7 centimetrů. Při tomto vyšetření se hodnotí změny na papile zřakového nervu, nález na sítnici a cévách sítnice. K lepšímu vyšetření periferní části může vyšetřovaný pacient měnit pohled. Před tímto vyšetřením není nutná žádná příprava a je ho možné provádět ambulantně [21].

3.1.2 Nepřímá oftalmoskopie

Toto vyšetření se na rozdíl od předchozího provádí v temné místnosti pomocí binokulárního nepřímého oftalmoskopu, který si lékař nasazuje na hlavu. Z důvodu dosažení co nejlepšího výsledku se provádí při rozšířených zornicích. K dosažení rozšíření zornic se pacientovi zhruba 30 minut před vyšetřením nakapou do očí mydriatika (látka pro rozšíření zornic). Tento typ vyšetření umožňuje pozorovat větší oblast očního pozadí. Tato metoda má své omezení pro pacienty se zeleným zákalem, kterým se nesmí podpůrná látka pro rozšíření zornic podávat [21].

3.2 Fundus kamera

Je novodobým digitálním zařízením nahrazujícím obyčejný oftalmoskop. Jeho fungování je ale stále založeno na principu nepřímého oftalmoskopu. Jedná se o specializovaný elektronický mikroskop s připojenou kamerou. Typická kamera zobrazuje 30° až 50° oblasti sítnice se zvětšením 2,5krát a umožňuje změnu tohoto vztahu pomocí zoomu nebo pomocných čoček. Optika fundus kamery je podobná optice nepřímého oftalmoskopu v tom, že pozorovací a osvětlovací systémy následují odlišné cesty. Jejím výstupem jsou digitální obrazy sítnice, které se používají pro sledování stavu sítnice a případnou diagnostiku očních onemocnění. Použití této kamery je neinvazivní, tedy nijak nezasahuje do snímaného oka. Před vyšetřením se aplikují oční kapky na rozšíření zornic stejně jako u nepřímého oftalmologického vyšetření [29].



Obrázek 3.1: Funduskamera a ruční fundus kamera [2] [25].

3.3 Oční koherenční tomograf

Tento přístroj umožňuje lékaři získat o oku podrobnější informace, než podávají výše zmíněné metody. Zařízení vytváří pomocí laserových paprsků jednotlivé řezy ve struktuře sítnice na jakémkoliv místě, které potřebuje doktor vyšetřit. Dokáže tak ve výsledku zobrazit jednotlivé vrstvy sítnice, což je výhodou při diagnostice zdravotního stavu pacienta. Všechny výše uvedené přístroje totiž poskytují pouze 2D pohled na sítnici oka. Tyto moderní zařízení mají v sobě implementovány různé algoritmy a analytické nástroje, takže dokážou

lékaři pomoci zanalyzovat stav pacienta a upozornit na případné nepatrné změny v oblasti sítnice. Lékař tak získává mnohem lepší podklady pro posouzení zdravotního stavu a vhodném plánování léčby pacienta [33].



Obrázek 3.2: Oční koherenční tomograf [19].

Kapitola 4

Choroby sítnice

V posledních letech se čím dál více zvětšuje počet pacientů s onemocněními sítnic. Velkou roli v tomto rapidním nárůstu hraje špatný životní styl spojen s dnešní uspěchanou dobou a stárnutí populace. Největším problémem jakéhokoliv onemocnění sítnice je riziko vzniku nezvratných změn způsobující nenávratná poškození zraku. Chorobám lze avšak často předcházet, popřípadě při v jejich včasném odhalení a nastavení vhodné léčby zastavit proces poškozování sítnice. Mezi nejčastější onemocnění, která způsobují poškození zraku jsou diabetická retinopatie a věkem podmíněná makulární degenerace (dále jen VPMD). Dále mezi méně časté, ale známé rizikové onemocnění patří například odchlípení sítnice, prasklá sítnice, zánět sítnice, anebo oběhové poruchy sítnice.

4.1 VPMD

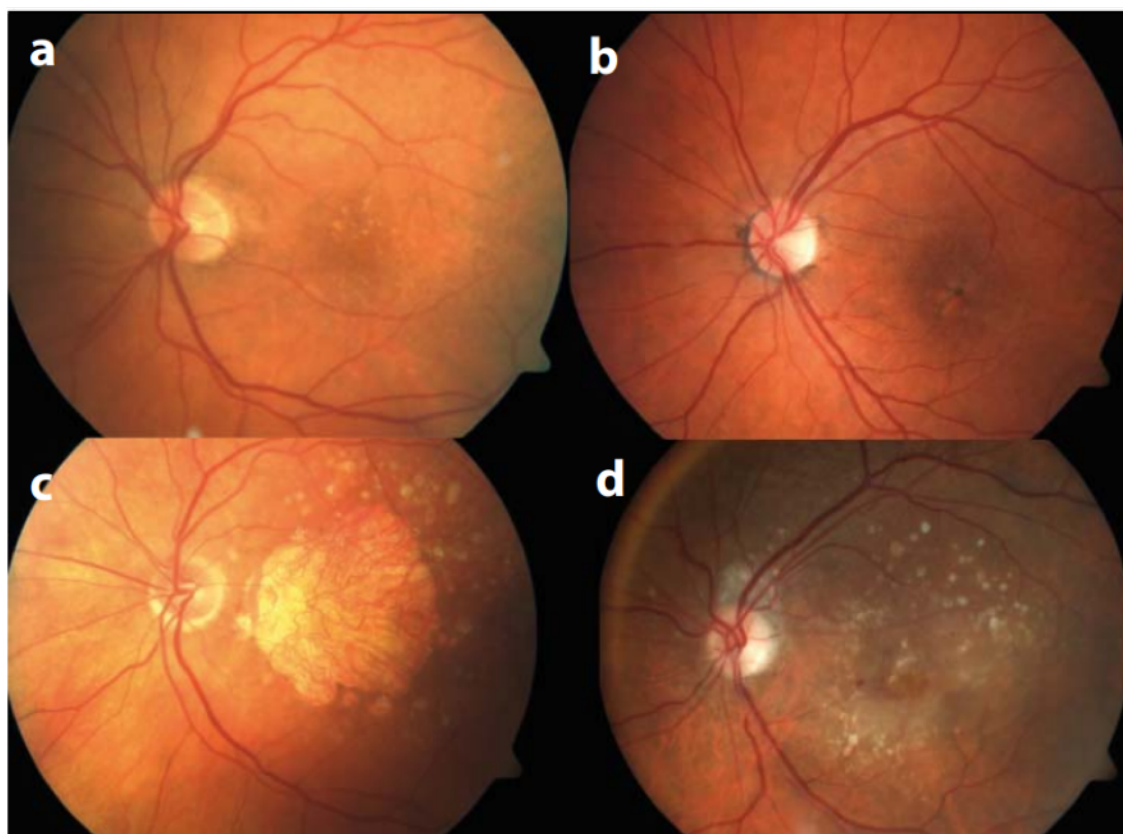
Věkem podmíněná makulární degenerace je progresivní onemocnění, které je nejčastější příčinou ztráty zraku. Vyskytuje se u osob starších 50 let. Vzhledem k rostoucímu počtu seniorů a faktu, že se v moderní době lidé dožívají vyššího věku, se počet pacientů s tímto onemocněním za poslední roky rapidně zvyšuje. VPMD postihuje makulu – centrální část sítnice a způsobuje ztrátu centrálního vidění. Hlavním rizikovým faktorem je tedy věk, ale do značné míry toto onemocnění ovlivňuje i genetická predispozice, vysoký krevní tlak, kouření, špatné stravovací návyky a do jisté míry stres. U pacientů se tato nemoc projevuje postupnou ztrátou ostrosti vidění, horším vnímáním barev a v případě, kdy se tyto příznaky ignorují, se dokáže nemoc rychle rozvinout a pacient přichází o zrak klidně i během půl roku. Tato nemoc se dělí na dvě formy: vlhkou a suchou. U této nemoci dochází k trvalým poškozením zraku, za úspěšnou léčbu se považuje zastavení rozvoje nemoci a předejití tak devastujícím následkům [13].

Rozdělení VPMD

Na základě toho, jak se nemoc projevuje a jaké mají tyto projevy následky a případnou šanci na úspěšnou léčbu dělíme VPMD na dva základní typy. Prvním z nich je **suchá forma** (atrofická, nonexsudativní), která postihuje zhruba 90 % pacientů. Druhá forma se nazývá **vlhká forma** (exsudativní), postihuje menší část populace, ale je mnohem agresivnější. Během velice krátké doby se dokáže rozšířit a vážně narušit zrak pacienta. Ten během krátké doby ztrácí ostrost vidění, přichází o citlivost na barvy a vzhledem k tomu, že tato nemoc poškozuje část makuly, tak přichází i zvýšená citlivost na světelné podmínky. Obě

dvě formy se mohou v průběhu onemocnění kombinovat, a proto je nutné v případě odhalení této nemoci pravidelně docházet na vyšetření, aby se nemoc podařilo zpomalit co nejvíce.

Při pohledu na makulu můžeme toto onemocnění vyzorovat úbytkem pigmentového epitelu a najít drúzy. Drúzy může ve snímku sítnice odhalit i laik, jedná se totiž o žluté, někdy až skoro bílá nebo šedá ložiska v zevních vrstvách sítnice. Dle jejich ohraničení se dělí opět na dva typy: měkké a tvrdé. **Tvrdé** drúzy jsou většinou menší depozita žluté až bílé barvy, která jsou jasně ohraničená. **Měkké** drúzy jsou žluté, někdy až šedavé, naopak neohraničené, v některých případech mohou při pohledu na sítnici splývat a je s nimi spojeno riziko vzniku agresivnější vlhké formy VPMD. Mohou také vést ke vzniku defektu Bruchovy membrány (dále jen BM). Tyto defekty jsou cestou pro průnik novotvořených cév z cévnatky pod pigmentový epitel sítnice (dále jen RPE) [34].



Obrázek 4.1: a) Suchá forma VPMD – drúzy; b) Suchá forma VPMD – dysgrupace pigmentu; c) Geografická atrofie; d) Vlhká forma VPMD [34].

4.2 Diabetická retinopatie

Diabetická retinopatie (DR) je mikrovaskulární a neurodegenerativní onemocnění, které vyvolává změny ve funkci a stavbě všech buněčných struktur sítnice. Vzniká v důsledku mikroangiopatie drobných sítnicových cév a kapilár, jejíž vývoj je podmíněn hyperglykemií – vyskytuje se tedy u pacientů s diabetem. V rozvinutých zemích je diabetická retinopatie a její komplikace hlavní příčinou praktické slepoty u osob ve věku 20–65 let.

První příznaky se projevují u pacientů s diabetem zhruba po deseti letech. Při tomto onemocnění dochází k poškození cév, které mohou mít tendenci nadměrného růstu. Tyto cévy vznikají již poškozené a navíc na nesprávných místech. Pokud u pacienta s tímto onemocněním je nemoc ve fázi, kdy dochází k tomuto růstu, mluvíme o proliferativní formě diabetické retinopatie, která způsobuje postupem času ztrátu zraku. V opačném případě, tedy pokud se zatím netvoří nové cévy, se jedná o neproliferativní formu diabetické retinopatie. Při úplně raných fázích mluvíme o nemoci pouze jako o počínajícím stádiu diabetické retinopatie [28].

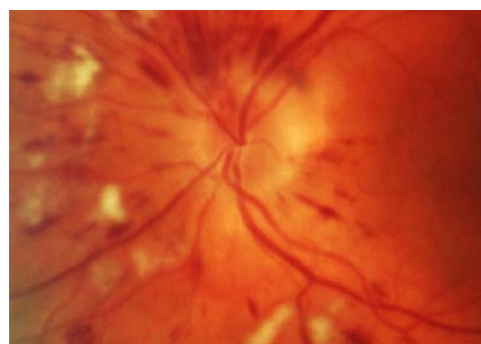
Mikroaneurysmata

Mikroaneurysmata jsou jedním z prvních příznaků počínající diabetické retinopatie. Jedná se o výdutě sítnicových kapilár, k jejichž tvorbě dochází kvůli úbytku pericytů v kapilárních stěnách, které jsou tímto výrazně oslabeny a následně podléhají dilataci. Klinicky mikroaneurysmata vypadají jako okrouhlé červené tečky, které lze poměrně těžce odlišit od tečkovitých hemoragií. Mikroaneurysmata se vyskytují na celém zadním pólu oka, zejména pak temporálně od makuly, a obvykle přiléhají k hranici mezi perfundovanou a neperfundovanou částí sítnice. Při rozšíření neprokrvených sítnicových okřsků postupně vymizí.

Vzhledem k tomu, že mikroaneurysmata mají defektní stěnu, dochází k jejich prosakování, což vede ke vzniku edému a tvrdých exsudátů. Při úplném poškození stěny mikroaneurysmat pak dochází ke vzniku intraretinálních hemoragií [35].

Hemoragie

V sítnici podle lokalizace můžeme rozlišovat několik typů hemoragií na základě jejich vzniku, tvaru, struktury a velikosti. **Tečkovité** intraretinální hemoragie jsou drobné a okrouhlé hemoragie, které se nacházejí ve vnitřní jádrové nebo vnější plexiformní vrstvě sítnice. **Plaménkovité** intraretinální hemoragie jsou větší než tečkovité, jejich průměr však nepřesahuje 1,5 mm. Leží ve vrstvě nervových vláken, především při temporálních cévních arkádách. **Skvrnité** intraretinální hemoragie jsou uloženy hlouběji, na úrovni mezi vnější a vnitřní kapilární sítí sítnice. Tento typ se stává známkou vážnějšího stádia diabetické retinopatie. Příčinou jejich vzniku je nejčastěji prasknutí kapiláry. **Difuzní** hemoragie jsou tmavé hemoragie o velikosti větší než 1,5–3 mm. Jejich resorpce probíhá zvolna během několika měsíců [35].



Obrázek 4.2: Hemoragie plaménkovitá (černá šipka), skvrnitá (modrá šipka) [15].
Obrázek 4.3: Vatovitá ložiska a plaménkové hemoragie [15].

Exsudáty

Exsudáty jsou na první pohled velice podobné drúzám, které patří do projevů VPMD. Stejně jako drúzy je dělíme na tvrdé a měkké na základě jejich odlišných charakteristik. Měkké exsudáty (v literatuře často popisovány jako vatovitá ložiska) jsou podobná chomáčkům vaty. Většinou jsou doprovázeny plaménkovými hemoragiemi a bývají obklopeny mikroaneurismaty. Jejich zánik nastává v průběhu dvou až tří měsíců a místo původního výskytu na sítnici nabírá zvýšený lesk, což se označuje jako příznak vpáčené sítnice. Tvrdé exsudáty nejsou typické pouze pro diabetickou retinopatii, mohou se vyskytovat i při jiných onemocněních. Jedná se o depozita lipidů, proteinů a fibrinu, která se formují při prosakování krevní plazmy z kapilár a mikroaneurysmat. Jsou jasně ohraničená, okrouhlá žlutá až bílá ložiska [35].



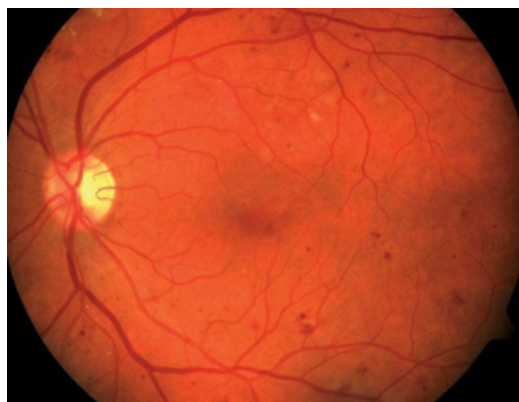
Obrázek 4.4: Tvrdé exsudáty [35].



Obrázek 4.5: Vatovitá ložiska [35].

Neproliferativní forma

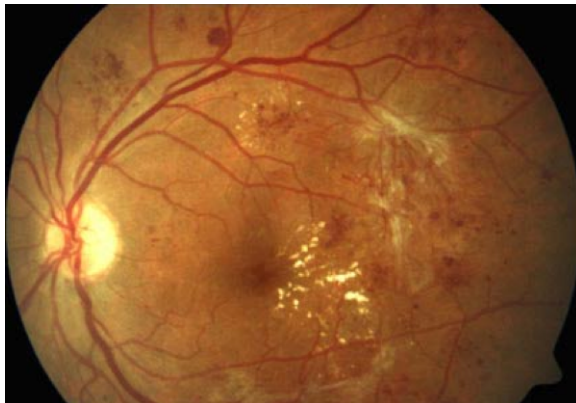
Neproliferativní forma stádium postupu diabetické retinopatie. Projevuje se tvorbou malých mikroaneurysmat, které praskají a prosakováním vznikají hemoragie. Společně s krví dochází k úniku i ostatních látek, jako například bílkoviny, fibrin nebo fibronectin. U této formy můžeme pozorovat tvrdé exsudáty a vatová ložiska. Tato forma se dělí na počáteční, středně pokročilou a pokročilou na základě počtu a rozsahu zmíněných projevů [35] [23] [13].



Obrázek 4.6: Neproliferativní forma [15].

Proliferativní forma

Tato forma se projevuje spíše u diabetiků prvního typu. U této formy hraje roli především čas, protože při včasné diagnóze je v dnešní době v silách lékařů postup onemocnění zastavit. V opačném případě tato forma přináší kritické následky. Charakteristickým jevem je růst kapilár (céva s velmi tenkou stěnou). Stejně jako je tomu při neproliferativní formě, dělíme tento typ na jednotlivá stádia dle jejího rozsahu (jak velkou část plochy zrakového nervu zabírá): počáteční a vysoce rizikovou. Už podle názvu při počáteční fázi lze sledovat prvotní projevy této formy v menším počtu nových kapilár, u vysoce rizikové je tento počet mnohonásobně větší a riziko poškození zraku je téměř jisté [35] [23] [13].



Obrázek 4.7: Proliferativní forma [15].

