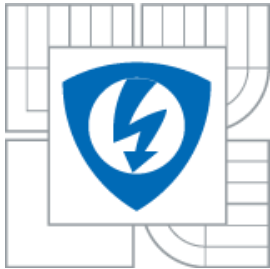




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

LOKALIZACE OPTICKÉHO DISKU NA SNÍMCÍCH SÍTNICE

LOCALISATION OF THE OPTIC DISC FROM FUNDUS PHOTOGRAPHS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. BARBORA PĚCHOTOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ODSTRČILÍK

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské a ekologické inženýrství

Studentka: Bc. Barbora Pěchotová

ID: 132185

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Lokalizace optického disku na snímcích sítnice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte vlastnosti retinálních snímků z digitální fundus kamery. Zaměřte se zejména na vlastnosti struktury optického disku (OD). 2) Prostudujte dostupné prameny o metodách lokalizace OD a zaměřte se zejména na automatické metody využívající modelu cévního řečiště. 3) Navrhnete metodiku lokalizace OD a implementujte automatický detektor OD s využitím programového prostředí MATLAB. 4) K vytvořeným programovým modulům zpracujte přehledný návod k obsluze. 5) Proveďte testování vytvořené metody na dostupných obrazových datech. 6) Závěrem diskutujte a zhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LOWELL, J., et al.: Optic Nerve Head Segmentation. IEEE Trans. on Medical Imaging, vol. 23, no. 2, 2004, pp. 256-264.
[2] FORACCHIA, M., et al.: Detection of Optic Disc in Retinal Images by Means of a Geometrical Model of Vessel Structure. IEEE Trans. on Medical Imaging, vol. 23, no. 10, 2004, pp. 1189-1195.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Jan Odstrčilík

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNENÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá analýzou retinálních snímků z digitální fundus kamery, zejména vlastnostmi struktury optického disku (OD). Teoreticky popisuje základní vlastnosti lidského zrakového systému a princip vyšetření očního pozadí, jehož výstupem jsou právě zkoumané retinální snímky. V práci jsou zmíněny dostupné metody, které již byly pro lokalizaci OD použity. V druhé části je navržen automatický detektor optického disku, založený na principu genetických algoritmů s využitím segmentace cévního řečiště sítnice. Tato metoda je otestována na snímcích databáze.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optický disk, oční pozadí, retinální snímky, cévní segmentace, genetický algoritmus.

ABSTRACT

This thesis deals with the analysis of retinal images from digital fundus camera, especially with structure of optic disc (OD). The theoretic part describes main features of the human visual system and princip of eyeground examination. The paper discussed several available methods that have been used for localization of the optic disc. In the second part is proposed the automatic detector of the optic disc based on the principle of genetic algorithm by using the method of segmentation of vessels by matched filtering. Original images are tested with this automatic method.

KEYWORDS

Optic disc, eyeground, retinal images, vessel sementation, genetic algorithm.

PĚCHOTOVÁ, B. *Lokalizace optického disku na snímcích sítnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. viii, 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Odstrčilík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Lokalizace optického disku na snímcích sítnice* jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Janu Odstrčilíkovi za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala rodině a přátelům za morální podporu při studiu.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Seznam obrázků	viii
ÚVOD	9
1 ANATOMIE ZRAKOVÉHO ORGÁNU	10
1.1 Stavba oka.....	10
1.2 Nervus opticus - zrakový nerv	12
2 VYŠETŘENÍ OČNÍHO POZADÍ	14
2.1 Oční pozadí	14
2.2 Fundus kamera.....	15
2.3 Průběh vyšetření	17
2.4 Onemocnění očního pozadí	17
2.4.1 Glaukom.....	17
2.4.2 Retinopatie	18
3 POPIS OBRAZOVÝCH DAT PRO ANALÝZU	20
3.1 Obecný popis snímku sítnice	20
3.2 Databáze obrazových dat	21
4 REŠERŠE METOD LOKALIZACE OPTICKÉHO DISKU	23
4.1 Shlukování a PCA metoda.....	23
4.2 Analýza hlavních komponent a metody registrace objektů v obraze	24
4.3 Detekce obrysů objektů a vlnková transformace	24
4.4 Sobelova metoda detekce hran a regrese metodou nejmenších čtverců	25
4.5 Barevná morfologie	26
4.6 Hranová segmentace optického disku.....	26
4.6.1 Houghova transformace	26
4.6.2 Aktivní kontury	27
4.7 Metoda založená na texturní analýze.....	27
4.8 Aktivní topologické sítě (TAN).....	28
4.9 Lokalizační algoritmus	28
4.10 Fuzzy metody.....	29
4.11 Metoda využívající cévní strukturu	30
4.12 Detekce optického disku pomocí geometrického modelu cévního řečiště	30

5	SEGMENTACE CÉVNÍHO ŘEČIŠTĚ POMOCÍ PŘÍZPŮSOBENÉ FILTRACE	32
6	TEORETICKÉ POZADÍ APLIKACE PRO LOKALIZACI OD	35
6.1	Základní morfologické operace pro zpracování obrazu	35
6.1.1	Eroze	35
6.1.2	Dilatace	35
6.1.3	Otevření a uzavření	36
6.1.4	Skeletonizace	36
6.2	Evoluční algoritmy	36
6.2.1	Genetické algoritmy (GA)	36
7	NÁVRH APLIKACE AUTOMATICKÉHO DETEKTORU OPTICKÉHO DISKU	40
7.1	Předzpracování dat.....	40
7.2	Předzpracování obrazu – morfologické operace.....	41
7.3	Způsob hledání paraboly.....	42
7.4	Zpracování směrových map – vytvoření genofondu	44
7.5	Vytvoření jedince a hledání řešení.....	47
7.6	Zobrazení výsledků.....	50
8	VYHODNOCENÍ METODY	53
8.1	Testování úspěšnosti metody	59
9	POPIS PROGRAMOVÝCH MODULŮ	60
10	ZÁVĚR	62
	LITERATURA	64
	SEZNAM ZKRATEK	70
	SEZNAM PŘÍLOH	71
A	OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	71