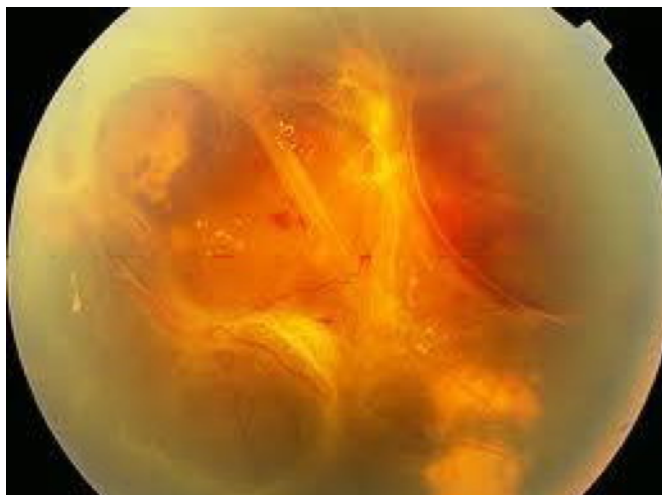
4.3 Další onemocnění

4.3.1 Uzavření sítnicových žil a artérií

Jedná se sice o dvě samostatně klasifikovaná onemocnění, ale vznik je identický. Dochází k nim z důvodu ucpání žíly nebo žil krevní sraženinou, následným nedostatečným prokrvením, krvácením a otokem. Pacient přichází ve velice krátké době (hodiny až týdny) k úplné, nebo částečné ztrátě zraku. Tyto problémy nejsou doprovázeny žádnou bolestí. Při uzavření větví je dost vysoká šance, že pacient při včasné odhalení tohoto problému nepřijde o zrak úplně a následky nebudou až tak vážné, v případě ucpání centrální tepny jsou následky spojené se ztrátou vidění prakticky nevyhnutelné i přes veškerou snahu doktorů [13].

4.3.2 Odchlípení sítnice

Odchlípení sítnice patří mezi závažná onemocnění. Nejčastěji se vyskytuje u lidí středního a vyššího věku, ale věk pro nemoc není nijak podstatný. Spočívá v odloučení senzorické části od pigmentového epitelu, který zůstává fixován v cévnatce. Mezi neuroretinou a pigmentovým epitelem se pak hromadí tekutina, která způsobuje nadzvedávání samotné sítnice. Tento problém vždy znamená závažné narušení fotoreceptorů, kdy se jim nedostává dostatek kyslíku a živin. Fotoreceptory při delší době bez přísunu těchto látek odumírají. Včasnou léčbou je šance, že se velká část fotoreceptorů zregeneruje, v opačném případě při delším trvání bez léčby končí slepotou [22] [31].



Obrázek 4.8: Odchlípení sítnice.

4.3.3 Zánět sítnice

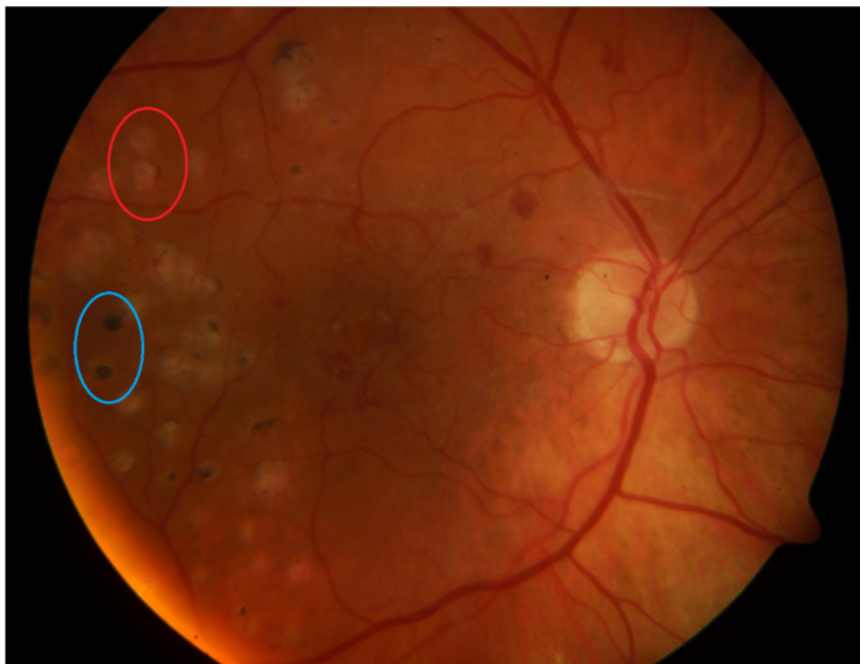
Zánět sítnice se projevuje rozmazaným viděním, pálením očí a pohyblivými skvrnami. Zároveň dochází ke zvýšené citlivosti na světlo a slzení očí. Zánět sítnice oka mohou způsobit viry i paraziti, nejčastější příčinou jsou bakterie. Může vzniknout v souvislosti s celkovými závažnými infekcemi, kdy se zánět dostává do sítnice krví, může rozvinout ale i zcela izolovaně. Velice častým bývá přímé zanesení, kdy si pacient sáhne do oka. Problém zánětu je v tom, že v momentu co se tělo snaží léčit infekci, tak zároveň poškozuje buňky sítnice, což může vést ke zhoršování zraku. Léčí se pomocí antibiotik, pro případy virových zánětů antivirotika, v závažných případech se předepisují kortikoidy.

4.4 Laserová léčba

Jednou z metod léčby očních onemocnění, při kterých dochází k poškození či vzniku poškozených cév je laserový zákrok. Jedná se sice o destruktivní metodu způsobující změny v oblasti sítnice oka, vyvolává hodně diskuzí o její šetrnosti, rizicích a efektivitě, ale i přes to se jedná o jednu z nejúčinnějších a stále nejvíce používaných metod. Její hlavní výhodou jsou totiž dlouhodobé a často i trvalé výsledky této léčby.

Laserový paprsek je fokusován přímo na sítnici do poškozené oblasti a vzniklé teplo v místě dopadu paprsku koaguluje cílové buňky a tkáň. Díky tomu se u pacienta daří zastavit krvácení a úniku tekutin do oblasti sítnice z porušené cévy. Tento postup sebou nese fyzické změny v oblasti sítnice. Můžeme je zpozorovat i v samotných snímcích. U pacienta po zákroku vzniká v cílové ošetřované oblasti jizva, která postupem času tmavne. Ze začátku jsou změny prakticky nepozorovatelné, v obrazu lze místa zákroků po laserovém zásahu zpozorovat světlá průsvitná kulovitá místa. A postupem času (v řádu měsíců a let) postupně tmavnou. Čím je pacient starší, tím je místo na kterém bylo provedeno ošetření tmavší. Pokud tedy bylo pacientovi ošetřováno místo kde se vyskytuje původní cévní řečiště, je vysoce pravděpodobné, že v průběhu několika let na snímcích sítnice bude v tomto místě vznikat překrytí cévního řečiště jizvou a při pokusech o extrakci z těchto snímků zde bude vznikat přerušení. Tento nežádoucí vedlejší efekt léčby je vyhledáván a zahrnut při řešení

rekonstrukci krevního řečiště. Příklady rozdílu vzhledu ošetřených oblastí v závislosti na čase od provedení zákroku je možné vypořádat na snímku níže [5]



Obrázek 4.9: Mladší jizva (červená barva), starší jizva (modrá barva) [15].

4.5 Shrnutí vlastností nemocných sítnic

V této kapitole byly popsány neznámější onemocnění a podrobně rozepsány jejich projevy v oblasti sítnice oka. Při zkoumání dostupných databází snímků nemocných sítnic jsem se zaměřoval na projevy, které mají lokální charakter a způsobují přerušování sítnice oka, respektive ve snímku způsobují situace, kdy cévní řečiště v oblasti výskytu jednotlivých příznaků není viditelné. Při onemocněních jako je odchlípení sítnice, zánět anebo prasknutí sítnice se bohužel příznaky projevují buď velice specificky, nebo v takovém rozsahu, kdy velká část snímku je poškozená natolik, že by nešlo provádět rekonstrukci. Případů, kdy by poškození bylo natolik lokální, aby bylo možné provádět rekonstrukce není tolik, takže tyto nemoci nejsou ve výsledné práci zohledňovány.

Naopak projevy VPMD a diabetické retinopatie se prokázaly jako dobře definovatelné, dohledatelné a ve snímcích sítnic mohou v některých případech zasahovat do obrazu sítnice a při extrakci vytvářet přerušování cévního řečiště (alespoň z hlediska snímku, v realitě k přerušování cév nedochází). U obou onemocnění se navíc projevují podobné změny v obrazu sítnice a je možno je dobře pomocí známých technik pro zpracování obrazu vyhledat. Těmito onemocněními a jejich detekcí se v minulosti zabývaly bakalářské a diplomové práce, takže je možné čerpat ze znalostí a výsledků těchto prací. K samotným onemocněním se pojí i následná léčba, kdy jsou oční sítnice nejčastěji ošetřovány laserovým paprskem. Na oku sítnice tak vznikají jizvy, které v průběhu let tmavnou. Tento fakt opět způsobuje situace, kdy nově ošetřené části se v zeleném kanále (ze kterého se nejčastěji provádí extrakce řečiště) jeví jako přerušované protože splývají s pozadím.

Kapitola 5

Techniky zpracování obrazu

V předchozí kapitole byly popsány oční choroby sítnice lidského oka, jejich příčiny, léčba a nejvíce důležitá část – jejich projevy v rámci snímků sítnice oka. Tyto znalosti nám poslouží při návrhu algoritmu.

Druhou nedílnou součástí je znalost technik z oblasti zpracování obrazu. Pokud díky teoretickým znalostem známe, jak se projevují jednotlivé nemoci a co chceme v obrázku hledat, potřebujeme znát i metody a postupy, jak tyto části ve snímku najít. Na vstupu máme digitální snímek, který může obsahovat hned několik nežádoucích zkraslení vzniklých při samotném snímání obrazu. Tyto záležitosti je nutné eliminovat před samotným zpracováním a začátkem vyhodnocování, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků. K dosažení tohoto cíle je možno využít například metody vyhlazování obrazu či morfologické operace. Poté se při samotném algoritmu využívají další metody známé pod názvy Haughova transformace, prahování, semínkové vyplňování nebo matematické momenty.

Tato kapitola popisuje principy a fungování známých algoritmů zpracování obrazu, které byly využity pro návrh a implementaci programu a dále popisuje princip algoritmů pro extrakci krevních řečišť ze snímků sítnice. Tyto algoritmy jsou tvořeny různou kombinací základních operací a ve výstupu poskytují černobílý obrázek, ve kterém jsou cévy bílé, pozadí černé.

5.1 Vyhlazování obrazu

Prakticky v každém snímku se objevuje nežádoucí jev známý pod výrazem šum. Nejčastěji je viditelný ve formě zrnění. Pro řešení tohoto problému se používají techniky vyhlazování obrazu. Existuje hned několik různých metod, kdy každá se liší svou výpočetní náročností a především efektivitou pro odstranění různých druhů šumu.

5.1.1 Průměrování

Průměrování je jedním z nejjednodušších způsobů vyhlazování obrazu. Jedná se o konvoluci masky s obrazem. Každý pixel překrytý maskou je nejprve vynásoben zvolenou konstantou a hodnota nově vypočítaného pixelu je určena jako průměr hodnot těchto jasů. Výška a šířka masky je libovolná, nejčastěji se ale používají velikosti od 3×3 do 9×9 pixelů. Při větších maskách už dochází k většímu ovlivnění a ztrácí se hodně detailů [16].

5.1.2 Gaussovo vyhlazování

Gaussovo vyhlazování (rozostření) je založeno na podobném principu jako předchozí metoda. Gaussovo vyhlazování může být použito pro vstupní snímek k odstranění šumu, ale i při dalším zpracování, kdy nás například nezájímají drobné detaily v obraze. Jedná o metodu odstranění šumu pomocí konvoluce masky s obrazem, hodnoty masky jsou místo konstant získávány na základě Gaussovy funkce. Gaussova funkce pro dvojrozměrnou matici s osami x, y má tvar:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

Na parametru σ^2 závisí strmost Gaussovy funkce, neboli jak rychle bude klesat vzhledem ke vzdálenosti od středu. Výsledek je tedy tvořen konvolucí každého vstupního bodu s vypočítanou maskou získanou Gaussovou funkcí a sčítáním hodnot překrytých maskou [4].

5.2 Prahování

Prahování (thresholding) je nejjednodušší a zároveň jednou z nejpoužívanějších metod využívaných pro segmentaci obrazu na základě jeho intenzity. Jedná se o metodu převodu obrazu ve stupních šedi na černou a bílou. Je založena na porovnání všech pixelů v obraze oproti dané hodnotě (prahu). Všechny pixely, které mají hodnotu nižší než je práh, jsou černé, ostatní bílé. Metoda sama o sobě je rychlá a jednoduchá, ale relativně destruktivní pro výsledný obraz. Pro určité typy obrazů a situace, kde je cílem získat oblasti v obraze se jedná o vysoce spolehlivou metodu. Dle toho, jak je hodnota prahu určena, dělíme tuto metodu na několik typů.

Základní prahování probíhá způsobem, kdy je pro celý obraz určena jedna statická hodnota prahu, všechny pixely jsou oproti této hodnotě porovnávány.

Adaptivní prahování se liší od základního tím, že se hodnota prahu může lišit pro různé části obrazu. Cílem této metody je zamezit špatným výsledkům v případech, kdy se v obraze nachází části s výrazně odlišnou světelností. Obraz je nejdříve segmentován do částí, pro každou část je vypočítána prahová hodnota (prahy jednotlivých oblastí mohou být interpolovány – záleží na algoritmu) a pro každou tuto část se provádí prahování oproti hodnotě určené pro danou oblast [3].

5.3 Morfologické operace

Matematická morfologie vychází z vlastností bodových množin. Nejčastěji se aplikuje na binární obrazy, ale lze ji snadno zobecnit i na šedotónové a barevné obrazy. Morfologické operace se používají pro předzpracování (odstranění šumu, zjednodušení tvaru objektů), zdůraznění struktury objektů (kostra, ztenčování, zesilování, konvexní obal, označování objektů). V našem případě nám tedy mohou velice dobře posloužit při hledání různých vlastností v obrazech s cévními řečišti.

Morfologické operace jsou realizovány jako relace obrazu (bodové množiny X) s jinou menší bodovou množinou B (maskou). Morfologickou transformaci si lze představit jako určitý systematický pohyb strukturního elementu B po obrazu X a vyhodnocení odezvy podle typu operace. Mezi dvě základní morfologické operace patří dilatace a eroze. Dále jsou známy také operace otevření a uzavření. Poslední metoda, která je v této kapitole popsána

je známá pod názvem Hit-or-Miss. Slouží k vyhledání různých vlastností v binárním obraze (v našem případě použita pro vyhledání koncových bodů cév).

Dilatace skládá body dvou množin pomocí vektorového součtu. Objekty v obraze jsou po aplikaci dilatace zvětšené o jednu „slupku“ na úkor pozadí. Dilatace se používá k zaplnění děr popř. zálivů a její definiční vztah je dán následujícím vzorcem [10]:

$$X \oplus B = \{d \in E^2 : d = x + b, x \in X, b \in B\} \quad (5.2)$$

Eroze skládá dvě bodové množiny s využitím vektorového rozdílu. Je duální (nikoliv inverzní) transformací k dilataci a používá se pro zjednodušení struktury objektů. Objekty jednotkové tloušťky (relativní jednotka) zmizí a složité objekty spojené čarami jednotkové tloušťky se rozloží na několik jednodušších objektů. Eroze je dána následujícím vztahem [10]:

$$X \ominus B = \{d \in E^2 : d + b \in X \text{ pro } \forall b \in B\} \quad (5.3)$$

Hit-or-Miss indikuje shodu složeného strukturního elementu a částí obrazu. Používá se složený strukturní element $B = (B_1, B_2), B_1 \cap B_2 = \emptyset$. Transformace indikuje shodu složeného strukturního elementu a částí obrazu. B_1 testuje shodu s objekty, B_2 shodu s pozadím. Transformaci je možno vyjádřit pomocí eroze a dilatace vztahem [9]:

$$X \otimes B = (X \ominus B_1) \cap (X^c \ominus B_2) = (X \ominus B_1) \setminus (X \oplus B_2) \quad (5.4)$$

Další morfologické operace jsou otevření a uzavření a jsou to operace, které vzniknou vzájemnou kombinací elementárních operací dilatace a eroze. Výsledkem obou je zjednodušený obraz, který obsahuje méně detailů (odstraní detaily menší, než strukturní element, celkový tvar objektu se ale neporuší). Eroze následovaná dilatací se nazývá **morfologické otevření**. Oddělí objekty spojené úzkou šjíjí a tak zjednoduší strukturu objektů. Dilatace následovaná erozí se naopak nazývá **morfologické uzavření**. Spojí objekty, které jsou blízko u sebe, zaplní díry a vyhladí obrys [9] [10].

5.4 Houghova transformace

Houghova transformace je používána především pro segmentaci objektů, jejichž hranice lze popsat jednoduchými křivkami. Tato transformace zpočátku dokázala hledat pouze přímky, později byla rozšířena dodatečnými kroky pro najetí úseček či jiných vlastností, jako je třeba kruh nebo elipsa. Bod v Houghově prostoru (x, y) je suma obrazových bodů objektu s parametry x, y . Pro každý bod v Houghově prostoru se hledá přímka, které body jí náležejí. Každý bod obrázku je započten do všech přímek, kam náležejí. To pak tvoří sinusoidu v Houghově prostoru. Výpočet této transformace je náročný, trvá několik sekund až minut vzhledem k rozlišení transformovaného obrazu. Hlavní výhodou této metody je robustnost vůči nepravidelnostem a porušení hledané křivky [20].

5.5 Semínkové vyplňování

Semínkového vyplňování je klasický algoritmus pro vyplňování rastrových oblastí. Vyplňovaná oblast Ω je popsána v rastrové matici, spojitou množinou podobných (stejných) pixelů tvořících hranici nebo spojitou množinou podobných (stejných) pixelů tvořících oblast. Nemáme k dispozici orientovaný seznam hraničních entit, takže není možné určit, co je uvnitř

a co vně oblasti. Proto se musí na počátku zadat startovací bod (semínko), které určí co je uvnitř oblasti. Základní myšlenkou Semínkového vyplňování je obarvování sousedních pixelů (4 nebo 8) od daného semínka. Obarvené pixely se rekurzivně stávají dalšími semínky. Pixely, které představují hranici oblasti nebo nemají vlastnosti oblasti, se vyhazují [16].

Obecný algoritmus

Obecný postup vyplňování dané rastrové oblasti Ω semínkovým algoritmem s vlastním zásobníkem pro semínko $S[x, y]$ je pak následující:

1. Testování sousedních pixelů aktuálního semínka (4 nebo 8 podle typu vyplňování), jestli jsou ještě neobarvené a patří do dané oblasti Ω .
2. Obarvení vyhovujících sousedních pixelů a jejich vložení do zásobníku.
3. Získání nového semínka z vrcholu zásobníku a návrat k bodu 1.
4. Konec, pokud je zásobník prázdný.

5.6 Vzorce pro ohodnocení koncových bodů

Rozšířený arkustangens

Při získávání informací pro ohodnocení koncových bodů je potřeba zjistit směry cév, kterým ve svém koncovém bodě směřují. Ke zjištění úhlu mezi dvěma body je vhodné využít funkce označované v programovacích jazycích názvem `arctg2`. Jejimi vstupy jsou parametry x a y , kde parametr x i y je vždy rozdílem souřadnic dvou bodů, které nám popisují vektor cévy v jejím konci. Tato funkce nám vrací hodnoty v intervalu $(-\pi; \pi)$. Funkce je definována následujícím předpisem:

$$\text{arctg2}(y, x) = \begin{cases} \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right), & \text{je-li } (x > 0) \wedge (y \geq 0), \\ \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, & \text{je-li } (x < 0), \\ \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) + 2\pi, & \text{je-li } (x > 0) \wedge (y < 0), \\ \frac{\pi}{2}, & \text{je-li } (x = 0) \wedge (y > 0), \\ \frac{3}{2}\pi, & \text{je-li } (x = 0) \wedge (y < 0), \end{cases} \quad (5.5)$$

Vzdálenost mezi dvěma body

Dalším parametrem pro ohodnocení, který program využívá je zjišťování vzdálenosti dvou bodů v 2D prostoru. Tato informace nám poslouží jak k určení pořadí řešených přerušovaných částí, tak k ohodnocení kvality spojení. Tento výpočet je dán následujícím vztahem:

$$|AB| = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (5.6)$$

5.7 Algoritmy pro extrakci krevních řečišť

Přesné a automatizované extrahování cévních řečišť je považováno za jeden z nejsilnějších nástrojů jak pro diagnostiku retinálních poruch, tak pro biometrické účely. Krevní cévy

mají v obraze odlišný kontrast, což je vlastnost, díky které je pomocí kombinací metod popsaných výše můžeme extrahovat. Dalším parametrem je samotná šířka extrahovaných cév. V jednodušších algoritmech probíhá extrakce v jednom kroku z předzpracovaného snímku, u složitějších zpravidla v několika iteracích, kdy se každá iterace zaměřuje na extrakci cév různých typů (tloušťka, intenzita, tvar). Důvodem pro víceprůchodovou extrakci je fakt, kdy čím jsou cévy širší (blíže slepé skvrně), tím jsou v obraze tmavší. Problémy tak nastávají u tenkých cév, kde jejich kontrast prakticky splývá s okolím, a proto v posledních dvou desetiletích vzniklo hned několik návrhů a metod, jak při extrakcích krevního řečiště postupovat. Tato kapitola popisuje princip nejznámějších postupů jak extrahovat řečiště. Základní, pro obecné použití ne příliš vhodné z důvodu vzniku artefaktů při nekvalitních či nemocných snímcích, a další dvě metody, které vykazují úspěšnost množství extrahovaných cév i nad 90 %. Pokud algoritmus extrahuje takovýmto způsobem, je možné uvažovat možnost případné rekonstrukce.

Jednoduché prahování s předzpracováním

První algoritmus využívá pouze histogramu snímků řečiště. Ten má často nehomogenní osvětlovací podmínky. Proto na začátku probíhá předzpracování pomocí homomorfního filtru. Poté je spočítána prahová hodnota a následně se pomocí metody prahování vyfiltruje řečiště. Po kroku prahování je nutná korekce vzniklého černobílého obrazu, kde díky všudypřítomnému výskytu abnormalit ve snímku sítnic vzniká při operaci prahování šum. Odstranění se provádí pomocí jemného rozostření (Gaussovým filtrováním), doplněného korekcí, kdy se z vyfiltrovaného snímku vezmou všechny bílé objekty a zkoumá se jejich obsah. Všechny objekty s nižším obsahem než je určeno se vylučují, opačné se nechávají a jsou prohlašovány za části krevního řečiště. Protože v cévních řečištích občas vznikají mezery, je možno proces extrakce na závěr doplnit o provedení morfologické operace uzavření. Ta nám vyplní objekty cév narušených šumem, který vznikl při prahování.

Tato metoda dokáže být poměrně lehce implementovatelná, je výpočetně nenáročná a z časového hlediska i rychlá. Její hlavní nevýhodou jsou špatné výsledky v případě nekvalitních nebo nemocných snímků sítnic, kde dochází k ovlivnění při určení prahu, a navíc při samotné operaci filtrování vlivem projevů nemocí (např. drúz, exsudátů) se část řečiště vůbec nevyfiltruje. Dle zdroje [18] při filtrování z dostupných databází obsahujících zdravé i nemocné snímky tento přístup vykazuje úspěšnost kolem 70–80 %. K účelu této práce, kdy pro rekonstrukci řečiště je potřeba co nejvíce vyfiltrovaných cév z důvodu samotné možnosti provádět rekonstrukci jsou algoritmy extrakce řečiště založené na tomto jednoduchém přístupu nepoužitelné.

Edge Enhancement and Edge Detection (EEED)

Jak bylo popsáno v předchozí metodě, příliš jednoduchý přístup s minimálním předzpracováním založen na filtrování neposkytuje ve snímcích, které mají špatné světelné podmínky, anebo se v nich nachází projevy nemocí, příliš dobré výsledky. Cílem tohoto algoritmu je zvýšit kontrast cév a současně rozptýlit další abnormální rysy přítomné v obraze sítnice.

V prvním kroku se na vstupní obraz provede Gaussovo rozostření. To nám poskytne ztrátu drobných detailů. Tím nám vzniká nový, rozmazaný obraz. Z původního vstupního snímku a nově získaného se následně vytváří nový snímek použitý pro další operace. Každý pixel nově tvořeného snímku se vybere jako minimální hodnota intenzity každého pixelu. Tato operace způsobuje, že hrany cév mají v nově vzniklém snímku nižší intenzitu a tím pádem jsou výraznější.

V dalším kroku se pomocí aplikace Laplaceova Gaussovského filtru zvýší kontrast cév a potlačí abnormální obrazové vlastnosti. Díky předchozímu předzpracování a provedení tohoto filtru mají nyní cévy výrazně vyšší kontrast a pozadí více potlačenou intenzitu oproti cévnímu řečišti.

V posledních podstatných krocích je možno opět provést extrakci pomocí aplikace filtrování a získat základní binární strom cévního řečiště. Díky důkladnějšímu předzpracování (zvýraznění hran, potlačení pozadí) tato metoda poskytuje mnohem lepší výsledky i pro případy abnormálních snímků sítnic a získáváme větší část krevního řečiště. Dodatečně se provádí eliminace šumu Gaussovským filtrem doprovázeného vyloučením oblastí s malým obsahem. Tato metoda může dosahovat úspěšnosti extrakce až zhruba kolem 90 % [18].

Continuation Algorithm (CA) s Matched Filters (MF)

Jednou z nejčastěji citovaných technik je extrakce krevního řečiště za pomoci metody Matched filters. Tato technika je založená na odezvě vstupního obrazu na 2D filtr. Odezva vzniká konvolucí jádra s vstupním obrazem. Cílem pro úspěšné provedení tohoto kroku je tedy specifikovat filtr co nejpřesněji tak, aby bylo následnou odezvou získáno co nejvíce krevního řečiště bez výrazných ztrát. Zde se právě nachází největší nevýhody této metody. Cévy nejsou v rámci celého řečiště stejné. Silnější cévy jsou tmavší, nemění směr tak prudce jako tenčí, navíc se v jejich středu může objevovat světlý pruh z důvodu odrazu světla. Naopak tenké cévy mají mnohem vyšší intenzitu, která často skoro splývá s pozadím a jejich směr se může prudce měnit.

Z toho vyplývá, že pomocí jednoho filtru se nám nikdy nemůže podařit dosáhnout uspokojivých výsledků bez vzniku nechtěného šumu a ztráty tenčích cév. Pomocí jednoho jádra prakticky není možné specifikovat strukturu cév tak podrobně, jak by bylo potřeba. Extrakce tlustých, tenkých a středně velkých cév vyžaduje v této filtrační technice filtry různých velikostí. Různé binární obrazy získané s různými rozměry a odlišnými orientačními jádry v odpovídající filtrační technice jsou tedy kombinovány tak, aby poskytovaly obraz binárního stromového stromu, ale kromě toho jsou vždy požadovány některé techniky filtrování šumu pro odfiltrování segmentů, které nejsou součástí řečiště. Plná automatizace shodné filtrační techniky vyžaduje pečlivý výběr jader různých velikostí a orientací a samozřejmě i techniku filtrování šumu.

Bohužel i přes největší úsilí má extrakce pomocí skládání několika obrazů získaných metodou MF neuspokojivé výsledky a nevýhody. Jedním ze základních nedostatků je nespojitost vzniklá díky nezachycení všech částí řečiště, zejména tam, kde jsou cévy velmi tenké, nebo v místech, kde se nachází projev nemoci sítnice. Kvůli vzniku těchto mezer by v obraze vznikalo hodně nespojitých částí, a pokud bychom se snažili tento problém řešit při následných krocích odstraněním malých segmentů, tak by se stávalo, že situace by byla jen zhoršena a cévní řečiště by bylo v oblastech tenkých cév přerušované. Tato situace by ve snímcích eskalovala do stádia, kdy máme vyfiltrované řečiště, které není kompletní a obsahuje velké mezery, zvláště na stranách, kde tenké cévy končí. V rámci řešení této práce by se zde tedy nacházelo mnoho problémových částí, které by se snažil algoritmus rekonstruovat. Tento problém je ale známý a v praxi se extrakce cévních řečišť touto metodou kombinuje s dalším algoritmem. Ten je známý pod názvem Continuation Algorithm (CA).

Tato technika dokáže kompletovat menší fragmenty krevního řečiště. Zároveň ignoruje části, které nejsou součástí řečiště (šum při výstupech extrakce tenkých cév pomocí MF). Algoritmus se aplikuje na dva binární obrazy, z nichž jeden obsahuje tenké cévy a druhý širší cévy. Oba binární obrazy mohou být generovány způsobem, který dokáže extrahovat

tenké nebo široké cévy, přičemž nevadí, že mezi tenkými cévami bude šum. Ten se v průběhu algoritmu eliminuje. Existuje hned několik řešení a kombinací vstupů tohoto algoritmu.

Časté řešení jsou takové, že se pomocí metody EEED extrahuje cévní řečiště, toto řečiště je bráno jako referenční a dává se CA jako první vstupní obraz. Jako druhý se dá na vstup výstup z MF a získá se výsledný obraz. Tuto metodu je možné aplikovat v několika iteracích, vždy záleží, jak dobře jsou specifikovaná jádra při MF. Dle [18] se při správném postupu dokázaly některé implementace dostat k úspěšnosti kolem 92 %.

Druhým zmiňovaným řešením je aplikování CA pouze s výstupy MF. U tohoto řešení je ale předpoklad, že metoda MF bude mít správně specifikovanou a velkou sadu filtrů pro její konvoluci. Zde se už ale musí počítat, že operace bude časově i výpočetně náročná. Na druhou stranu, dle [18] bylo uvedeno, že při správně zvolených filtrech se podařilo implementacím tohoto přístupu dosáhnout u některých snímků výsledků dosahujících až k 98 % extrahovaného řečiště.

Kapitola 6

Návrh algoritmu

Před provedením samotné rekonstrukce je potřeba se snímkem provést hned několik operací pro zvýraznění podstatných částí a získání informací, které budou použity při samotném rozhodování o tom, kde se snažit rekonstruovat. Tyto kroky zahrnují předzpracování vstupního obrázku, získání obecných informací (rozlišení, formát), lokalizaci masky pozadí, slepé skvrny či fovey. Dále je nutné ze vstupního extrahovaného řečiště získat informace potřebné pro vyhodnocení klasifikátorem přerušných míst. Po provedení těchto kroků je možno se pustit ke hledání přerušných částí, vyhodnotit kam přerušnou část napojit a pokusit se zjistit, zda přerušnění je způsobeno některým z detekovaných nežádoucích vlivů.

6.1 Shrnutí důvodů vzniku přerušnění

Po nastudování výstupů dostupných algoritmů pro extrakci cévního řečiště bylo zjištěno a vyhodnoceno, že jsou základní dvě příčiny vzniku přerušnění.

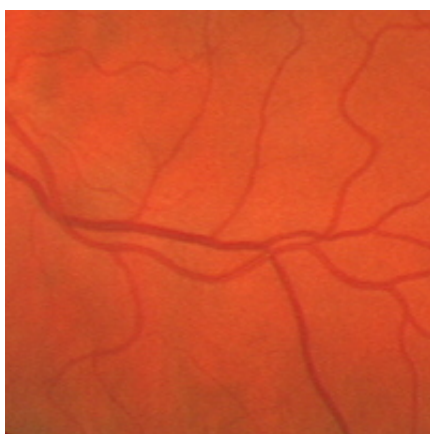
Přerušnění vlivem chyb algoritmů

Jedním z častých důvodů přerušnění krevního řečiště je samotná chyba algoritmů při extrakci cévního systému. Tyto přerušnění jsou zpravidla několik jednotek pixelů, ale při studiu extrahovaných řečišť bylo nalezeno mnoho případů, kdy řečištěm chyběla až polovina cév. V takových situacích se snažit o rekonstrukci chybějících částí nedává smysl, protože vzniká několik desítek možností, kam cévy napojit. Při řešení této práce se pracovalo s databázemi a snímky, nad kterými byl použitý algoritmus testovaný a vykazoval akceptovatelné výstupy pro možnosti rekonstrukce. Tyto chyby mohou vznikat vlivem následujících faktorů:

- Snímek byl před samotnou extrakcí předzpracován (nejčastěji metoda rozostření). Ta způsobuje v místech tenkého řečiště či špatných světelných podmínkách jeho vytracení a následná detekce poté v těchto místech nic nenachází, vzniká tak přerušnění.
- Relativní chyba algoritmů. Jak bylo popsáno v kapitole 5.6 zabývající se různými přístupy pro extrakci cévních řečišť, výsledné řečiště je vnikem složení několika různých řečišť, kdy každé obsahuje cévy odlišných šířek a tvarů. Pokud nemá algoritmus zahrnutou dostatečně bohatou škálu filtrů pro extrakci, některé části nejsou detekovány a opět vzniká přerušnění, zde už může být veliké i v řádu desítek pixelů.

- Vlivem dodatečných úprav. Algoritmy pro extrakci řečišť mají v posledních fázích snahu řečiště co nejvíce zkrášlit. V tomto kroku se aplikují operace zúžení, vyhlazování nebo také opět rozmazání. Ve většině případů tyto operace mají svůj smysl, občas ale i negativní vliv na výsledné extrahované řečiště, jelikož se z obrazu vytratí podstatné informace. Ty mají za následek vznik malých přerušení.

Všechny výše zmíněné chyby se v extrahovaném řečišti projevují podobným způsobem, přerušením spojitosti řečiště. Tyto přerušení se dají už od pohledu na extrahované řečiště detekovat. Většinou přeruší cévu na pár pixelů a céva poté dále pokračuje. Proto je možné na základě vzdálenosti a směrů přerušených cév v koncových bodech nalézt místa, které na sebe s nejvyšší pravděpodobností mají navazovat.



Obrázek 6.1: Vstupní obrázek.



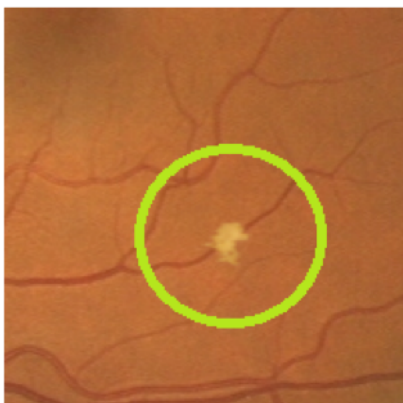
Obrázek 6.2: Výsledek extrakce.

Přerušení vlivem projevů onemocnění

Zpravidla se exsudáty, drúzy a hemoragie tvoří mimo původní cévní systém, jelikož vznikají únikem tekutin do oblastí oka z nově prorostlých porušených cév (viz. kapitola 4). Jelikož je jejich únik postupný a ne vždy léčba započne hned v počátku, může rozměr těchto vzniklých ložisek zakrýt původní cévní systém. Céva není nijak porušena, ale ve snímku dochází k jejímu překrytí a po extrakci algoritmem vzniká přerušení. Při studiu extrahovaných snímků bylo zjištěno, že přerušení vzniká v případě, kdy je céva zakryta exsudátem anebo drúzou. Vliv projevu onemocnění ze snímku 6.3 na extrakci je možno vidět na obrázku 6.4. Při extrakci pomocí Matched filters není v problémovém místě žádná odezva s jádrem představujícím vzor cévy – vzniká přerušení.

V případě výskytu hemoragií touto metodou přerušení nevzniká, jelikož tyto projevy mají v zeleném kanále menší intenzitu než cévy, a při konvoluci jádra se snímkem vzniká dostatečná odezva. U snímků, které obsahovaly stopy po laserovém ošetření, se bohužel dostupné algoritmy chovaly velice náhodně, většinou se jednalo o snímky v pokročilém stádiu nemoci, kde algoritmy vykazují velkou chybovost. Ta se projevuje falešnou detekcí cév (za cévy jsou označena místa, kde se céva nevyskytuje), nebo v místě výskytu jizev je řečiště značně porušené (vzniká několik desítek přerušení). Až při podrobném studiu extrahovaných snímků nemocných sítnic se došlo k závěru, že ošetření sice způsobují reálné přerušení cév, ale z hlediska pokusů o hledání těchto oblastí jsou tyto projevy těžko dohledatelné vzhledem ke kvalitě výstupů dostupných algoritmů.

Přerušeni vlivem exsudátů či drúz se tedy v extrahovaném řečišti projevují prakticky stejným způsobem, jako při chybách algoritmů. Céva je z ničeho nic přerušena a o pár pixelů dál pokračuje. Proto je možné na základě informací, které se algoritmus snaží získat v části 6.9 udělat klasifikátor, který se bude díky získaným informacím z extrahovaného řečiště pokoušet o vyhledání těchto situací a napojení přerušených částí řečiště.



Obrázek 6.3: Výskyt exsudátu.



Obrázek 6.4: Výsledek extrakce.

6.2 Úprava rozlišení a definice parametrů

Vzhledem k tomu, že každá databáze má odlišné rozlišení snímků a v rámci zpracování obrazu se provádí různé operace iterující skrz celý obrázek pixel po pixelu, velkým přínosem pro optimalizaci a zvýšení rychlosti výpočtů je v případě velkého rozlišení vstupního snímku snížení této vzorkovací frekvence. Při experimentování s časem výpočtů u jednotlivých operací algoritmu bylo zjištěno, že do šíře zhruba 2 400 pixelů výpočty trvají přijatelně dlouhou dobu (jednotky až desítky sekund). Naopak při vyšších rozlišeních se doba výrazně prodlužuje, a při snímcích obsahujících hodně přerušeni se zpracování jednoho snímku pak provádělo i několik minut. U databází obrázků s šířkou vyšší než 2400 pixelů je tedy vhodné databázi před zpracováním upravit a jejich rozlišení zmenšit na polovinu. Nad tímto snímkem poté pomocí externího programu provést extrakci cévního řečiště a oba tyto snímky (originální snímek sítnice a snímek extrahovaného řečiště) dát algoritmu na vstup.