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Schéma horizontálního řezu pravým okem.	12
Obr. 1.2: Struktura sítnice.	12
Obr. 1.3: Zrakový nerv.	13
Obr. 2.1: Schéma očního pozadí.	14
Obr. 2.2: Principiální schéma fundus kamery.	15
Obr. 2.3: a) snímek sítnice zdravého oka, b) snímek oka s glaukomem.	18
Obr. 2.4: a) snímek sítnice oka s NPDR, b) snímek sítnice oka s PDR.	19
Obr. 3.1: Příklad snímků sítnice:	21
Obr. 3.2: Příklady snímků sítnice z databáze.	22
Obr. 4.1: Lokalizace OD na snímcích sítnice.	23
Obr. 4.2: Nalezení hranic OD.	24
Obr. 4.3: Lokalizace OD.	25
Obr. 4.4: Příklad detekovaného OD.	25
Obr. 4.5: Rozpoznání OD a makuly na fundus snímku.	26
Obr. 4.6: Lokalizace OD pomocí aktivních kontur.	27
Obr. 4.7: Výsledky detekce OD.	28
Obr. 4.8: Výsledek lokalizačního algoritmu.	29
Obr. 4.9: Příklady správného určení polohy OD.	30
Obr. 4.10: Obrázek sítnice s cévním řečištěm a OD.	31
Obr. 5.1: Příklady masky rotující v rozmezí 0° - 165° s krokem 15°	32
Obr. 5.2: Příklad parametrického obrazu obsahujícího maxima všech odpovědí filtru.	33
Obr. 5.3: Celkový výsledek cévní segmentace.	33
Obr. 5.4: Barevné označení pixelů na základě detekce orientace cév.	34
Obr. 5.5: Zdravý snímek z databáze a jeho zpracování.	34
Obr. 7.1: Originální snímek a směrová mapa.	40
Obr. 7.2: Nevhodně proložená parabola na snímku cévní struktury.	41
Obr. 7.3: Kontury cév a jejich distanční mapa.	46
Obr. 7.4: Skeletonizace.	47
Obr. 7.5: Skeleton cév spolu s vykreslením paraboly.	50
Obr. 7.6: Kontury cévní struktury.	51
Obr. 7.7: Tloušťková hodnotící mapa.	51
Obr. 7.8: Genofond s vykreslením paraboly.	52
Obr. 7.9: Vykreslení originálního snímku s detekcí optického disku (zelený křížek).	52
Obr. 8.1: Výsledky odhadu OD pro jednotlivé snímky a odpovídající binární masky.	57
Obr. 8.2: Výsledky detekce OD na základě počtu jedinců generace a části výpočtu.	58

ÚVOD

Pro správnou lokalizaci optického disku na snímcích sítnice je nejprve potřeba objasnit základní anatomickou stavbu lidského oka a na tyto poznatky navázat důkladnějším zkoumáním vlastností sítnice a obrazů pořízených digitální fundus kamerou při vyšetření očního pozadí. Základními objekty, které můžeme identifikovat na snímcích sítnice, jsou žlutá skvrna, cévní řečiště, nervová vlákna a slepá skvrna (místo kde vychází zrakový nerv). Terč zrakového nervu můžeme označit pojmem optický disk (OD). Axony gangliových buněk sítnice se na nitrooční ploše sbíhají k optickému disku, který leží na zadní stěně sítnice, a odtud dále projdou stěnou očního bulbu a vytváří zrakový nerv vedoucí přímo do mozku. Vyšetření očního pozadí pomocí digitální fundus kamery je dnes široce využíváno pro diagnostiku onemocnění.

Spolehlivá lokalizace optického disku je velmi významnou součástí automatického vyšetření očního pozadí a je důležitá pro diagnózu z onemocnění oka jako zraková atrofie, zánět zrakového nervu, ischemická oční neuropatie, zelený zákal (glaukom) a zároveň i pro obecnější onemocnění lidského těla (cukrovka, arteriální hypertenze) [11].

Na téma lokalizace a analýzy tvaru optického disku byly publikované různé vědecké práce, např. [13], [14], [31], [32], [33]. Analýzou nervových vláken se zabývají například práce [15], [16]. Automatickou analýzou velikosti a tvaru optického disku na snímcích sítnice se zabývá např. práce [31]. Práce z roku 2009 [32] prezentuje metodu klasifikace glaukomu na základě hodnocení morfologie OD pomocí parametru C/D (Cup-to-Disc ratio) a dalších dvou příznaků – poměru vzdálenosti mezi středem OD a jeho okrajem k celkovému průměru optického disku a parametr ISNT (poměr celkové plochy cév na dolní a horní straně OD k celkové ploše cév v nasální a temporální oblasti). K lokalizaci OD je často také využíváno analýzy hlavních komponent (PCA) [19], [42], [43]. R. Bock prezentuje ve své práci [33] využití morfologických parametrů OD ke stanovení kvantitativního parametru charakterizujícího podezření na onemocnění glaukomem, tzv. GRI – Glaucoma Risk Index. Z novějších prací můžeme zmínit např. práci [58], [59], [60], [60] [62] a [63][63].

V této práci je vytvořena stručná rešerše dosud publikovaných metod, které již byly převážně úspěšně k lokalizaci OD použity. Vlastní návrh algoritmu je implementován v programovém prostředí MATLAB R2009 a je založen na myšlence parabolického tvaru cévní struktury aplikované spolu v kombinaci s metodou genetického algoritmu.

1 ANATOMIE ZRAKOVÉHO ORGÁNU

Oční koule je nejdůležitější součástí zrakového orgánu pro vnímání obrazové informace. Oko je malý párový orgán, který má v průměru jen něco přes 20 mm (Obr. 1.1). Přesto je velmi důležitý, neboť zrakem vnímáme 75 – 85 % okolí. Správnou funkci oka zajišťují přídatné orgány. Oko je uloženo v kostní schránce – očníci, která zajišťuje mechanickou ochranu oka [1].

1.1 Stavba oka

Stěna oční koule je tvořena třemi vrstvami. Zevní vrstva oční koule se rozděluje na bělimu a rohovku.

Bělíma (*sclera*) tvoří asi 5/6 povrchu oční koule. Je tvořena hustým kolagenním vazivem, které pozorujeme jako bílý obal oka. Její funkcí je udržovat tvar bulbu a poskytovat mu i mechanickou ochranu. Bělíma je v zadní části perforovaná prostupem vláken zrakového nervu. V přední části bělimy přechází v průhlednou rohovku (*cornea*). Rohovka tvoří přední oddíl oka a je vyklenuta směrem dopředu. Za rohovkou se nachází přední komora oka, která je vyplněna komorovou vodou [1].

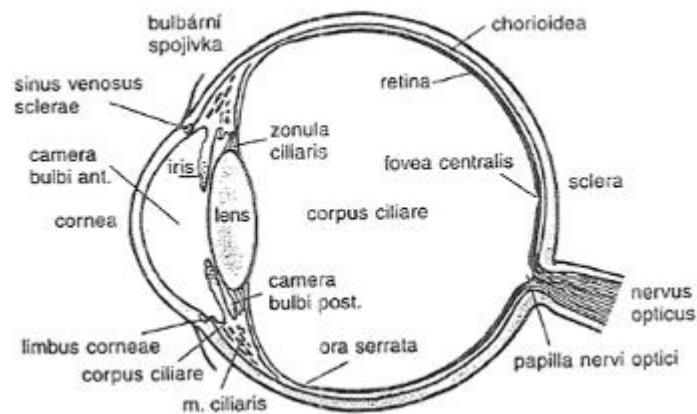
Střední vrstvu oční bulby tvoří žilnatka (*uvea*). Obsahuje početné cévy a pigmentové buňky melanocyty, které spolu s pigmentovým epitelem sítnice zabraňují odrazu světla uvnitř oka. Část žilnatky se označuje jako cévnatka (*choroidea*). Kapiláry cévnatky zprostředkovávají výživu pro sítnici. Přední část žilnatky přechází v prstenec hladkých svalů a vaziva – řasnaté tělíčko, které mění zakřivení čočky. Tento jev se nazývá akomodace oka a umožňuje přizpůsobení zraku dané vzdálenosti pozorované věci. Žilnatka se v místě řasnatého tělíška odpoutává od bělimy a vytváří duhovku (*iris*). Duhovka je kruhový terčík z hladkého svalstva s kruhovým otvorem uprostřed – zornice (*pupila*). Průsvit zornice upravují dva duhovkové svaly, svěrač a rozvěrač zornice. Tím regulují světlo dopadající na sítnici. Množství pigmentových buněk ovlivňuje výsledné zabarvení oka [1]. Čočka (*lens*) bikonvexního tvaru je zavěšena na vazivových vláčkách, které vycházejí z řasnatého tělíška. Tvořena je rosolovitou, průhlednou hmotou s jemným vazivovým pouzdrem. Je součástí světlolomného systému oka. Prostor za čočkou je vyplněn sklivcem (*corpus vitreum*). Jeho huspeninová konzistence je dána vysokým obsahem kyseliny hyaluronové. Od povrchu sítnice je oddělen bazální laminou. Je bezcévný a udržuje nitrooční tlak oční koule [1], [2].

Ve vnitřní vrstvě oční koule se rozprostírá sítnice (*retina*) (Obr. 1.2). Je složena z několika vrstev. Zevní, tj. k cévnatce přivrácený povrch kryje pigmentový epitel a ten