Při zpracování obrazu je nutné vzhledem k šířce snímků vhodně měnit velikost matic používaných při filtrování. Algoritmus na začátku detekuje šířku obrázku, pokud je vyšší než 2400 pixelů požaduje po uživateli snížení tohoto rozlišení. Na základě šířky snímku je vybrána sada matic pro filtrování, a jsou také současně nastaveny i parametry maximálních vzdáleností pro vyhledávání míst přerušeni. V tabulce 6.1 se nachází výčet všech parametrů, které jsou nastaveny na základě rozlišení snímku.

Šířka (px)	Velký filtr (px)	Malý filtr (px)	Max 1 (px)	Max 2 (px)
1901–2400	13 × 13	9 × 9	150	50
1401–1900	11 × 11	7 × 7	150	50
901–1400	9 × 9	5 × 5	100	35
1–900	7 × 7	3 × 3	80	25

Tabulka 6.1: Přehled parametrů, které využívá algoritmus.

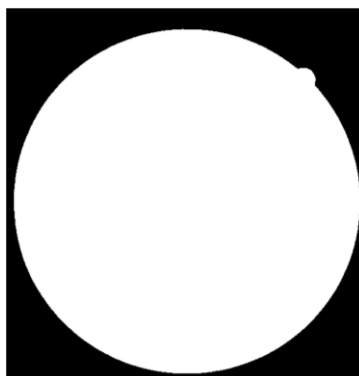
6.3 Lokalizace masky pozadí

Maska pozadí nám umožňuje rozdělit snímek na dvě oblasti: oblast samotné sítnice a její okolí (ve většině případů se jedná o černý rámeček kolem samotného oka). Lokalizace této oblasti má hned několik výhod. Jedná se například o urychlení samotného výpočtu jednotlivých operací, kdy není nutné v této oblasti provádět jakékoliv operace. Navíc, při některých operacích okolí sítnice negativně ovlivňuje například určení prahu při okrajích snímku. Proto je nutné oblast pozadí ve snímku detekovat a vyloučit z dalších kroků zpracování obrazu.

Lokalizace masky pozadí je vcelku jednoduchá záležitost. Vstupní originální snímek se převede do stupňů šedé. Z oblastí, kde si můžeme být jisti, že se nenachází sítnice, zjistíme intenzitu rámečku, která bude prahovou hodnotou pro operaci filtrování. Ve snímcích sítnice jsou těmito oblastmi rohy obrázku. Z každého rohu obrázku se vezme čtvercová oblast o velikosti jedné desetiny výšky a šířky vstupního snímku. Pro každý roh je zjištěna intenzita a ta se zprůměruje se zjištěnou intenzitou ostatních rohů obrazu. Tím získáme hodnotu intenzity rámečku. S touto hodnotou se provede jednoduché binární prahování. Posledním krokem je samotná identifikace masky pozadí. Pro tento krok nám stačí ve výstupním snímku operace prahování nalézt všechny kontury, které operací vznikly. Z nich už stačí vzít tu největší, která je vždy hledanou maskou pozadí. Výsledek této operace je možné vidět na obrázku 6.5 a 6.6.



Obrázek 6.5: Originální snímek.



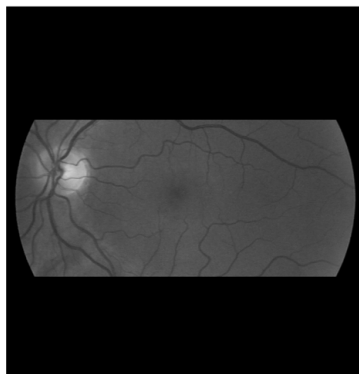
Obrázek 6.6: Maska pozadí.

6.4 Detekce optického disku

Správná detekce optického disku nám je velice důležitou, pro činnost této bakalářské práce dokonce nutnou částí. Pomocí lokalizace optického disku jsme schopni zjistit, zda se jedná o levé či pravé oko, na základě jeho pozice určit přibližnou oblast fovey, vyhodnotit části krevního řečiště, které můžeme prohlásit za nepřerušené (vycházející z optického disku) a v neposlední řadě je důležité tuto oblast zaznamenat z důvodů, aby převzatý algoritmus detekce exsudátů a drúz nedetekoval toto místo za výskyt projevu onemocnění.

Optický disk je oválný útvar, který má při pohledu na snímek nejvyšší intenzitu. Nejčastěji se nachází přibližně v polovině výšky obrazu. Zpravidla, pokud nejde o nemocné oko ve velice pokročilém stádiu nemoci, se jedná o největší nejsvětlejší útvar ve snímku sítnice oka. Pro automatickou detekci nám dobře poslouží zelený kanál vstupního snímku. Protože víme, že se má optický disk nacházet zhruba v polovině obrazu, je oblast pro vyhledávání zmenšena, jak je možno vidět na obrázku 6.7. Zúžení má svůj význam především z dů-

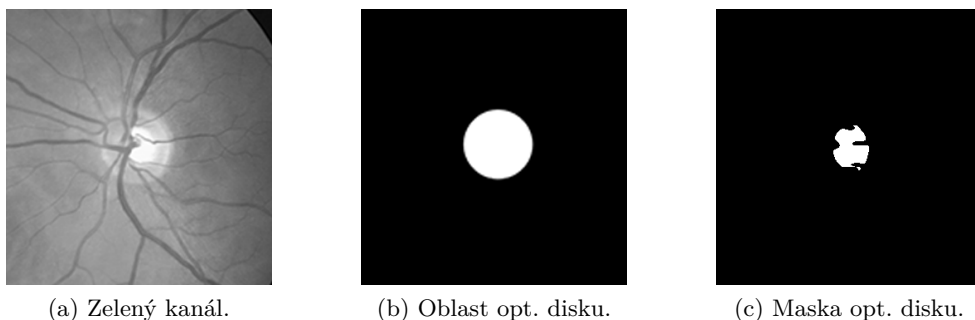
vodu, kdy se často v krajích snímku sítnice objevují světlé části, a ty by při automatické detekci zpomalovaly dobu vyhledávání. Na tento snímek se aplikuje operace vyhlazování z důvodu eliminace malých světlých míst v obraze, které by také zbytečně prodlužovaly čas vyhledávání. Vyhlazování se provádí pomocí většího filtru (viz. tabulka 6.1).



Obrázek 6.7: Zúžená oblast pro vyhledání optického disku.

Dále je nutné si definovat přibližné rozměry a vlastnosti, které by hledaná oblast měla splňovat. Optický disk má svůj poloměr přibližně jednu osminu poloměru snímku sítnice. Minimální obsah, který je nutno nalézt pro prohlášení, že se může jednat o optický disk je stanoven na jednu třetinu obsahu kružnice s poloměrem odhadovaného optického disku. Samotná detekce spočívá v postupném iterativním binárním prahování. Práh začíná na hodnotě 255 (nejsvětlejší barva) a v případě, že při iteraci nebyl nalezen objekt splňující podmínku minimálního obsahu optického disku, snižuje se hodnota prahu o 1. V každé iteraci se vyhodnocují všechny útvary, které po provedení prahování vznikly. Pokud útvar splňuje podmínku minimálního obsahu, spočítá se poloměr kružnice, která ho opisuje, a pokud náleží intervalu $0,8-1,2$ násobku odhadovaného poloměru optického disku (jedna osmina poloměru sítnice), je oblast prohlášena jako místo optického disku.

Po nalezení oblasti optického disku se pomocí matematických momentů získá střed oblasti, jako poloměr se použije poloměr kružnice opisující tento útvar. Pro fungování detekce exsudátů a drúz je zapotřebí ještě extrahovat samotnou masku optického disku. Ta je získána z původního snímku, ze kterého se opět použije zelený kanál. Dále se vybere oblast optického disku (určená středem a poloměrem) a provede se binární prahování s prahem o 2 nižším, než při kterém došlo k nalezení optického disku. Výstup této operace je možno vidět na obrázku 6.8c.



Obrázek 6.8: Postup při vyhledávání optického disku.

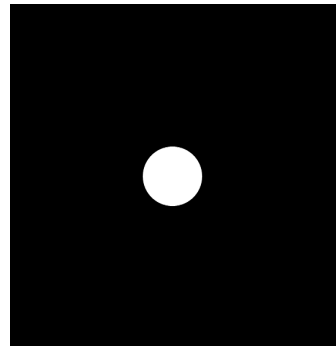
6.5 Detekce fovey

Detekovat oblast fovey je nutné ze dvou důvodů. Prvním je použití algoritmu pro detekci exsudátů a drúz, druhým správné fungování klasifikátoru, který se snaží najít při dalším zpracování možná přerušení. V oblasti fovey se totiž žádné cévní řečiště nevyskytuje a klasifikátor potřebuje tuto oblast vyloučit ze svého zpracování. Fovea je oválná oblast která v případě zdravého oka a kvalitního snímku je na rozdíl od optického disku nejtmaší místo na sítnici. Fovea se vždy vyskytuje v přibližně stejné výšce jako optický disk zhruba v 2,5násobku jeho šířky [26].

Pro detekci přibližné oblasti fovey se tedy dá čerpat na základě údajů získaných v předěšlém kroku lokalizace optického disku. Fovea je detekována jako kruhovitá oblast vzdálená o 2,5násobek šířky optického disku směrem ke středu sítnice s poloměrem 1,5násobku poloměru optického disku. Takto přibližně určená oblast je dostačující pro činnost klasifikátoru, který při své činnosti všechna propojení vedoucí skrze tuto oblast eliminuje.



Obrázek 6.9: Vstupní snímek.

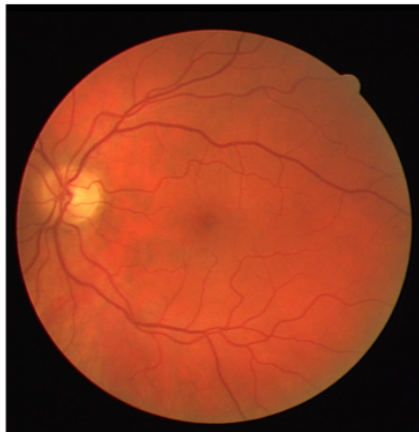


Obrázek 6.10: Oblast fovey.

6.6 Získání krevního řečiště

Předpokladem k vypracování této práce je použití existujícího algoritmu pro extrakci krevního řečiště. Extrakcí se zabývá hned několik bakalářských a diplomových prací z minulých let, jejichž implementace je možné využít k získání vstupu pro algoritmus rekonstrukce. Práce zabývající se hledáním projevů onemocnění používají metody spočívající na adaptivním prahování. Tyto metody jsou dobré pro získání obecného přehledu o výskytu cévního řečiště, ale nesou s sebou spoustu nevýhod. Pokud se ve snímku vyskytují jakékoliv hemoragie, tmavé jizvy po laserovém zákroku nebo různá smítka na zařízení, jsou tyto objekty vyextrahovány jako části cévního řečiště. Při dalším zpracování, úpravě a hledání přerušených částí by měl takovýto vstup extrahovaného řečiště velice negativní efekt na činnost algoritmu hledající napojení přerušených částí. Především z důvodu, kdy by algoritmus tyto objekty vnímal jako části krevního řečiště a snažil se je o jejich napojení.

Proto je pro vstup algoritmu použito implementace algoritmu extrahujícího na principu metod Matched filters v kombinaci s Continuation algorithm. Jejím autorem je Martin Pres a podrobný popis fungování je popsán v jeho diplomové práci [24]. Hlavní výhodou takovéto extrakce je stav, kdy získáváme řečiště, ve kterém se nevyskytují artefakty, ale pouze cévy. Nevýhodou algoritmu je vznik přerušení v místech, kde nebyla dostatečná odezva konvoluce jádra se snímkem, ze kterého se extrahovalo. Takto extrahované řečiště, které očekává algoritmus jako vstupní parametr, je možno vidět na snímcích 6.11 a 6.12.



Obrázek 6.11: Vstupní snímek.



Obrázek 6.12: Extrahované řečiště.

6.7 Detekce oblastí exsudátů a drúz

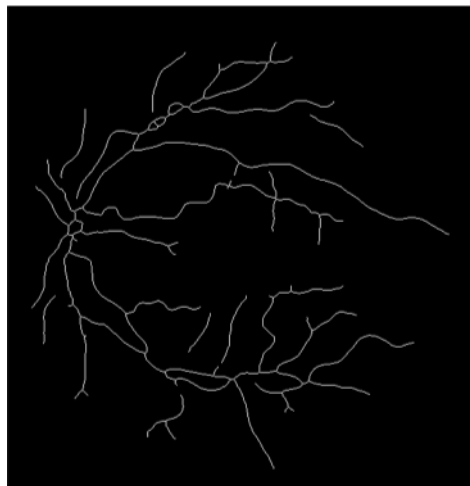
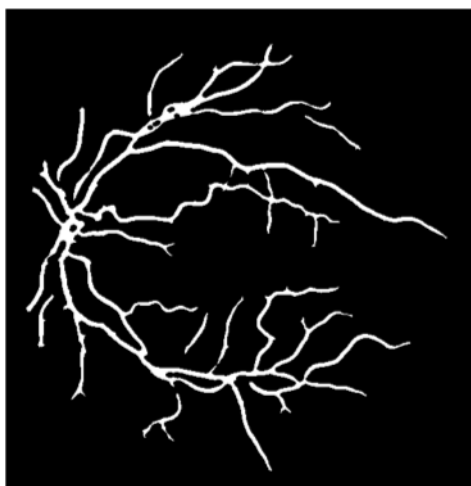
Detekci exsudátů a drúz se v minulosti zabývaly celé bakalářské práce. Jejich poznatky a popis algoritmů, kterým se dají tyto místa detekovat, byly použity v tomto kroku. Onemocnění diabetické retinopatie a VPMD se projevují v obraze jako žluté až bílé flíčky s vysokou intenzitou (viz. kapitola 4).

Detekce spočívá ve vymezení podezřelých oblastí pomocí Gaussova binárního prahování. Z výstupu této operace je odečtena oblast optického disku, masky krevního řečiště a aplikováno mediánové vyhlazování. V obraze poté probíhá analýza zbylých objektů, kde se testuje jejich plocha a barevná struktura. Všechny objekty, které nesplňují podmínky vlastností exsudátů a drúz, jsou z této masky odebrány. Výstupem je poté maska oblastí, kde se nachází exsudáty či drúzy. Získaná maska podezřelých oblastí je užitečná pro rozhodovací proces klasifikátoru, zda se v místě nachází přerušení či nikoliv. Podrobnější popis fungování algoritmu se nachází v bakalářské práci, jejímž autorem je Tomáš Aubrecht [1].

6.8 Skeletonizace řečiště a získání koncových bodů

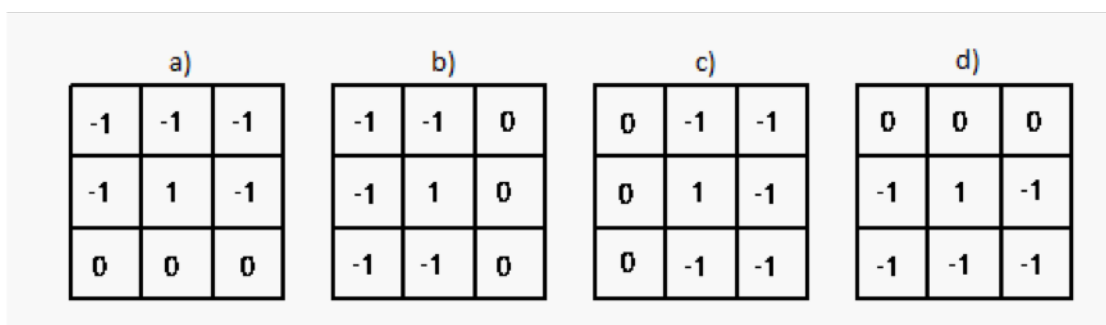
Tato podkapitola popisuje jednu z hlavních částí algoritmu. Jejím cílem je předzpracovat vstupní extrahované řečiště a lokalizovat koncové body cév. Výstupem této části je skelet extrahovaného řečiště a množina souřadnic, které popisují umístění koncových bodů cév.

Vstupem pro tuto část algoritmu je černobílé extrahované cévní řečiště. Jak snímek vypadá je možno vidět na obrázku 6.13. Ve vstupním extrahovaném řečišti bez jakékoliv úpravy by se vzhledem k tomu, že cévy mají proměnnou šířku, těžko hledala koncová místa cév. Proto je v prvním kroku provedena skeletonizace snímku řečiště. Ta nám zajistí, že každá céva bude mít tloušťku 1 pixel. Poté je mnohem jednodušší hledat koncové body. Pro skeletonizaci se používá algoritmus známý pod názvem Zhang Suen [27]. Výstup této operace je znázorněn na snímku 6.14.



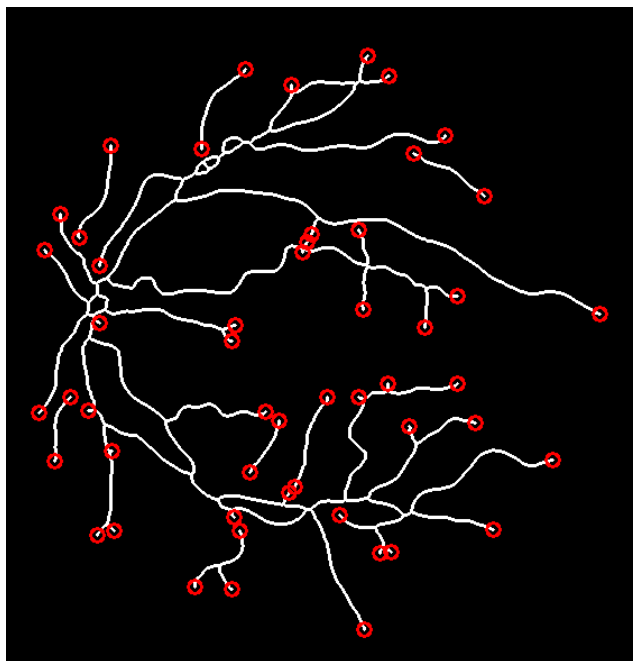
Obrázek 6.13: Vstupní extrahované řečiště. Obrázek 6.14: Skelet vstupního řečiště.

Po úspěšné skeletonizaci je možno přejít k dalšímu kroku – samotnému vyhledávání konců cév. Hledání těchto částí se provádí pomocí operace známé pod názvem Hit-or-Miss (viz. vzorec 5.4). Nad skeletem cévního řečiště se aplikuje tato operace se čtyřmi různými maskami (každá definuje jinou orientaci rohu). Jak masky pro detekci konců cév vypadají je možno vidět na obrázku 6.15. Hodnota -1 znamená výskyt pixelu pozadí, 1 výskyt pixelu cévy a 0 značí libovolný výskyt (pozadí nebo céva).



Obrázek 6.15: Masky pro vyhledání konců ve skeletu – a) horní roh, b) levý roh, c) pravý roh, d) spodní roh.