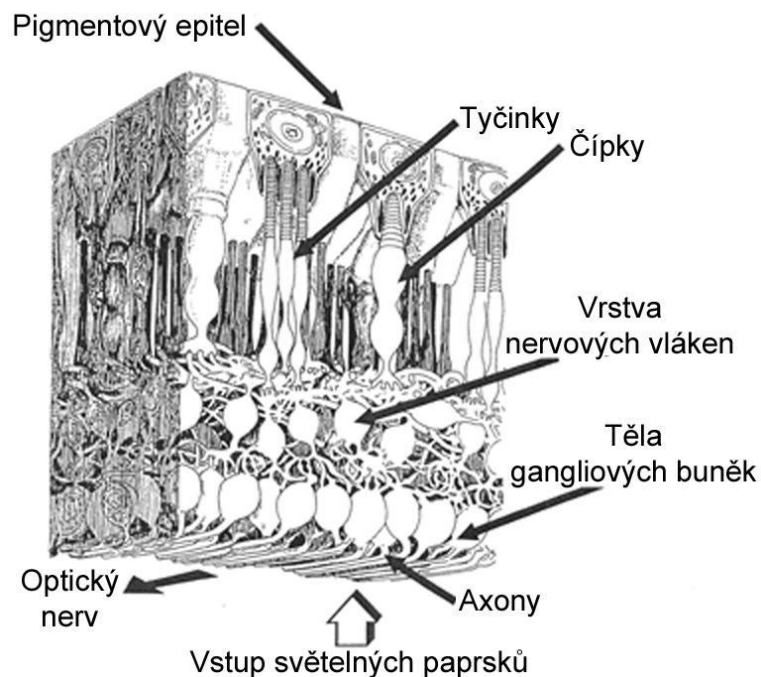
je v kontaktu se zevními segmenty tyčinek a čípků. Těla fotoreceptorů, stejně jako další vrstvy sítnice, s nimiž jsou tyto buňky v kontaktu, jsou uspořádány směrem k vnitřnímu prostředí oka vyplněného sklivcem [1], [2], [3]. První ze světločivných elementů jsou tyčinky. Jsou citlivější a dokáží reagovat již při malém množství světla. Působí jako receptory za šera a za tmy, zaznamenávají pouze odstíny šedi. Mají světločivný úsek – tzv. zevní segment, ve kterém jsou uspořádány ploché vezikuly obsahující zrakové barvivo rhodopsin, rudě zbarvený pigment citlivý na světlo. Pokud rhodopsin absorbuje světlo, rozpadá se na dvě podjednotky. Na opsin (bezbarvý protein) a na retinal (derivát vitamínu A). Tato chemická změna vyvolává nervové vzruchy, které vychází na druhé straně tyčinky zaoblenou nožkou a končí synapsí s dendrity bipolárních neuronů. Tyčinek je asi 120 milionů. Čípky jsou na rozdíl od tyčinek méně citlivé a jsou aktivní při větším stupni osvětlení. Mají podobnou stavbu, liší se tvarem, jsou menší a konické. Čípky obsahují tři odlišné typy barviva – iodopsinu – které jsou různě citlivé ke světlu o rozdílné vlnové délce. Tím vniká citlivost ke třem základním barvám (modrá, zelená, červená), z jejichž kombinací je složen barevný obraz. Stejně jako u tyčinek vyvolává přeměna iodopsinu nervové vzruchy. Oko obsahuje asi 6 -7 milionů čípků.

Značně zpracovaný signál je poté dále předáván multipolárním neuronům (gangliové buňky). Tato trojice: zrakové buňky – bipolární neurony – multipolární neurony - slouží k částečnému zpracování obrazové informace již na úrovni sítnice a tím zhruba stonásobně redukuje počet axonů odvádějících informaci z oka do centrální nervové soustavy [1].

Místo nejostřejšího vidění leží v zorné ose oka na sítnici a říká se mu žlutá skvrna (*macula lutea*). Oftalmoskopem ji lze rozeznat jako malou jamku (*fovea centralis maculae*) o délce 1/3mm. Obsahuje převážně čípky. Označení čípků písmeny S, M, L značí jejich citlivost ke krátkým, středním a dlouhým vlnovým délkám. Naše vidění je tedy trichromatické. Bipolární a gangliové buňky jsou v místě žluté skvrny posunuty stranou a tak mohou fotony dopadat přímo na receptory [1].



Obr. 1.1: Schéma horizontálního řezu pravým okem. (převzato z [1])

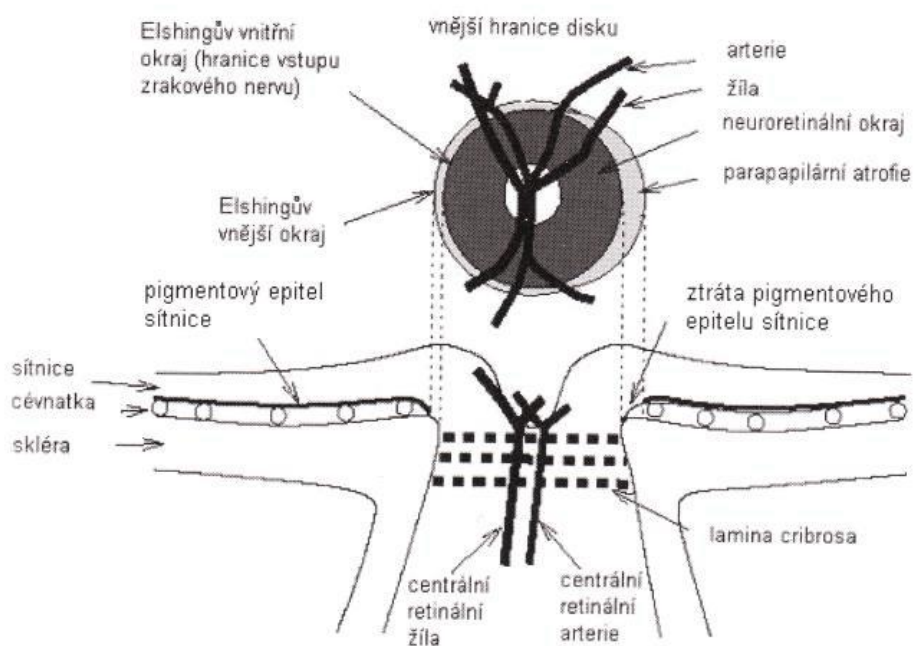


Obr. 1.2: Struktura sítnice. (převzato z [52])

1.2 Nervus opticus - zrakový nerv

Axony gangliových buněk sítnice se na nitrooční ploše sbíhají k discus nervi optici, který leží na zadní stěně sítnice a odtud dále projdou stěnou očního bulbu a vytváří zrakový nerv. Zrakový nerv má na svém povrchu mozkové obaly, protože vývojově představuje vychlípeninu CNS (Centrální nervový systém). Celý nervus opticus je dlouhý přibližně 4,5 cm, z čehož přibližně 2,8 cm probíhá v orbitě a 1 cm

uvnitř lebky. Obsahuje zhruba 1 milion nervových vláken [1], [3]. Umístění a stavba zrakového nervu je ukázána na Obr. 1.3.



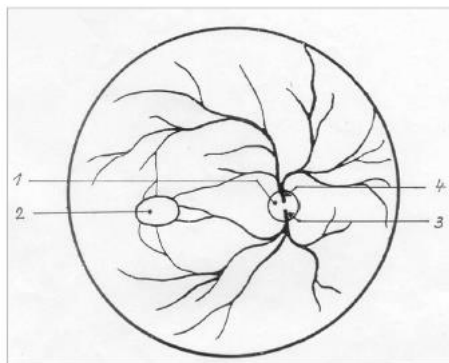
Obr. 1.3: Zrakový nerv. (převzato z [34])

2 VYŠETŘENÍ OČNÍHO POZADÍ

Původní vyšetřovací metody očního pozadí zahrnují přímou a nepřímou oftalmoskopii. Pomocí těchto metod lékař dokázal vyšetřit zadní segment oka, tedy sklivce a především sítnici a zrakový nerv. Principem vyšetření je osvětlení vnitřku oka dostatečně intenzivním světlem a pozorování paprsků odražených od sítnice. Tyto paprsky však můžeme pozorovat jedině tehdy, je-li osa pozorování souhlasná nebo velmi blízká ose osvětlení [5]. Pomocí vyšetření je možné odhalit i onemocnění jako např. onemocnění krve a kožní onemocnění, které mohou mít svůj typický obraz i na očním pozadí. Podle stavu sítnicových cév může lékař rozpoznat i podobné postižení cév dalších orgánů, např. mozku, ledvin nebo srdce. Výsledky oftalmologického vyšetření jsou tedy velmi důležité pro celkovou diagnózu pacienta [35].

2.1 Oční pozadí

Je to část sítnice, která se dá vyšetřit oftalmoskopem. Je na něm dobře vidět právě *discus nervi optici* – optický disk – kde se sbíhají nemyelinisovaná nervová vlákna ze zrakového nervu, tj. z gangliových buněk sítnice (Obr. 2.1). Obraz, který sem dopadá, nemůže být vnímán, protože v místě optického disku nejsou žádné světločivné buňky (tyčinky či čípky). Proto je často toto místo označováno jako „slepá skvrna“. Optický disk je kruhový terč, který má v průměru okolo 15 mm, na sítnici je toto místo zcela zaplněno nervovými vlákny. Při vyšetření očního pozadí vidíme toto místo jako bělavé, lehce vystouplé [9]. V místě, kde se nachází optický disk, je sítnice pevně spojena s hlubšími vrstvami. V ostatních částech leží sítnice víceméně volně, na epitelu ji drží tlak sklivce zevnitř oka [1], [3].

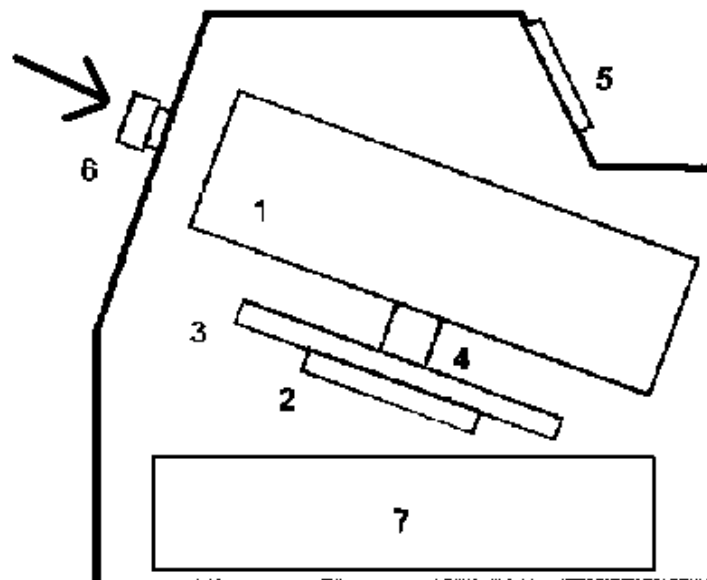


Obr. 2.1: Schéma očního pozadí

1 – *discus nervi optici*, 2 – macula, 3 – dolní větev a. *centralis retinae*, 4 – horní větev a. *centralis retinae* (převzato z [4])