Každý roh popsáný touto maskou je totiž ve skeletu cévního řečiště zároveň koncem cévy. Výstupem po provedení této operace je sada čtyř masek, obsahující všechny koncové body cév. Protože pracujeme v černobílém obraze, je možné tyto masky spojit obyčejnou binární operací OR a vzniká nám jedna společná maska obsahující všechny koncové body v obraze skeletu cévního řečiště. Z této masky stačí pouze vyfiltrovat bílé body a získáváme tak množinu souřadnic – koncové body. Zvýrazněné konce cév z obrázku 6.14 jsou viditelné na obrázku 6.16.



Obrázek 6.16: Zvýrazněná místa, kde algoritmus detekoval konce cév.

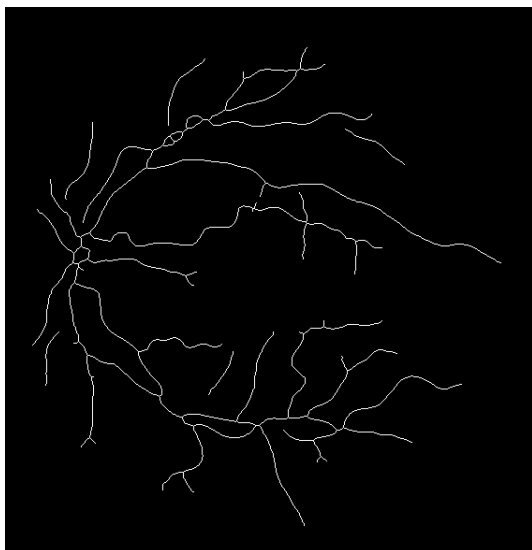
6.9 Segmentace cév, získávání informací

V této fázi máme k dispozici množinu bodů, o kterých pouze víme to, že jsou koncovými body cév. K získání více informací, a vůbec samotné lokalizaci přerušných částí řečiště, je zapotřebí segmentace řečiště do jednotlivých spojitých částí, u kterých se budou zjišťovat informace. Tato část popisuje způsob segmentace skeletu snímku do jednotlivých spojitých částí cévního řečiště, přiřazení a ohodnocení jejich koncových bodů (směr, vzdálenost od optického disku) a zjištění, zda část cévního řečiště vychází z optického disku či nikoliv (jedná se o přerušný segment, u kterého se budeme snažit nalézt místo vzniku přerušení). Všechny tyto informace jsou vstupem pro klasifikátor, který se snaží najít místa, kde vzniklo přerušení a kam daný přerušný segment napojit.

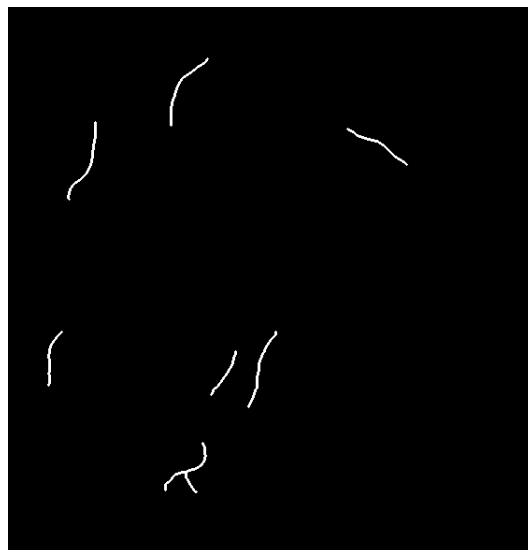
K segmentaci spojitých částí nám dobře poslouží semínkové vyplňování. Pro zjištění, zda segment vychází z optického disku binární operace AND. Poslední analýza se provádí nad koncovými body. Pro ohodnocení nám postačí vzorce pro vzdálenost mezi dvěma body a pro výpočet úhlu dvou bodů (viz. kapitola 5.6).

Algoritmus si na začátku vloží na zásobník všechny koncové body cév získané v části 6.8, které postupně jeden po druhém zpracovává. Pro každý bod opakuje níže popsany postup do doby, než je zásobník koncových bodů prázdný. Zpracování začíná provedením semínkového vyplňování nad skeletem cévního řečiště, kdy počátečním semínkem je právě zpracováváný koncový bod. Vyplňování probíhá v černobílém obraze, proto je nutné zvolit obarvaným pixelům jakoukoliv jinou intenzitu než 0 a 255. Z výstupního obrazu po provedení operace semínkového vyplňování se vezmou všechny body, jejichž hodnota intenzity odpovídá hodnotě, kterou se obarvovalo. Zároveň se ve skeletu tyto body obarví na černo, aby se odstranila část již segmentovaného cévního řečiště. Získáváme tak množinu bodů, které v případě jejich vykreslení představují jednu spojitou část cévního řečiště. Pro každou takto získanou množinu je vytvořena struktura reprezentující tuto část řečiště. Takto vy-

tvořenou strukturu je třeba naplnit množinou bodů reprezentující cévní segment, množinou koncových bodů s jejich vlastnostmi a informací, zda segment vychází z optického disku. Příklad všech segmentovaných částí z obrázku 6.17, pro které se provádí další zpracování, je možno vidět na obrázku 6.18.



Obrázek 6.17: Skelet řečiště.



Obrázek 6.18: Segmentované cévy.

Struktuře je tedy nutné přiřadit všechny její koncové body. Ty získáme průnikem množiny bodů reprezentující aktuální segment a množiny koncových bodů, získaných v kroku 6.8. Výstup průniku je přiřazen ke struktuře analyzovaného segmentu. Zároveň jsou tyto body odebrány ze zásobníku vstupních koncových bodů z důvodu urychlení výpočtu a vyhnout se zbytečným iteracím pro již zařazené koncové body cévního řečiště (při segmentaci jednoho spojitého úseku jsou totiž zpracovány hned dva a více koncových bodů). Segmentu je zapotřebí ještě ohodnotit jeho koncové body. Vlastnosti, které nás zajímají, jsou přibližný směrový úhel cévy v koncovém bodě a jeho vzdálenost od středu optického disku.

U každého koncového bodu se pomocí vzorce pro vzdálenost dvou bodů (viz. vzorec 5.6) vypočítá vzdálenost od středu optického disku. Dále je nutné zjistit přibližný směrový úhel cévy v koncovém bodě, aby klasifikátor měl informaci, jakým směrem céva v tomto bodě směřuje. Na černé pozadí se vykreslí zpracovávaná část analyzovaného cévního řečiště. Poté se od koncového bodu, pro který chceme zjistit úhel, pohybujeme jako při semínkovém vyplňování s rozdílem, že pouze zaznamenáváme směr, kde se nachází další bílý pixel. Takto je sledováno posledních osm pixelů cévy a ze zaznamenané cesty se získá přibližný úhel, kterým céva ve svém konci směřuje. Tento postup se provádí pro každý koncový bod, který náleží aktuálně analyzovanému segmentu.

Po ohodnocení koncových bodů zbývá přejít k poslednímu kroku jedné iterace – zjištění, zda je segment napojen na optický disk. Toho docílíme pomocí binární operace AND. Jako první vstup do této operace je černobílý snímek s vykresleným analyzovaným segmentem, druhým vstupem je obrázek, který má vykreslenou oblast optického disku danou středem a jejím poloměrem, získaném v bodě 6.4. Pokud se ve výstupu této operace nachází alespoň jeden bílý pixel, znamená to, že daný segment prochází skrz oblast optického disku a tím pádem je napojen. Informace se ukládá do struktury reprezentující segment. Tímto krokem končí provedení jedné iterace identifikace a klasifikace spojitého cévního segmentu.

Příklad, jak pro algoritmus vypadá jeden ohodnocený segment z obrázku 6.18 je možno vidět v tabulce 6.2.

Segment	Napojeno na řečiště	
3	<i>FALSE</i>	
Koncový bod	Směrový úhel (stupně)	Vzdálenost od optic. disku (px)
X: 93 Y: 123	-90	139,014
X: 65 Y: 205	+78	64,412

Tabulka 6.2: Příklad ohodnoceného segmentu

Algoritmus poté takto cyklicky postupuje do doby, než má zásobník nezpracovaných koncových bodů z kroku 6.8 prázdný (všechny spojitě segmenty jsou zpracovány). Výstupem této části je rozdělené vstupní extrahované cévní řečiště do množiny struktur, kdy každá struktura představuje reprezentaci spojitěho cévního segmentu v obraze. Struktura obsahuje množinu bodů tvořící jeden segment, informaci, zda vychází z optického disku, a v neposlední řadě množinu svých koncových bodů, které nesou informaci o své pozici, přibližném směru, kterým céva v daném bodě míří, a také vzdálenosti od optického disku.

6.10 Vyhledávání míst pro rekonstrukci

V předchozích podkapitolách byly popsány kroky, pomocí kterých se program snaží ze vstupního obrazu sítnice a extrahovaného řečiště získat co nejvíce informací. Tato data jsou na vstupu klasifikátoru. Jeho cílem je nalézt místa, která se dle získaných dat jeví jako přerušení. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 6.1, v extrahovaném řečišti při extrakci pomocí metody Matched filters se přerušení vlivem onemocnění i chyb algoritmů projevuje velice podobným způsobem.

Tato podkapitola popisuje činnost klasifikátoru, který se snaží najít místa pro rekonstrukci přerušených částí. Klasifikátor provádí vyhledávání pro spojení ve třech průchodech, kdy každý je zaměřen na jiný typ přerušení. Při prvním průchodu se snaží propojit drobné chyby algoritmů, kdy je céva přerušena na vzdálenost do 10 pixelů. Takové přerušení mohlo vzniknout jak vlivem projevu či léčby nemoci, tak chybou algoritmu. V druhém průchodu vyhledává větší přerušení s možností křížení cév. V posledním průchodu je snahou najít místa možných rozdvojení, které nebyly z řečiště extrahovány.

Hledání krátkých přerušení

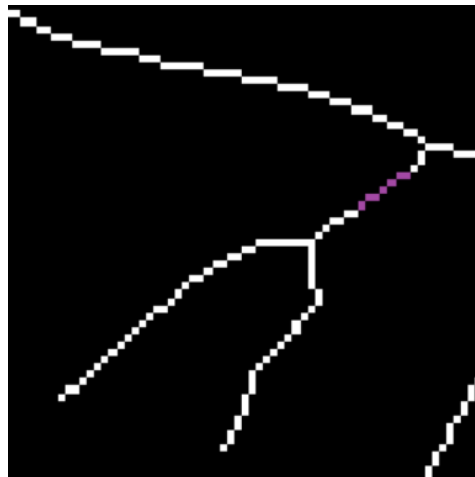
Tato část algoritmu má za úkol najít takové segmenty, které jsou přerušeny do vzdálenosti 10 pixelů. Jedná se o situace, kdy algoritmus pro extrakci neměl dostatečnou odezvu jádra od originálního snímku, ať už z důvodů tenkosti cévy či špatné světelnosti.

Postupně se prochází všechny segmenty cévního řečiště, které nevedou z optického disku. Každému segmentu se prochází koncové body seřazené podle vzdálenosti od optického disku. Pro každý bod se hledá koncový bod jiného segmentu a zjišťuje se vzdálenost, jak daleko jsou body od sebe. Do dalšího zpracování se zařazují všechny dvojice koncových bodů, pokud jejich vzdálenost je menší než 10 pixelů. Klasifikátor poté z této získané množiny dvojic zjišťuje, zda má dvojice kandidátů pro rekonstrukci vyhovující vzájemný směrový úhel cév v místě koncových bodů. Vyhovující dvojice pro propojení jsou takové, pokud je rozdíl směrových úhlů větší než 100 stupňů. K tomuto číslu se došlo experimentováním nad

dostupnými databázemi. Pokud existuje pro jeden koncový bod přerušného segmentu více dvojic splňující minimální odchylku úhlů pro napojení (vzdálenost, rozdíl úhlů), vybere se dvojice s největší odchylkou (cévy mají nejlepší vzájemnou polohu). Příklad takového napojení je viditelný na obrázku 6.19 a 6.20.



Obrázek 6.19: Přerušená oblast



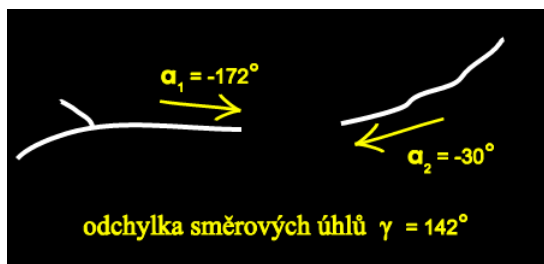
Obrázek 6.20: Rekonstrukce (fialová část)

Hledání přerušení s možností křížení cév

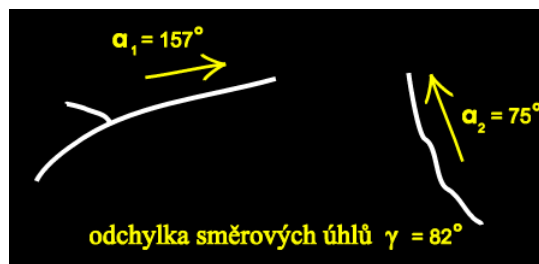
Tento průchod má za úkol vyhledat možná přerušení extrahované cévy, nikoliv ale na krátkou vzdálenost. Zde se už klasifikátor musí rozhodovat na základě více informací. Při tomto typu rekonstrukce se musí vzhledem k možným vzniklým křížením a propojením i jiného segmentu pracovat s aktuálními daty. To znamená, že při každém vyhodnocení oblasti jako místa, kde vzniklo přerušení, je provedena rekonstrukce, spuštěn proces segmentace cév pro nově vzniklý rekonstruovaný skelet řečiště a zavolání tohoto průchodu znovu od začátku. Jedině tímto způsobem se zamezí zpracování jednoho segmentu vícekrát. Princip vyhledávání a rozhodování spočívá v cyklickém procházení nenapojených segmentů, vytváření dvojic kandidátů, mezi kterými mohlo dojít k přerušení a jejich hodnocení, zda jejich vzájemná poloha odpovídá předpokladu, že se mezi nimi může nacházet chybějící část řečiště.

Postupně se prochází všechny segmenty, které nejsou doposud napojeny na optický disk seřazené podle jejich vzdálenosti od optického disku. Pro každý koncový bod přerušného segmentu se vyhledávají koncové body ostatních segmentů, které mají vzdálenost do určité hodnoty danou parametrem Max 1 z tabulky 6.1. Maximální vzdálenost je zde použita z důvodů urychlení algoritmu a také smysluplnosti, kdy je předem jasné, že nechceme vyhodnocovat a skórovat vztah mezi body, které leží na opačné straně snímku.

Klasifikátor poté každou takto získanou dvojici hodnotí. Hodnocení dvojic spočívá ve spočítání odchylky směrových úhlů bodů. Odchylka může nabývat hodnot od 0 do 180 stupňů. Čím vyšší je odchylka, tím více k sobě směřují konce cév, a je tak vyšší pravděpodobnost, že se mezi body nachází chybějící céva. Z kandidátů pro napojení jsou vyloučeny všechny dvojice, kde odchylka úhlů nepřevyšuje minimální hodnotu. Ta byla po testování nad databázemi stanovena na 125 stupňů. Na obrázku 6.22 je možné vidět dvojici, která nesplňuje tuto podmínku, a na obrázku 6.21 dvojici, která má dostatečnou odchylku umožňující další vyhodnocení.

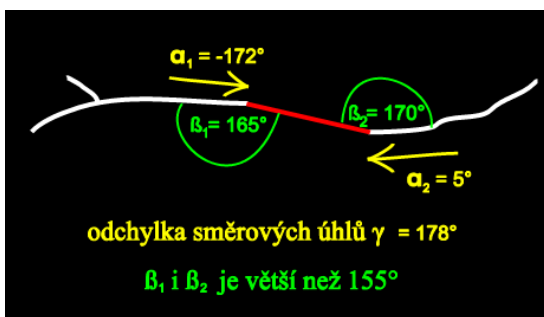


Obrázek 6.21: Vyhovující pro spojení.

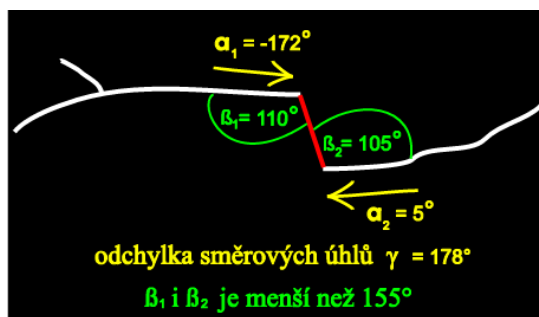


Obrázek 6.22: Nevhovující pro spojení.

Druhým pravidlem, kterým se filtrují kandidátní dvojice, je velikost úhlu, který svírá úsečka spojující dvojici bodů. Mohlo by se totiž často stávat, že dvě zdánlivě přerušené cévy jsou blízko sebe, odchylka směrů cév je vyšší než 125 stupňů (cévy míří na sebe), ale jejich propojení i tak nedává smysl. Znázornění validního případu je zobrazeno na obrázku 6.23 a nevhovující dvojice na obrázku 6.24.



Obrázek 6.23: Vyhovující pro spojení.



Obrázek 6.24: Nevhovující pro spojení.

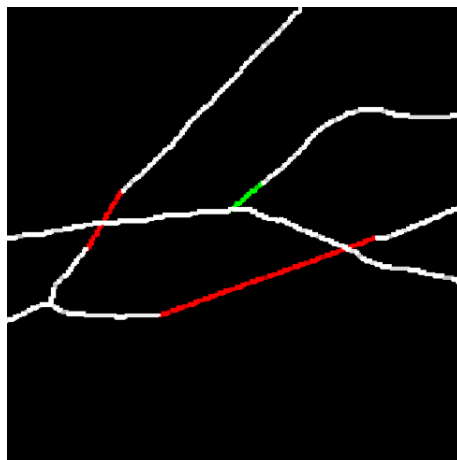
Tento problém je vyřešen způsobem, kdy se spočítá úhel, který svírá propojující úsečka s propojuvanou cévou. Tento výpočet je nutné provést na obou koncích propojující úsečky. Minimální hodnota tohoto úhlu je odvozována na základě velikosti odchylky vzájemné polohy bodů. Vztah je popsán v tabulce 6.3. K hodnotám se dospělo sledováním toků cévních řečišť experimentováním nad extrahovanými řečišti.

Odchylka úhlů zpracovávané dvojice	Min. odchylka cévy a spojující úsečky
$\delta \geq 170^\circ$	155°
$170^\circ > \delta \geq 160^\circ$	150°
$160^\circ > \delta > 125^\circ$	140°

Tabulka 6.3: Vztah odchylek směrových úhlů.