2.2 Fundus kamera

V současné době se do popředí mezi vyšetřovacími metodami očního pozadí a jeho struktur (žlutá skvrna, slepá skvrna, cévní systém, nervová vlákna a patologické nálezy) dostávají přístroje umožňující záznam obrazu sítnice na klasické fotografie či ve formě digitálního obrazu [5]. Jsou široce využívány pro diagnostiku onemocnění spojených s diabetem, diagnostiku zeleného zákalu a pro určení degenerativních změn souvisejících s věkem pacienta. Zahájení léčby v počátcích onemocnění může být účinné až v 60 % případů. To je jasný signál pro rozvoj screeningového programu pomocí digitální fundus kamery. Fundus kamera je komplexní optická soustava pro zobrazení sítnice oka. (Obr. 2.2) Je to retinální kamera, jejíž optický systém umožňuje korigovat i vysoké hodnoty ametropie (refrakční vada oka). Také obsahuje světelný zdroj bílého světla, kterým lze osvětlit sítnici, a CCD prvek, díky kterému je obraz zaznamenán [6]. Zobrazení definujeme jako 2-D reprezentaci trojrozměrné tkáně sítnice přenášené na obrazovou rovinu za pomoci odraženého světla. Kamera je složena ze dvou hlavních částí, mechanické a optické. Mechanická slouží k fixaci pacienta, každý drobný pohyb totiž znesnadňuje zaostření snímku a jeho stabilizaci [7]. Současné kamery již mají software pro automatické nalezení středu sítnice a zaostření. Obsahují systém automatického řízení intenzity osvětlení sítnice, kdy se vyhodnocují předchozí snímané obrazy a intenzita osvětlení se upravuje na základě průměru jasu v těchto obrazech [8].



Obr. 2.2: Principiální schéma fundus kamery
(1 – zobrazovací jednotka; 2,3,4 – poziciční jednotka; 5 – operační panel pro lékaře;
6 – objektiv; 7 – počítač) (převzato z [6])

Fundus kamera CANON CF-60 UVi

Obrazová data použitá v praktické části práce jsou z ÚBMI (Ústav biomedicínského inženýrství, FEKT, VUT v Brně) a byla snímána pomocí digitální fundus kamery CANON CF-60 UVi s vestavěným fotoaparátem CANON EOS-20D s nastaveným FOV (Field of View) 60°.

Vlastnosti

- zobrazení FOV 30°, 40°, 60°
- přesný zaostřovací systém
- nastavení pracovní vzdálenosti
- automatická expozice na 35mm barevné fotografie
- automatické natáčení
- volitelně snímání s červeným a modrozeleným filtrem
- možnost fluorescenční a indocyaninové angiografie (automatické nastavování filtrů)
- režim snímání při úzké zornici
- vestavěný fotoaparát CANON EOS-20D s 8,2 Mpix CMOS snímačem
- možnost tisku snímků

Technická specifikace:

Zorné pole FOV	60°, 40°, 30°
Zvětšení u 35 mm filmu	1.7 x (60°), 2.5 x (40°), 3.4 x (30°)
Velikosti snímků	ø29 mm x 22 mm (35 mm filmu)
	ø75 mm x 57 mm (Polaroid filmu)
Minimální průměr čočky	ø4 mm
Pracovní vzdálenost	45 mm
Rozsah nastavitelných dioptrií	-10 to +12D (bez kompenzační čočky)
	-6 to -27D (záporná kompenzační čočka)
	+9 to +32D (kladná kompenzační čočka)
Nastavení dioptrií obsluhy	± 5D
Zdroj bílého světla	300 W xenonová výbojka
Možnosti natáčení	Vertikálně: 38 mm
	Dopředu/dozadu: 70 mm
	Vpravo/vlevo: 120 mm
	Pohyb tváře: 65 mm
Rozměry	320 mm x 560 mm x 565 mm
Váha	26 kg

Zdroj: [36]

2.3 Průběh vyšetření

Než je možno přistoupit k samotnému vyšetření, je potřeba nastavit požadovanou hodnotu pro korekci refrakční vady vyšetřovaného oka. Podle typu použité fundus kamery mohou být pacientovi podány kapky k rozšíření zornic. Do software přístroje se zapíše základní anamnestická data. Pod těmito údaji lze pak výsledky vyšetření ukládat či vyhledávat. Dále je třeba nastavit parametry přístroje, mezi něž patří požadované zvětšení výsledného snímku a hodnota korekce vyšetřovaného oka. Pacienta si opře hlavu do čelní a bradové opěrky. Jakýkoliv drobný pohyb může znesnadňuje zaostření snímku a jeho stabilizaci. Lékař musí vycentrovat záměrný kříž a zaostřit snímek. Tomu mohou napomáhat buď referenční centrační tečky či další grafické pomůcky. To vše se děje pohyby ramene kamery či joysticku v předozadní a pravolevé ose. Kombinací pohybů je zaměřena požadovaná oblast, kterou si předurčíme cílenou fixací pacienta. Poté lékař spustí záznam snímku pomocí tlačítka umístěného většinou v hlavičce joysticku. V tomto okamžiku se přerušil iluminace fundu a přístroj zaznamenává pouze příchozích paprsky. Vyšetření je bezbolestné, neinvazivní a objektivní [53], [54], [55].

2.4 Onemocnění očního pozadí

Vyšetření očního pozadí slouží například k diagnostice glaukomu; diagnostice onemocnění sítnice a poruch jejího krevního zásobení a onemocnění zrakového nervu. Na očním pozadí se také projevuje řada systémových poruch, jako je hypertenze nebo diabetes mellitus.