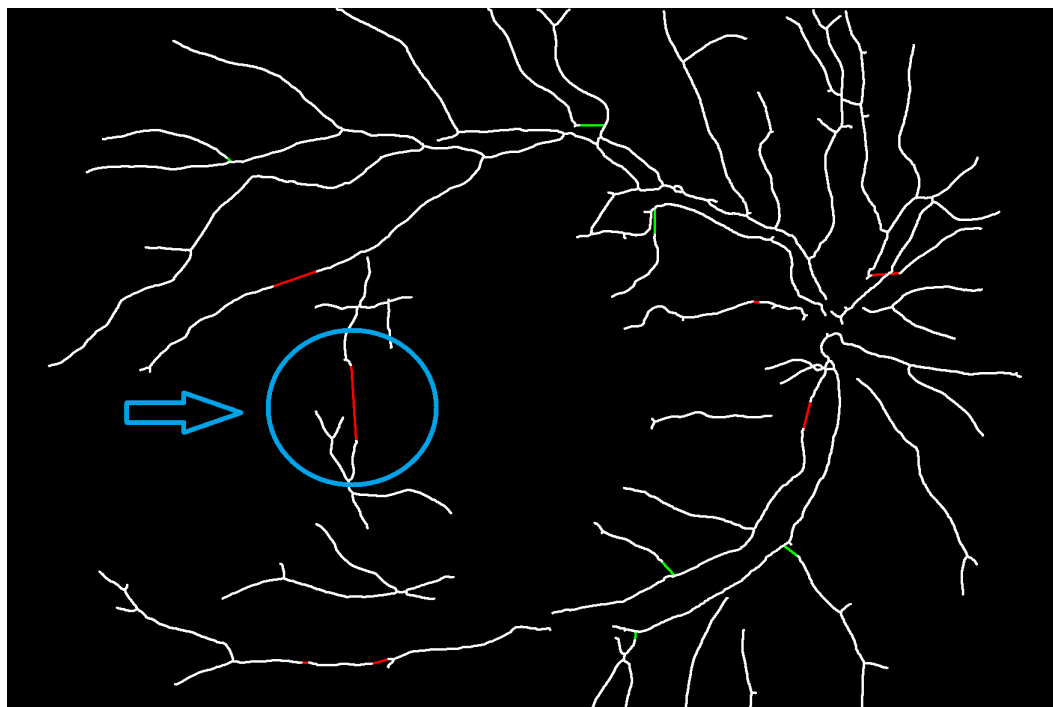
Klasifikátor má v tomto momentu už ohodnoceny jednotlivé vztahy úhlů pro všechny kandidátní dvojice a vyloučeny všechny takové, které nemají dostatečnou přilehlost. Dalším parametrem pro ohodnocení dvojice je počet překřížení při případné rekonstrukci. Cílem je zjistit, zda by rekonstrukce mezi dvěma body způsobila křížení, popřípadě kolikanásobné. Při studiu extrahovaných snímků totiž bylo zjištěno, že chyby algoritmu nejsou nikdy takové, aby chybějící část cévy křížovala více než jednu cévu. Vyloučeny jsou všechny dvojice bodů, kde vzdálenost přerušení je větší než parametr Max 2 z tabulky 6.1 a zároveň by rekonstrukcí

vzniklo více než jedno překřížení. Ukázka rekonstrukce s křížením je znázorněna na obrázku 6.25.



Obrázek 6.25: Rekonstrukce křížení (červená barva).

Poslední podmínkou pro vyloučení ze spojení je případ, kdy rekonstrukce prochází skrz oblast fovey. Při prvních verzích algoritmu se totiž často stávalo, že přerušené segmenty se chybně propojovaly na řečiště vycházející z optického disku přes oblast fovey. V oblasti fovey se ale žádné cévy nevyskytují. Proto algoritmus zjišťuje, zda kandidátní oblast pro propojení nezasahuje do oblasti fovey (určené v bodě 6.5). Pokud ano, vylučuje tuto dvojici. Případ špatně vyhodnoceného přerušení a následná rekonstrukce, která by procházela skrz foveu se nachází na obrázku 6.26.



Obrázek 6.26: Příklad, kdy klasifikátor vyhodnotil místo přerušení, které by procházelo oblastí fovey.

Klasifikátor tímto způsobem prochází všechny segmenty, získává kandidátní dvojice bodů pro možnou rekonstrukci a ty postupně ohodnocuje a vylučuje všechny dvojice, které nesplňují ani základní pravidla pro úvahu, že mezi segmenty v daném místě mohlo vzniknout přerušení. Pokud nalezne takovou dvojici, která vyhovuje předchozím pravidlům (vzájemný úhel dvou koncových bodů, odpovídající úhel spojující úsečky, nepřekročení omezení překřížení, spojení neprochází skrze foveu), provede propojení segmentů úsečkou, nad vzniklým řečištěm spustí rekalkulaci bodu 6.9 a provádí průchod znovu od začátku. Pokud se stane, že po vyloučení dvojic na základě předchozích pravidel má algoritmus více kandidátů pro propojení jednoho segmentu, vybírá se taková, kde směry úhlů mezi koncovými body jsou největší a vzdálenost nejmenší.

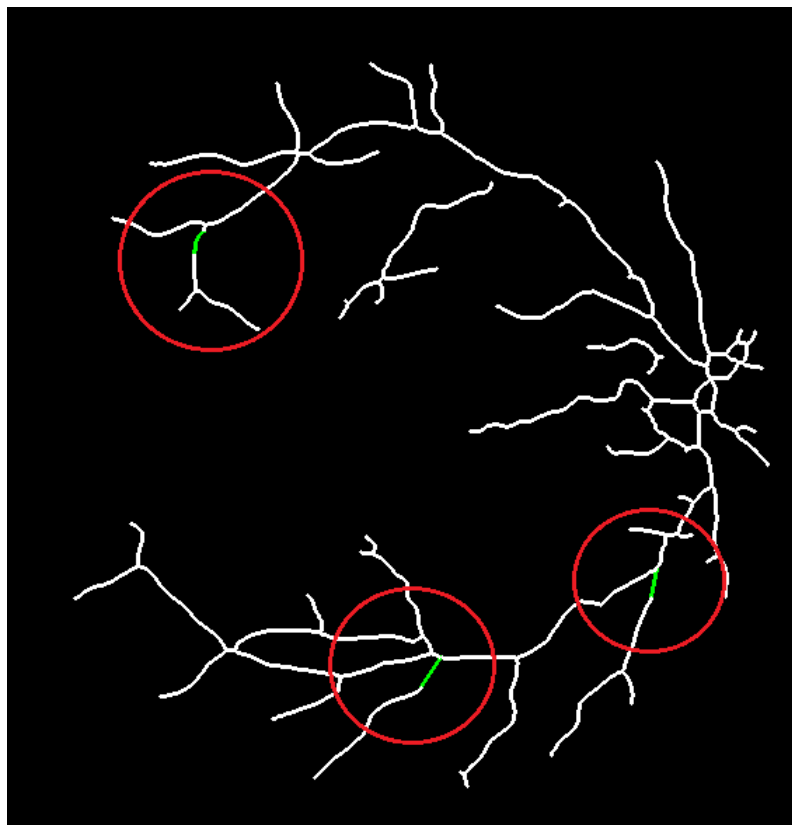
Zpracování končí v situaci, kdy se prošlo přes všechny doposud nenapojené části krevního řečiště a nebyl nalezen žádný případ pro rekonstrukci (který by vyvolal rekalkulaci a znovu spuštění výpočtu). Druhou možností ukončení je stav, kdy počet segmentů nevycházejících z optického disku roven nule.

Hledání chybějících rozdvojení

Při studiu extrahovaných snímků bylo zjištěno, že použitý algoritmus pracující metodou Matched filters má často problémy s rozdvojením cév. To má za příčinu přerušení viditelné na obrázku 6.27. Charakteristika cév, u kterých se tento problém projevuje je následující. Většinou se jedná o cévy, které se rozdvoují z hlavního řečiště a mají maximálně pět koncových bodů. Jde o menší cévy, které nenabývají velkých objemů.

Algoritmus tedy postupně prochází všechny segmenty, které mají maximálně pět koncových bodů a jejich rozloha zasahuje maximálně do jedné osminy plochy obrazu. Tím zajistíme, že část tohoto algoritmu se nebude provádět pro velké přerušené úseky cév, kde by úspěšnost napojení byla nízká. Pro každý takovýto segment se zjistí, jakým směrem se céva orientuje. Cílem je nalézt koncový bod, který je nejbližší k optickému disku a zároveň i jeho směr směřuje k tomuto místu. Rozdvojení cév je totiž skoro ve všech případech směrem od optického disku. Proto body, které směřují tímto směrem, nemá cenu testovat, zda by mohly být vhodnými kandidáty.

U každého segmentu je tedy nalezen bod, nebo skupina bodů, který vyhovuje tomuto pravidlu a zkoumá se, zda ve směru, kterým v bodě vede céva, se nenachází v blízkosti definované parametrem Max 2 z tabulky 6.1 cévní řečiště napojené na optický disk. Pokud je v tomto okolí nalezena část takového řečiště, provede se z tohoto bodu napojení na tento segment. Příklad takové rekonstrukce je vidět na obrázku 6.27. Tento typ rekonstrukce pracuje pouze odhadem, takže napojení nikdy není na pixel shodné s originálním snímkem. Úspěšnost je ale taková, že tyto spojení mohou být užitečné při lokalizaci křížení a rozdvojení ve snímku sítnice oka a sledování toku řečiště.



Obrázek 6.27: Zjištěná místa chybějících rozdvojení (zelená barva).

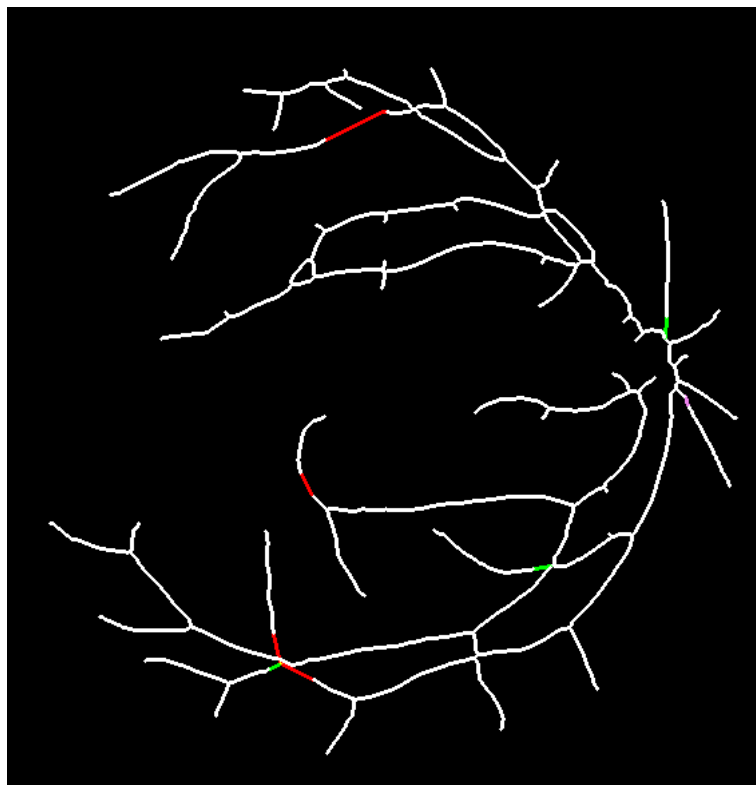
6.11 Rekonstrukce řečiště

Výstupem z přechodného kroku je sada dvojic bodů, mezi kterými je třeba ve snímku řečiště provést rekonstrukci. Tato část algoritmu má tedy na vstupu seznam dvojic bodů, mezi kterými se má provést propojení. Algoritmus má dva způsoby, jak je možno spojení provádět.

Spojení úsečkou nebo polynomem

Jednodušším způsobem propojení je protažení obyčejné úsečky z bodu A do bodu B, které máme na vstupu. Popřípadě pokud je to možné, proložit mezi dvěma body polynom. Třetí bod, kterým se prokládá polynom mezi dvojicí bodů, je hodnota bodu průsečíku směrů cév. Tyto úhly byly získány v rámci procesu získávání informací z extrahovaného řečiště.

Z důvodu testování jednotlivých průchodů algoritmus vytváří dvě rekonstruovaná řečiště. Jedním je skelet řečiště, kde rekonstruované úseky jsou vykresleny bílou barvou. Tento výstup je možno použít při dalším zpracování sítnice oka. Druhým obrázkem je také skelet řečiště, rekonstruované cévy jsou ale vykreslovány barevně na základě průchodu, ve kterém rekonstrukce proběhla. Barevné odlišení je zde zavedeno z důvodu demonstrace výsledků algoritmu. Pro průchod řešící krátká napojení byla zvolena fialová barva, pro rekonstrukce provedené druhým průchodem je barva červená, rekonstruovaná rozdvojení jsou v obraze zobrazena zeleně. Pokud bylo navíc zjištěno, že přerušeno vzniklo v oblasti výskytu nemoci, je toto místo zvýrazněno oranžovou barvou. Příklad, jak vypadá řečiště po rekonstrukci je možno vidět na obrázku 6.28.

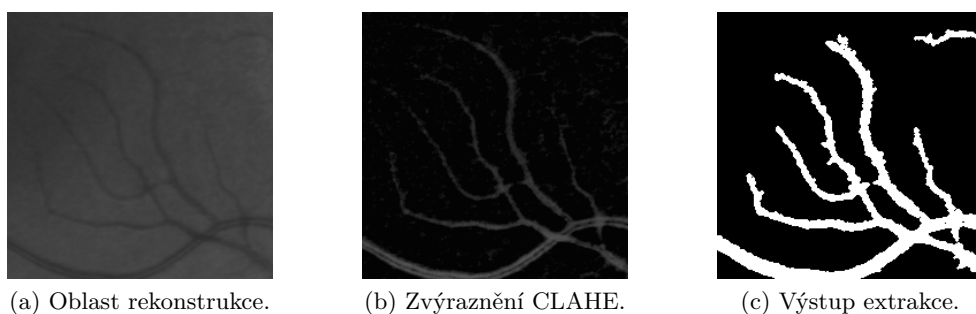


Obrázek 6.28: Extrahované řečiště po provedení rekonstrukce.

Rekonstrukce řečiště pomocí dodatečné extrakce cév

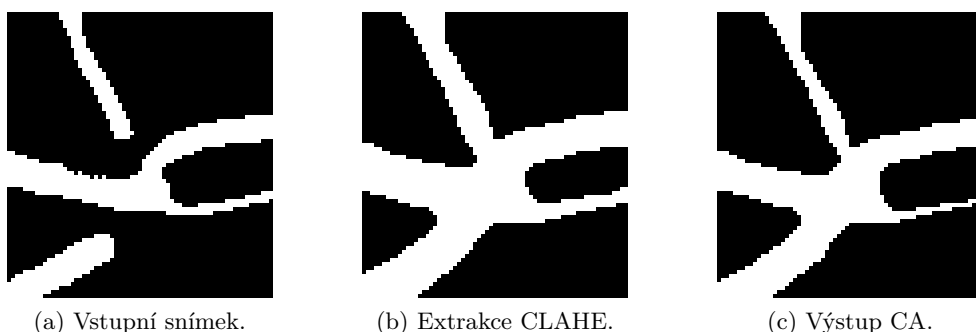
Hlavní nevýhodou rekonstrukce předchozím způsobem je riziko vzniku neexistujících spojení, které algoritmus špatně identifikoval jako přerušení. Řešením tohoto problému je provádět rekonstrukci pomocí dodatečné extrakce řečiště pro oblasti snímku, kde bylo klasifikátorem vyhodnoceno možné přerušení. Na vstupu máme vždy dva body, mezi kterými se má nacházet chybějící céva. Na základě pozice bodů je zvolena oblast, ve které se bude provádět dodatečná extrakce cévního systému. Algoritmus si ze vstupního snímku sítnice vezme tuto oblast a v zeleném kanálu a provádí extrakci cévního řečiště.

Jelikož při extrakci pomocí Matched filters nevznikla dostatečná odezva při konvoluci snímku s jádrem, je potřeba tuto oblast předzpracovat. Nejprve se na problémové místo aplikuje třikrát operace morfologického otevření následovaná morfologickým uzavřením. Při každém provádění této dvojice je použito jinak velké jádro, aby se ovlivnily všechny možné velikosti cév. Nejvíce informací je získáno při velikosti jader 5×5 , 11×11 a 23×23 . Na takto předpřipravený snímek se aplikuje metoda CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). Při správně zvolených hodnotách (v našem případě `ClipLimit` = 2 a velikosti mřížky 8×8 pixelů) se pomocí této úpravy zvýrazní tmavé oblasti (cévy). Poté se na takto předzpracovaném snímku provede prahování. Z výstupu prahování je ještě potřeba odstranit všechny fragmenty, které byly falešně označeny za cévy. Proto jsou z dodatečně extrahovaného snímku odebrány všechny spojitě segmenty, jejichž obsah je menší než 200 pixelů a nebo mají kulovitý tvar (jedná se o krevní sraženiny, nikoliv cévy). Jak algoritmus postupuje při extrakci je možno vidět na snímcích [6.29a](#), [6.29b](#) a [6.29c](#).



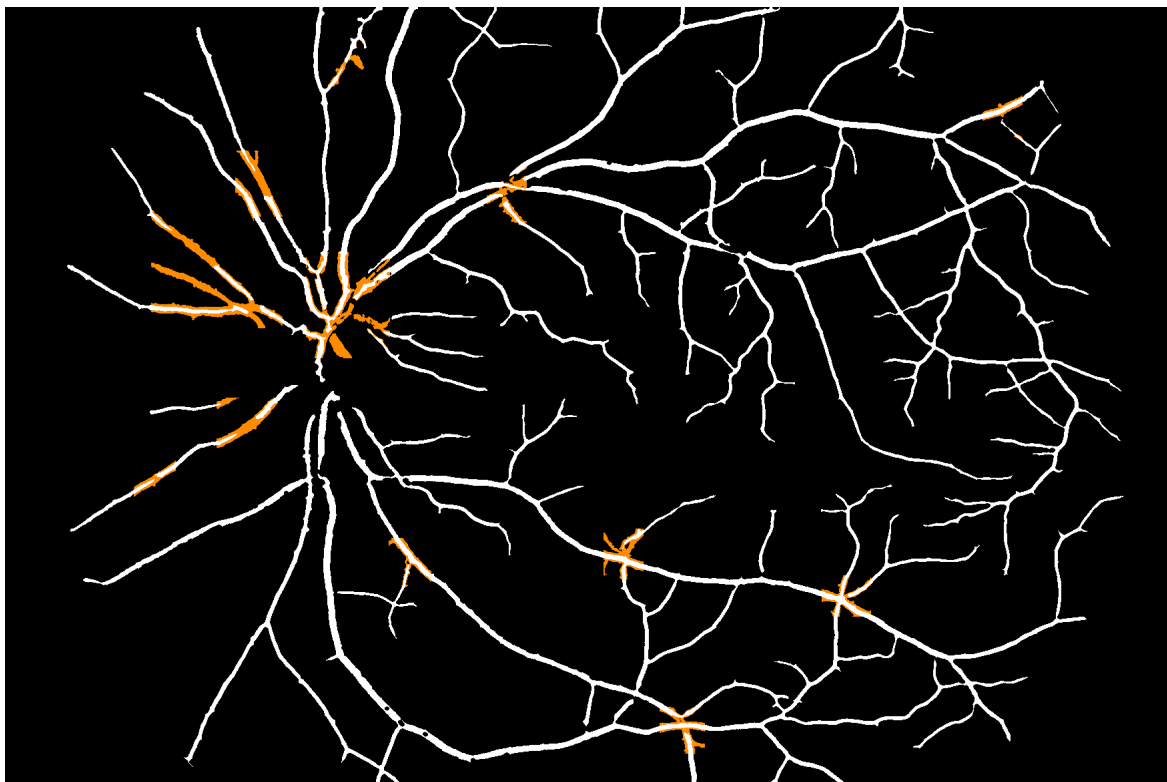
Obrázek 6.29: Ukázka procesu dodatečné extrakce v oblasti špatné světelnosti.

Výstupem je binární snímek obsahující extrahované cévy. Nyní je potřeba tento výstup dostat do původního snímku. Pro přidání je dobré využít Continuation algoritmus. Jeho vstupem jsou dva binární snímky. Prvním je původní, extrahované řečiště a druhým nově extrahovaná část řečiště podezřelé oblasti. Výstupem operace je nový, potencionálně lépe extrahovaný snímek se zrekonstruovanou chybějící cévou. Naopak oblasti, které nenavazují na původní řečiště, jsou vyloučeny, a zamezí se tak situacím, kdy by v obraze vznikaly nové přerušené segmenty. Příklad rekonstrukce jednoho přerušení touto metodou je možné vidět na obrázcích 6.30a (původní snímek), 6.30b (dodatečně extrahované řečiště) a 6.30c (výstup spojení pomocí Continuation algoritmu) [18].



Obrázek 6.30: Ukázka rekonstrukce přerušení pomocí dodatečné extrakce.

Stejným způsobem se postupuje pro všechny oblasti klasifikované jako místa možného vzniku přerušení. Takovýto postup nám vstupní extrahované řečiště obohacuje o cévy, které byly úspěšně rekonstruovány v oblastech možného přerušení. Nutno podotknout, že tento typ rekonstrukce může být úspěšný pouze pro typy přerušení, která vznikla chybou algoritmů. Pro případy přerušení z důvodu výskytu nemocí nezbyvá jiná možnost, než propojení provádět odhadem pomocí proložení polynomu. Výsledek tohoto typu alternativního přístupu rekonstrukce je vidět na obrázku 6.31. Hlavní výhodou této metody je vytváření přesné rekonstrukce chybějících cév a zlepšení kvality vstupního extrahovaného řečiště.



Obrázek 6.31: Zrekonstruovaná propojení pomocí dodatečné extrakce (oranžová barva).

Kapitola 7

Implementace a testování

7.1 Struktura programu a jeho výstupy

Program pro rekonstrukci je napsán v programovacím jazyce Java verze 10. Pro práci s obrazem byla využita knihovna OpenCV ve verzi 4.0. Program je strukturován do několika tříd, kdy každá vykonává jednu z činností popsané v kapitole 6. Dále obsahuje třídy reprezentující části sítnice oka (koncový bod, slepá skvrna, optický disk, cévní segment).

Třída `Detector` slouží jako kontext celé aplikace. Uchovávají se v ní vstupní snímky, získané masky oblastí exsudátů, fovey, optického disku a podobně. Dále také obsahuje implementaci základních operací, které se využívají skrz celou aplikaci (vzdálenost dvou bodů, maskování, inicializaci filtrů). Třída `BloodVesselDetector` dodatečně extrahuje cévní řečiště (při procesu rekonstrukce). Je schopna vyextrahovat řečiště jak pro celý snímek, tak pro jeho oblast, kde bylo identifikováno možné přerušení. Třída `FoveaDetector` očekává na vstupu zelený kanál originálního snímku a jejím výstupem jsou celkem dvě masky. Jedna s oblastí optického disku a druhou je maska získaná pomocí filtrování v oblasti optického disku.

Pro zúžení vstupního extrahovaného řečiště se využívá třída `Thinner`, její výstupní zúžené řečiště je vstupem do třídy `InterruptionDetector`, která se stará o identifikaci koncových bodů, segmentaci spojitých částí a získání informací. Všechna data jsou vstupem do třídy `ReconstructionResolver`. Ta obsahuje implementaci klasifikátoru, vyhodnocuje jednotlivé segmenty a předává třídě `Reconstructor` dvojice bodů, mezi kterými se má provést rekonstrukce. Ta se provádí dodatečnou extrakcí, kdy se třídě `BloodVesselDetector` dá na vstup oblast opisující dva body, mezi kterými je možné přerušení, nebo propojením bodů pomocí polynomu. Druhým způsobem je rekonstrukce pomocí pouhého propojení která se provádí přímo v třídě `ReconstructionResolver` při identifikaci přerušení.

Výstupem programu je soubor `interruptions.txt`, který obsahuje dvojice bodů, mezi kterými algoritmus identifikoval přerušení. Tyto informace se mohou hodit pro další zpracování, na základě jejich polohy je možné se zaměřit na jejich oblasti a pokusit se o zlepšení kvality snímku v těchto místech. Dalším výstupem jsou obrázky obsahující extrahované vstupní řečiště po provedení rekonstrukce pomocí polynomů a po pokusech o dodatečnou extrakci v místech identifikovaného přerušení. Nad těmito výstupy se provádělo i samotné testování popsané v podkapitolách 7.5 a 7.6.

7.2 Použití programu

Program vyžaduje knihovnu OpenCV 4.0 se zkompilevaným Java modulem. Zkompilevaná spustitelná aplikace pro 64-bitový systém Windows i Linux se nachází na CD. Při spuštění pomocí příkazové řádky je potřeba manuálně zadat cestu k dynamické části knihovny pomocí přepínače `-Djava.library.path=$LOCATION`, nebo přidat toto umístění `$LOCATION` do systémové proměnné `PATH`. Dynamická část knihovny jak pro 32-bitový, tak pro 64-bitový systém se nachází na přiloženém CD. V případě 32-bitového systému, nebo pokud aplikace nebude na Vašem systému fungovat, je nutné provést ruční kompilaci zdrojových souborů. Jednodušší variantou v případě problémů se spuštěním či kompilací je možnost importovat zdrojové soubory do vývojového prostředí IntelliJ IDEA verze 2018.2 a vyšší (nižší verze nepodporují verzi Java 10).

Spuštění programu

Spuštění programu probíhá vždy pomocí příkazu z příkazové řádky:

- `./java -jar RetinaVesselReconstruction.jar`

Pro případ, kdy není cesta k dynamické knihovně přidána v systémové proměnné `PATH`:

- `./java -jar RetinaVesselReconstruction.jar -Djava.library.path=$LOCATION`

Program očekává minimálně dva parametry, které určují cestu k originálnímu snímku sítnice a jeho extrahovanému řečišti. Dále je možné pomocí přepínače specifikovat cestu, kam bude program ukládat své výstupy. Těmi jsou soubor se souřadnicemi přerušovaných míst, rekonstruovaný skelet řečiště pomocí polynomů a také rekonstruované vstupní extrahované řečiště pomocí dodatečné extrakce. Pro účely testování je možno přepínačem vynutit vygenerování originálního snímku s označeným nálezem optického disku. Výčet všech parametrů, které program umí zpracovat je následující:

- **-h** nebo **--help** – vypíše nápovědu ke spuštění programu.
- **--original \$LOC** – cesta k originálnímu obrázku v `$LOC` (povinné)
- **--vessel-tree \$LOC** – cesta k extrahovanému řečišti v `$LOC` (povinné)
- **--output \$LOC** – místo, kam má program ukládat výstupy (volitelné)
- **--optic-disc** – program označí v originálním obrázku optický disk (volitelné)
- **--skip-mark** – program generuje rekonstruované snímky černobílé (volitelné)

7.3 Zdrojové databáze

Pro ověření funkčnosti jednotlivých částí algoritmu a úspěšnosti samotné rekonstrukce bylo potřeba vybrat databáze, nad kterými bylo možné aplikovat vytvořený algoritmus pro rekonstrukci. Předpokladem pro možnost rekonstrukce je stav, kdy extrahované řečiště vykazuje dostatečnou kvalitu (množství extrahovaných cév). Při použití algoritmu pro extrakci cévního řečiště nad snímky nemocných sítnic v pokročilém stádiu (například snímky databáze DiaretDb) totiž vykazují dostupné algoritmy velkou chybovost, řečiště je hodně porušené a není nad ním možno provádět jakékoliv pokusy o rekonstrukci. Proto pro testování byly vybrány databáze a snímky, u kterých je extrahované řečiště dostatečně kvalitní.

V průběhu tvorby algoritmu se tedy pracovalo s databázemi DRIVE a GOLD. Tyto databáze byly vybrány i pro samotné testování. Databáze DRIVE obsahuje sadu 24 snímků, kdy ve 4 případech se jedná o snímek s případem porušení výskytem drúz. Z databáze GOLD bylo vybráno 29 snímků, které obsahují jak zdravé, tak nemocné sítnice v počátečních stádiích. Hlavním rozdílem mezi databázemi je rozlišení vstupních snímků. U první zmiňované databáze se jedná o snímky s rozlišením 567×586 pixelů, v druhé databázi mají snímky po podvzorkování 1754×1170 pixelů. Rozlišení hraje velkou roli v počtu extrahovaných cév a vzniklých přerušeních. U databáze DRIVE mají snímky pár výskytů přerušení, u druhé zmiňované jsou řečiště mnohonásobně podrobnější, a tak i extrahované řečiště obsahují více problémových případů.

Samotné testování probíhalo manuálně, kdy se porovnávaly rekonstruované části s originálním snímkem sítnice a bylo určováno, zda se přerušený segment napojil správně, či nikoliv. V případě chybných napojení ještě byla určena míra závažnosti chyby.

7.4 Testování detekce optického disku

Detekce optického disku je pro činnost algoritmu jednou z velice důležitých fází procesu. Pokud se nesprávně detekuje optický disk, algoritmus není schopen při analýze segmentů vyhodnotit, zda se jedná o část krevního řečiště z optického disku či nikoliv. Nesprávná detekce má tedy na chybovost algoritmu značný vliv.

Pro správné určení oblasti optického disku není třeba asistence oftalmologa. Tyto části sítnice může po nastudování základní anatomie oka určit i laik. Proto program poskytuje možnost vygenerování originálního snímku s vyznačenou oblastí optického disku, kterou můžeme manuálně porovnat s originálním snímkem. Za správně určenou oblast se považuje detekce, kdy maska oblasti detekovaného optického disku pokrývá vycházející řečiště.

Vzhledem k tomu, že předpoklad fungování navrženého algoritmu počítá s úspěšnou detekcí optického disku, není překvapující, že nad testovanými databázemi vykazoval algoritmus vcelku vysokou úspěšnost. Výsledky vyhodnocení optického disku jsou shrnuty v tabulce 7.1.

Databáze	Správně	Chybně	Úspěšnost
DRIVE	22	2	91,66 %
GOLD	28	1	96,55 %

Tabulka 7.1: Výsledek testování detekce optického disku.

7.5 Testování identifikace přerušení a rekonstrukce polynomem

Algoritmus rekonstrukce propojení polynomem pracuje primárně s daty, která jsou obsažena v extrahovaném cévním řečišti. Z původního snímku získává pouze oblast optického disku, fovey a masku výskytu exsudátů či drúz pro případné označení, že rekonstrukce proběhla v místě nálezu projevu onemocnění.

Algoritmus rekonstrukce pracuje ve třech průchodech. Pro každý průchod se tedy zvlášť hodnotí, zda určené oblasti pro rekonstrukci tímto průchodem provedeny správně nebo nesprávně. Za správnou rekonstrukci se považuje taková, pokud klasifikátor určil místo napojení stejné, jako je tomu v originálním snímku. Vyhodnocení probíhalo manuálně po-

rovnáním mezi řečištěm v originálním snímku a zvýrazněným řečištěm po provedení rekonstrukce. Výsledky manuálního testování pro jednotlivé snímky ze kterých jsou průměrovány následující tabulky se nachází v příloze B.

První průchod má za úkol v obrázku eliminaci drobných chyb algoritmů a slouží k především k odstranění přerušných segmentů, u kterých je už na základě vzdálenosti přerušnění jasné, že se jedná o chybu algoritmu. Tyto chyby se nevyskytují ve snímcích tak často, pokud na ně ale algoritmus narazil, vždy tento problém detekoval správně. Shrnutí úspěšnosti prvního průchodu se nachází v tabulce 7.2.

Databáze	Správně propojené	Špatně propojené	Úspěšnost
DRIVE	9	0	100 %
GOLD	31	0	100 %

Tabulka 7.2: Výsledek testování rekonstrukce přerušnění prvního typu.

U druhého průchodu se provádí vyhledávání a rekonstrukce pro přerušnění, u kterých může vzniknout případné křížení. Proto při hodnocení úspěšnosti vyhledávání těchto míst je vhodné do hodnocení zahrnout více parametrů. Konkrétně se jedná o závažnost v případě nesprávně provedené rekonstrukce. Ta je určena na základě toho, zda při propojení segmentů při druhém typu přerušnění vzniklo neexistující překřížení nebo rozdvojení cév. Samotné propojení cév pro řečiště totiž není až takovým problémem, v případě křížení nebo rozdvojení se již jedná o chybu, kterou by za žádných okolností neměl algoritmus provádět. Výsledky úspěšnosti druhého průchodu jsou shrnuty v tabulce 7.3.

Databáze	Správně	Chybně	Závažných	Poměr závažných	Úspěšnost
DRIVE	23	9	2	22,2 %	71,88 %
GOLD	154	40	9	22,5 %	79,38 %

Tabulka 7.3: Výsledek testování rekonstrukce větších přerušnění.

Třetí typ rekonstrukce se snaží nalézt v extrahovaném řečišti situace, kdy nebylo zachyceno křížení. U tohoto typu se vyhodnocuje pouze úspěšnost, zda místo rekonstrukce bylo určeno správně, či nikoliv. Shrnutí se nachází v tabulce 7.4.

Databáze	Správně	Chybně	Úspěšnost
DRIVE	30	6	83,33 %
GOLD	101	16	86,32 %

Tabulka 7.4: Výsledek testování rekonstrukce rozdvojení.

V poslední tabulce 7.5 je celkové shrnutí všech detekovaných přerušnění. Celková úspěšnost je dána jako poměr všech správně detekovaných přerušnění ku počtu všech přerušných segmentů v obraze. Algoritmus tedy zvládl úspěšně detekovat a následně zrekonstruovat přibližně kolem 60 % přerušných segmentů. Většina nedetekovaných přerušnění je způsobená vzdáleností přerušných segmentů. Při pokusech hledat napojení pro osamocené segmenty vykazoval algoritmus vyšší chybovost (často v daném místě chyběla značná část řečiště potřebná pro správné určení). Proto se výsledná implementace snaží provádět rekonstrukce pouze do určité vzdálenosti z důvodu eliminace chyb. Dalším častým důvodem špatně detekovaných přerušnění anebo vůbec nedetekovaných byla situace, kdy se přerušná céva ve

svém konci v extrahovaném řečišti zrovna ohýbá a algoritmus tak nedokáže přesně určit, jakým směrem céva míří. To vede k situaci špatného napojení či vůbec neprovedení žádné rekonstrukce přerušného segmentu.

Databáze	Celkem přerušných	Napojeno	Správně	Chybně	Úspěšnost
DRIVE	104	92	77	15	74,03 %
GOLD	497	342	286	56	57,54 %

Tabulka 7.5: Shrnutí úspěšnosti rekonstrukce všech typů přerušení.

7.6 Testování rekonstrukce s použitím dodatečné extrakce

Smyslem rekonstrukce s využitím dodatečné extrakce cévního řečiště v detekovaných problémových oblastech je zajištění omezení vytváření neexistujících cév v případě chybně určeného přerušení. Pouze dodatečnou extrakcí z originálního snímku se může zajistit, že rekonstrukce proběhne v případě, kdy se mezi přerušnými segmenty nachází céva. Z hlediska dalšího zpracování extrahovaného řečiště (například vyhledávání rozdvojení či křížení cév) je za úspěch považován každý výstup, ve kterém je obsažena část řečiště, která nebyla na vstupním extrahovaném řečišti. Především se jedná o získání každého křížení či rozdvojení cév. Vyhodnocení úspěšnosti rekonstrukce je tedy určeno počtem úspěšně napojených cév v místech přerušení, množstvím zisku chybějícího křížení a rozdvojení cév. Vyhodnocení probíhalo manuálně porovnáním vstupního extrahovaného řečiště s výstupem implementovaného algoritmu a porovnáním oproti originálnímu snímku. Výsledky dodatečné extrakce jsou shrnuty v tabulce 7.6.

Touto metodou rekonstrukce bylo prokázáno, že je možné ze snímků v místech identifikovaných jako přerušení získat dodatečnou rekonstrukcí více cévního řečiště. Nevýhodou aktuální implementace je v některých oblastech vznik artefaktů, které byly detekovány jako cévy. Tyto falešné detekce jsou způsobeny extrakcí pomocí prahování. Pro reálné využití by bylo zapotřebí zdokonalit mechanismus dodatečné extrakce například pomocí neuronových sítí.

Databáze	Identifikovaných přerušení	Propojených	Nových křížení	Nových rozdvojení
DRIVE	62	41 (83,33%)	11	35
GOLD	286	215 (72,5%)	59	220

Tabulka 7.6: Výsledek testování rekonstrukce pomocí dodatečné extrakce.

Kapitola 8

Závěr

Cílem této práce bylo zjistit, zda je možné v extrahovaném řečišti nalézt způsob, kterým by se lokalizovala místa přerušovaných cév, a poté se provedla jejich rekonstrukce. Původním předpokladem bylo provádění rekonstrukcí pouze v místech, kde vlivem nemoci oka a její léčby byla překryta céva. To by mělo za následek přerušování cévy při extrakci. V průběhu práce a studia reálné funkčnosti dostupných algoritmů pro extrakci cévního řečiště nad dostupnými databázemi bylo zjištěno, že onemocnění sítnic oka působí na algoritmy extrahující cévní řečiště mnohem agresivnějším způsobem. Vlivem různých světelných odlesků, rychlé změny světelnosti a bohužel také kvalitou dostupných nemocných snímků byly výstupy extrakcí řečiště pro jakoukoliv rekonstrukci nedostatečné.