2.4.1 Glaukom

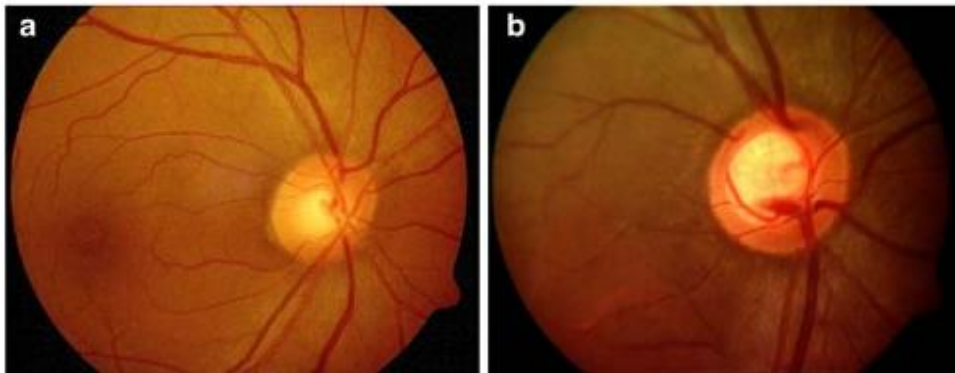
Jako glaukom můžeme označit skupinu očních chorob, které se projevují změnami zrakového nervu v závislosti na zvýšení nitroočního tlaku. Glaukom zužuje zorné pole a může vést až k úplné slepotě. Glaukom, lidově zvaný „zelený zákal“ většinou postihuje pacienty nad 40 let, avšak může se vyskytnout i u mladších pacientů. Věk není jediným faktorem, svou roli může hrát i etnický původ, rodinná zátěž nebo refrakční vady. Právě oblast optického disku je důležitá při diagnostice glaukomu. Barva terče a velikost a umístění zrakového pohárku patří mezi parametry, které nám ukazují míru glaukomového poškození. Dále se sleduje klinický vzhled vrstvy retinálních nervových vláken, které při onemocnění mění strukturu svého nařasení.

Mezi typy glaukomového onemocnění patří vývojový glaukom; glaukom otevřeného úhlu; glaukom uzavřeného úhlu a sekundární glaukom, který je reakcí na jiné

onemocnění.

Léčba glaukomu může být buď medikamentózní nebo chirurgická [1].

Srovnání fundus snímku zdravého oka a oka s glaukomem vidíme na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: a) snímek sítnice zdravého oka, b) snímek oka s glaukomem (převzato z [56])

2.4.2 Retinopatie

Označuje patologické změny sítnice a jejích cév. Poškození cév sítnice může poukazovat na poškození cév jiných orgánů, zejména mozku, srdce a ledvin.

Diabetická retinopatie (DR)

Patří mezi nejčastější onemocnění cév sítnice. Často je jedním z pozdních projevů diabetu. Pokles zraku nebo vznik slepoty u diabetiků má dvě příčiny a to buď komplikace spojené s proliferativní DR, jako je krvácení do sklivce nebo odchlípení sítnice nebo může mít souvislost se vznikem diabetické makulopatie

Klasifikace DR

1) Neproliferativní diabetická retinopatie (NPDR),

kteřá se dělí na počínající, středně pokročilou, pokročilou a velmi pokročilou. Pro tento typ retinopatie je charakteristický výskyt mikroaneuryzmat sítnice (kapilární výdutě, které mají defektní stěnu), tečkovité hemoragie, u závažnějších stavů pak tvrdá a vatovitá ložiska, větší počet stříkancovitých a plaménkovitých hemoragií, korálkovitý vzhled žilek, omega kličky (Obr. 2.4a).

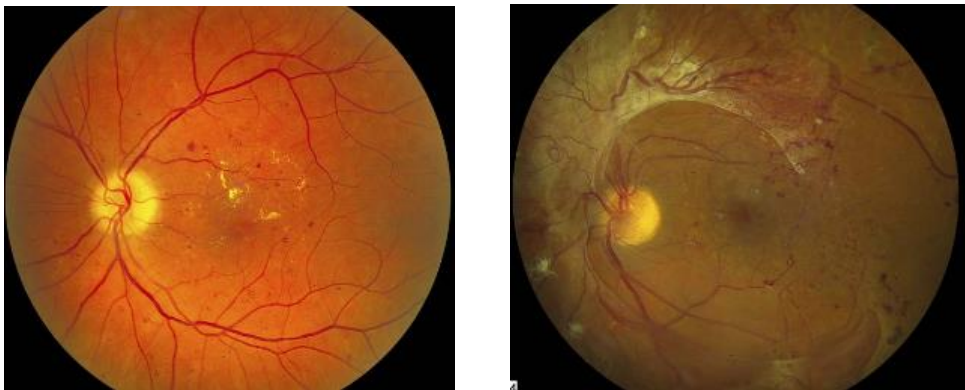
2) Proliferativní diabetická retinopatie (PDR),

kteřá již pacienta ohrožuje na ztrátě vidění. Dělí se na počínající, vysoce rizikovou a pokročilou s komplikacemi. Mezi charakteristické znaky patří sítnicové neovaskularizace, kdy se tvoří nové cévy, které vycházejí z vén. Dále je to neovaskularizace terče zrakového nervu, která je příznakem závažné ischemie sítnice (Obr. 2.4b).

3) Diabetická makulopatie,

kam patří fokální a difúzní makulární edém se projevuje patologicky zvýšenou permeabilitou kapilár a způsobuje vznik edému makuly a tvrdých exsudátů.