Zároveň ale bylo zjištěno, že i ve zdravých a méně poškozených snímcích mají algoritmy problémy se vznikem přerušovaných cév a vznikají tak absence křížení a rozdvojení. Tyto chybějící části mohou být užitečné při dalším zpracování extrahovaných řečišť snímků sítnic oka. Výsledný algoritmus tedy v cévním řečišti nachází segmenty řečiště, které nevychází z optického disku a snaží se identifikovat místo, kde mohlo vzniknout přerušování. V těchto místech se pokouší o jejich napojení (rekonstrukci). Ta probíhá dvěma způsoby. První, pouze ve skeletu cévního řečiště propojuje identifikovaná místa pomocí polynomů a vytváří tak spojení přerušovaných míst. Druhý způsob se pokouší v těchto místech o dodatečnou extrakci chybějících částí.

Samotné vyhledání oblastí pro rekonstrukci probíhá ve více průchodech, kdy každý je zaměřený na jiný typ vzniku přerušování. Pro relativní a malá přerušování vykazuje algoritmus vysokou úspěšnost a nad použitými databázemi se nestávalo, že by místo pro rekonstrukci označil chybně. V případě rekonstrukce pro větší úseky se potýká algoritmus s jistou chybivostí, kdy v případě rekonstrukce propojením pomocí polynomů se mohou vytvořit neexistující spojení. Tyto chyby jsou značně eliminovány v druhém způsobu rekonstrukce, která se provádí pouze v případě, kdy se v dodatečné extrakci podaří nalézt část přerušované cévy. U posledního průchodu rekonstrukce rozdvojení se algoritmus chová až na výjimky stabilně, úspěšnost určení místa napojení je necelých 82 % a díky tomuto průchodu je ze snímku získáno značné množství chybějících rozdvojení.

Způsob rekonstrukce pomocí dodatečné extrakce v problémovém místě v žádném případě při testování nezpůsobil chybné napojení přerušovaného segmentu, zároveň se ale stávalo, že ve správně lokalizovaném místě přerušování klasifikátorem neprovedl rekonstrukci z důvodu neúspěšné dodatečné extrakce. Tyto chyby by bylo možné odstranit implementací vlastního, sofistikovanějšího algoritmu pro extrakci cévního řečiště, který by nepracoval na principu zvýraznění tmavých částí (cév) a poté adaptivním prahováním, ale spočíval by v extrakci například pomocí neuronových sítí.

Jedním z potencionálně praktických využití této práce je použití výstupů rekonstrukce pomocí dodatečné extrakce. Vstupní extrahovaná řečiště po aplikaci tohoto algoritmu získávají obsáhlejší řečiště, ve kterém se nachází chybějící rozdvojení a křížení, o jejichž lokalizaci se snaží i například práce, ze které byl použit algoritmus pro zvýraznění cévního řečiště. Ten by v případě přidaného kroku rekonstrukce dokázal lokalizovat více přerušení a dosahoval tak lepších výsledků.

Literatura

- [1] Aubrecht, T.: *Detekce onemocnění ve snímku sítnice oka*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Brno, 2018, Vedoucí práce Ing. Lukáš Semerád.
- [2] Augenarzt-luecking.de: *Ruční fundus kamera*. [Online; navštíveno 15.01.2019]. URL <http://www.augenarzt-luecking.de/index.php?id=25>
- [3] Beran, V.; Španěl, M.: *Obrazové segmentační techniky*. [Online; navštíveno 12.01.2019]. URL <http://www.fit.vutbr.cz/~spanel/segmentace/>
- [4] Bradski, D. G. R.; Kaehler, A.: *Learning Opencv*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2008, ISBN 978-0-596-51613-0.
- [5] Chrapek, O.: Současné možnosti léčby vlhké formy věkem podmíněné makulární degenerace. *Remedia*, ročník 17, č. 6, 2007: s. 610–614, ISSN 2336-3541.
- [6] Cocky-kontaktni.cz: *Popis sítnice*. [Online; navštíveno 13.01.2019]. URL <https://www.cocky-kontaktni.cz/slovník/sitnice.html>
- [7] Csillag, A.: *Atlas of the sensory organs : functional and clinical anatomy*. Totowa, N.J: Humana Press, 2005, ISBN 978-1-58829-412-8.
- [8] Drahanský, M.: *Biometrie*. Brno: Computer Press a.s., 2011, ISBN 987-80-254-8979.
- [9] Hlaváč, V.: *Matematická morfologie*. [Online; navštíveno 12.02.2019]. URL <http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZpr0br/71-3MatMorpholBinCz.pdf>
- [10] Horák, K.: *Morfologické operace*. [Online; navštíveno 18.03.2019]. URL http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/Exercise10/content_cz.php
- [11] Hrazdira, I.; Mornstein, V.: *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. Brno: Neptun, 2004, ISBN 80-902896-1-4.
- [12] Hrvolová, B.: *Biofyzika*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013, ISBN 978-80-248-3105-3.
- [13] Hycl, J.; Trybučková, L.: *Atlas oftalmologie*. Praha: Triton, 2008, ISBN 978-80-7387-160-4.
- [14] Jelínek, J.; Zicháček, V.: *Biologie pro gymnázia*. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2000, ISBN 80-7182-107-1.

- [15] Kauppi, T.; Kalesnykiene, V.; aj.: *DIARETDB0: Standard Diabetic Retinopathy Database*. [Online; navštíveno 15.01.2019].
URL <http://www.it.lut.fi/project/imageret/>
- [16] Kršek, P.: *Základy počítačové grafiky*. [Online; navštíveno 12.01.2019].
URL https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/cfs.php.cs?file=%2Fcourse%2FIZG-IT%2Ftexts%2Fizg_opora.pdf
- [17] Li; Stan, Z.: *Encyclopedia of Biometrics*. Boston: Springer Science and Business Media, 2009, ISBN 978-0-387-73002-8.
- [18] Mudassar, A. A.; Butt, S.: Extraction of Blood Vessels in Retinal Images Using Four Different Techniques. [Online; navštíveno 08.04.2019].
URL <https://doi.org/10.1155/2013/408120>
- [19] Neovize.cz: *Oční koherenční tomograf*. [Online; navštíveno 15.01.2019].
URL <https://www.neovize.cz/odborna-ocni-vysetreni/vysetreni-oct-ocni-koherencni-tomograf/>
- [20] Novozámský, A.: *Houghova transformace*. [Online; navštíveno 18.03.2019].
URL <http://zoi.utia.cas.cz/files/roz2/cv7-Houghova%20transformace.pdf>
- [21] Ose.zshk.cz: *Vyšetřovací metody oftalmoskopie*. [Online; navštíveno 12.01.2019].
URL <https://ose.zshk.cz/vyuka/diagnostika.aspx?id=240>
- [22] Pašta, J.: *Základy očního lékařství*. Praha: Nakladatelství Karolinum, 2017, ISBN 978-80-246-2460-0.
- [23] Perušicová, J.: *Diabetická makroangiopatie a mikroangiopatie*. Praha: Galén, 2003, ISBN 80-726-2187-4.
- [24] Pres, M.: *Lokalizace bifurkací ve snímcích sítnice*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Brno, 2016, Vedoucí práce Ing. Lukáš Semerád.
- [25] Pulchart.com: *Fundus kamera*. [Online; navštíveno 15.01.2019].
URL <http://www.pulchart.com/?p=genesis>
- [26] Raj, V.; Devi, V.: *Retinal Image Analysis Using Fovea Detection using Unsymmetrical Trimmed Median Filter*. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, ročník 3, č. 3, 2013: s. 263–269, ISSN 2277-3754.
- [27] Rosettacode.org: *Zhang-Suen thinning algorithm*. [Online; navštíveno 15.03.2019].
URL https://rosettacode.org/wiki/Zhang-Suen_thinning_algorithm#Java
- [28] Ryan, S.: *Retina*. Philadelphia: Elsevier/Mosbyr, 2006, ISBN 978-0-323-04323-6.
- [29] Saine, P.: *Ophthalmic photography: retinal photography, angiography, and electronic imaging*. Boston: Butterworth–Heinemann, 2002, ISBN 978-0-7506-7372-3.
- [30] WikiSkripta.eu: *Biologie procesu vidění*. [Online; navštíveno 12.01.2019].
URL https://www.wikiskripta.eu/w/Biochemie_procesu_vid%C4%9Bn%C3%AD

- [31] WikiSkripta.eu: *Odchlípení sítnice*. [Online; navštíveno 12.01.2019].
URL https://www.wikiskripta.eu/w/Odchl%C3%ADpen%C3%AD_s%C3%ADtnice
- [32] WikiSkripta.eu: *Schéma lidského oka*. [Online; navštíveno 12.01.2019].
URL https://www.wikiskripta.eu/w/Soubor:Schematic_diagram_of_the_human_eye_cs.svg#file
- [33] Wojtkowski, M.; Kowalczyk, A.; Leitgeb, R.; aj.: Full range complex spectral optical coherence tomography technique in eye imaging. *Opt. Lett.*, ročník 27, č. 16, 2002: s. 1415–1417.
- [34] Štrofová, H.: *Věkem podmíněná makulární degenerace*. *Klinická farmakologie a farmacie*, ročník 27, č. 2, 2013: s. 68–74, [Online; navštíveno 12.01.2019].
URL <https://www.klinickafarmakologie.cz/pdfs/far/2013/02/04.pdf>
- [35] Švambergová, Z.: *Diabetická retinopatie*. Bakalářská práce, Masarykova univerzita, Lékařská fakulta, Brno, 2014, Vedoucí práce MUDr. Monika Synková.

Příloha A

Obsah příloženého CD

Příložené CD obsahuje adresářovou strukturu a soubory:

- **databáze/** - obsahuje originální snímky sítě a jejich extrahované řečiště
- **implementace/**
 - **zdrojové soubory/** - zdrojové kódy programu
 - **spustitelné soubory/** - dva spustitelné soubory pro systémy Linux a Windows
 - **opencv/** - obsahuje dynamickou část OpenCV knihovny
 - **readme.txt** - návod k zprovoznění programu
- **písemná zpráva/**
 - **latex/** - zdrojové kódy písemné práce pro vytvoření PDF
 - **xkozel18.pdf** - text bakalářské práce v PDF formátu
- **testování/**
 - **podklady/** - výstupy algoritmu pro příložené databáze
 - **výsledky.xml** - soubor s výsledky manuálního testování

Příloha B

Výsledky testování jednotlivých snímků

Tato příloha obsahuje výsledky testování pro jednotlivé databáze a jejich snímky. Vyhodnocení probíhalo nad každým snímkem, z níže uvedených hodnot byly poté výsledky zprůměrovány a použity v hlavním textu práce. Vysvětlení zkratk pro testování rekonstrukce pomocí polynomů (číslo vždy udává počet pokud není v záhlaví tabulky specifikováno jinak):

- **FPT** – správně rekonstruovaná céva prvním průchodem (*first pass true*)
- **FPF** – chybně rekonstruovaná céva prvním průchodem (*first pass false*)
- **SPT** – správně rekonstruovaná céva druhým průchodem (*second pass true*)
- **SPF** – správně rekonstruovaná céva druhým průchodem (*second pass false*)
- **SPH** – při chybné rekonstrukci vzniklo neexistující křížení (*second pass hard*)
- **TPT** – správně rekonstruovaná céva třetím průchodem (*third pass true*)
- **TPF** – chybně rekonstruovaná céva třetím průchodem (*third pass false*)
- **IS** – počet všech přerušených segmentů (*interrupted segments*)
- **RS** – počet zrekonstruovaných přerušení (*reconstructed segments*)
- **SR** – poměr úspěšně provedených rekonstrukcí:

$$SR = \frac{FTP + SPT + TPT}{RS} \quad (\text{B.1})$$

- **RR** – udává poměr rekonstruovaných cév ku počtu všech přerušení:

$$SR = \frac{RS}{IS} \quad (\text{B.2})$$

ID	FPT	FPF	SPT	SPF	SPH	TPT	TPF	IS	RS	SR (%)	RR (%)
1	0	0	0	1	1	2	0	4	3	66,67	75
2	0	0	0	0	0	3	0	4	3	100	75
3	0	0	2	1	0	1	0	5	4	75	80
4	1	0	1	0	0	1	0	3	3	100	100
5	1	0	1	0	0	2	1	7	5	80	71,43
6	0	0	0	0	0	1	0	2	1	100	50
7	0	0	4	0	0	0	0	6	4	100	66,67
8	1	0	0	1	0	2	0	5	4	75	80
9	0	0	0	0	0	2	0	3	2	100	66,67
10	0	0	1	0	0	0	0	2	1	100	50
11	1	0	0	0	0	0	0	2	1	100	50
12	0	0	1	1	0	1	1	5	4	50	80
13	1	0	2	1	0	3	0	7	7	85,71	100
14	0	0	2	1	0	0	0	4	3	66,67	75
15	0	0	0	0	0	1	0	2	1	100	50
16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0	1	2	2	50	100
18	0	0	1	0	0	0	0	4	1	100	25
19	1	0	1	0	0	2	1	6	5	80	83,33
20	0	0	2	0	0	2	0	6	4	100	66,67
21	0	0	0	2	1	2	0	6	4	50	66,67
22	0	0	1	0	0	2	1	5	4	75	80
23	1	0	2	1	0	1	0	5	5	80	100
24	1	0	2	0	0	2	1	8	6	83,33	75
Σ	9	0	23	9	2	30	6	104	77	80,52	74,04

Tabulka B.1: Výsledky testování jednotlivých snímků nad databází DRIVE.

ID	FPT	FPF	SPT	SPF	SPH	TPT	TPF	IS	RS	SR (%)	RR (%)
1	0	0	4	3	2	4	2	19	13	61,54	68,42
2	0	0	3	2	1	2	0	22	7	71,43	31,82
3	1	0	6	0	0	1	1	16	9	88,89	56,25
4	1	0	6	2	1	4	1	19	14	78,57	73,68
5	1	0	6	0	0	3	0	17	10	100	58,82
6	0	0	6	1	0	4	1	18	12	83,33	66,67
7	3	0	4	1	1	0	0	11	8	87,50	72,73
8	6	0	3	0	0	1	0	11	10	100,00	90,91
9	0	0	8	2	0	5	0	17	15	86,67	88,24
10	0	0	7	1	0	1	1	12	10	80,00	83,33
11	1	0	4	2	1	1	0	14	8	75,00	57,14
12	1	0	6	0	0	6	0	17	13	100,00	76,47
13	1	0	6	1	0	3	0	16	11	90,91	68,75
14	1	0	9	5	0	3	2	29	20	65,00	68,97
15	0	0	10	4	1	4	1	24	19	73,68	79,17
Σ	16	0	88	24	7	42	9	262	179	81,56	68,32

Tabulka B.2: Výsledky testování jednotlivých snímků nad databází GOLD – G.

ID	FPT	FPF	SPT	SPF	SPH	TPT	TPF	IS	RS	SR (%)	RR (%)
1	2	0	5	0	0	2	1	11	10	90,00	90,91
2	0	0	0	1	0	1	0	7	2	50,00	28,57
3	0	0	2	1	0	2	0	6	5	80,00	83,33
4	0	0	4	1	0	5	0	19	10	90,00	52,63
5	2	0	2	1	1	8	1	19	14	85,71	73,68
6	2	0	7	1	0	5	0	20	15	83,33	75,00
7	2	0	8	1	0	5	1	24	17	88,24	70,83
8	2	0	3	2	0	4	1	20	12	75,00	60,00
9	2	0	5	0	0	5	1	15	13	92,31	86,67
10	0	0	6	2	0	4	1	20	13	76,92	65,00
12	2	0	8	2	1	7	0	25	19	89,47	76,00
13	1	0	6	1	0	4	0	19	12	91,67	63,16
14	0	0	6	3	0	5	1	16	15	73,33	93,75
15	0	0	4	0	0	2	0	14	6	100,00	42,86
Σ	15	0	66	16	2	59	7	235	163	85,89	69,36

Tabulka B.3: Výsledky testování jednotlivých snímků nad databází GOLD – H.

Vysvětlení parametrů pro testování rekonstrukce pomocí dodatečné extrakce (číslo vždy udává počet pokud není v záhlaví tabulky specifikováno jinak):

- **PC** – správně identifikované přerušení (*possible connections*)
- **RI** – úspěšně provedená rekonstrukce (*reconstructed interruptions*)
- **NC** – nově zrekonstruované křížení cév (*new cross*)
- **NS** – nově zrekonstruované rozdvojení (*new split*)
- **SR** – poměr úspěšně provedených rekonstrukcí (*success rate*)

$$SR = \frac{RI}{PC} \quad (\text{B.3})$$

ID	PC	RI	NC	NS	SR (%)
1	2	2	3	1	100,00
2	3	3	0	3	100,00
3	3	2	1	2	66,67
4	3	1	0	1	33,33
5	4	3	0	4	75,00
6	1	1	1	0	100,00
7	4	4	0	1	100,00
8	3	3	1	1	100,00
9	2	2	0	2	100,00
10	1	1	1	1	100,00
12	2	2	0	2	100,00
13	6	5	2	2	83,33
14	2	2	1	3	100,00
15	1	0	0	0	0,00
16	0	0	0	0	-
17	1	1	0	1	100,00
18	1	0	0	0	0,00
19	4	4	1	7	100,00
20	4	3	0	4	75,00
Σ	48	40	39	118	83,33

Tabulka B.4: Výsledky testování rekonstrukce pomocí dodatečné extrakce (DRIVE).

ID	PC	RI	NC	NS	SR (%)
1	8	6	1	10	75,00
2	5	4	1	3	80,00
3	8	6	2	3	75,00
4	11	10	3	8	90,91
5	10	10	2	6	100,00
6	10	8	3	4	80,00
7	7	4	0	5	57,14
8	10	8	1	4	80,00
9	13	11	0	8	84,62
10	8	7	2	2	87,50
11	6	5	2	3	83,33
12	13	11	4	4	84,62
13	10	7	1	4	70,00
14	13	8	2	6	61,54
15	14	5	1	2	35,75
Σ	156	117	42	146	75,00

Tabulka B.5: Výsledky testování rekonstrukce pomocí dodatečné extrakce (GOLD - G).

ID	PC	RI	NC	NS	SR (%)
1	9	6	1	4	66,67
2	1	1	1	0	100,00
3	4	4	0	2	100,00
4	9	7	1	5	77,78
5	12	9	3	6	75,00
6	14	10	6	4	71,43
7	15	10	0	8	66,67
8	9	6	1	8	66,67
9	12	6	1	10	75,00
10	10	7	1	6	70,00
12	17	8	0	4	47,06
13	11	9	0	7	81,82
14	11	8	1	6	72,73
15	6	4	1	4	66,67
Σ	227	160	17	74	70,48

Tabulka B.6: Výsledky testování rekonstrukce pomocí dodatečné extrakce (GOLD - H).