Léčba retinopatie zahrnuje terapii hyperglykémie a udržování glykémie bez větších výkyvů. Velkým pokrokem bylo objevení účinků laserové terapie jako je fotokoagulace argonovým nebo diodovým laserem. Podstatou je destrukce hypoxické tkáně, která způsobuje vznik neovaskularizací [1].



a)

b)

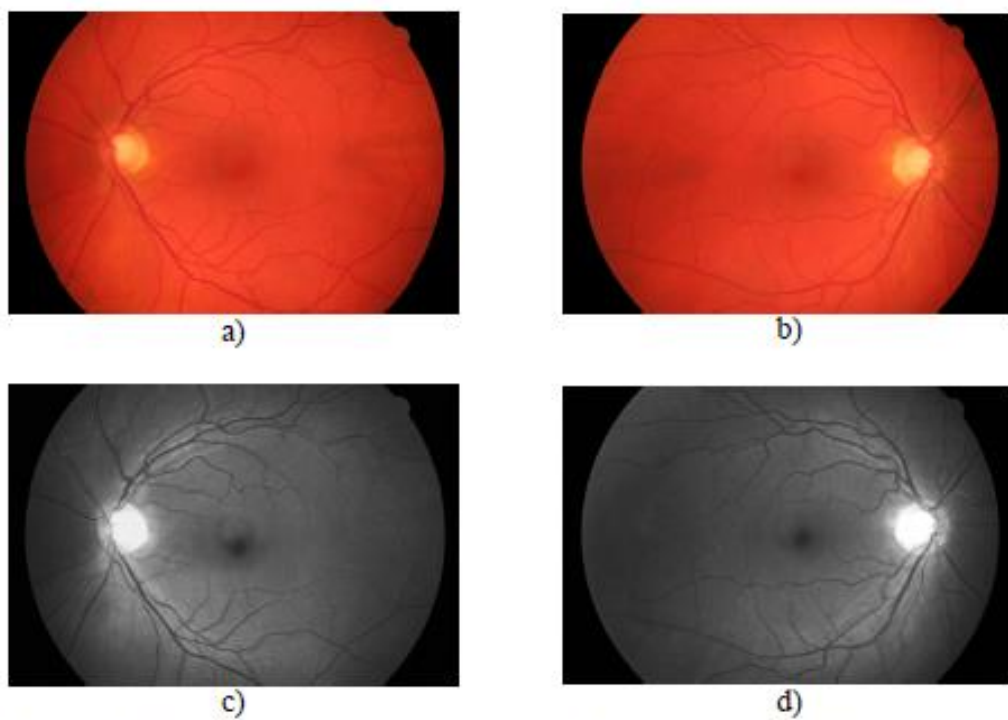
Obr. 2.4: a) snímek sítnice oka s NPDR, b) snímek sítnice oka s PDR (převzato z [57])

3 POPIS OBRAZOVÝCH DAT PRO ANALÝZU

3.1 Obecný popis snímku sítnice

Na obrázku 3.1 je pohled na zadní část sítnice (*retina*) pravého oka. Uprostřed obrazu sítnice lze vidět žlutou skvrnu (*fovea*) a v pravé polovině u pravého oka (Obr. 3.1 b,d) optický disk (u levého oka v levé polovině, Obr. 3.1 a,c), nebo-li terč zrakového nervu (*papilla*) [8]. Žlutá skvrna (*fovea*) je centrální část sítnice, která se podílí na ostrém vidění. Toto místo leží v centru větší oblasti, *maculy*. Onemocnění sítnice v této oblasti – *makulopatie* - je spojeno s vysokým rizikem ztráty zraku. *Macula* je tmavá, přibližně kruhová oblast, ale její kontrast je často docela malý, navíc může být zatemněna výpotky nebo zastřením [12]. Zrakový nerv je jedna z nejdůležitějších struktur v lidském zrakovém systému. Při diagnostice může sám působit jako rušivý element: je to velká, jasná oblast, která může být mylně označena jako kruhový výpotek. Cévy vstupují do sítnice skrz oční nerv a zásobují vrchní vrstvu sítnice krví. Zrakový nerv také přenáší obrazovou informaci ze sítnice k mozku. Optický disk se v obrazu zdravého oka obvykle jeví jako jasný, nažloutlý či bělavý kruhový tvar, který je částečně pokrytý cévami. Na základě rozdílného jasů nebo zastření se optický disk může lišit od obrazu k obrazu. Jakmile nervová vlákna dosáhnou ke zrakovému nervu, otočí se a vystoupí z něj opět ven a zanechají malý důlek ("pohár") v centru nervu. Tam je často nejjasnější centrální oblast. Okraj optického disku je posuzovaná jako tenká bílá čára ohraničující OD. V obrazech z fundus kamery se tato oblast může významně měnit. Nazální strana je obvykle méně jasná než spánková strana, a někdy není viditelná vůbec. OD může obsahovat jasné oblasti jen vně hrany, což může být způsobeno peripapilární atrofií (glaukomové změny nervového terče). Dále mohou vystupující cévy částečně zatemnit hranu, což je opět komplikace pro správné zaměření. Většina z nich vystupuje ven vertikálně na nazální straně, zbytek odchází na spánkové straně [12]. Viditelnost OD může být ovlivňovaná také nemocemi. Identifikace pozice a tvaru očního disku v obrazech sítnice je velmi důležitá pro diagnózu onemocnění oka jako zraková atrofie; zánět zrakového nervu; ischemická oční neuropatie; zelený oční zákal a zároveň i pro obecnější onemocnění lidského těla (cukrovka, arteriální hypertenze) [11]. Dále lze na obrázku vidět nervová vlákna, která jsou charakteristická světlým žháním, nejlépe pozorovatelným okolo optického disku (terče zrakového nervu), kde se sbíhají a v tomto místě opouštějí sítnici (Obr. 3.1 c,d). Největší

koncentrace nervových vláken je v oblasti žluté skvrny, na snímcích ale nejsou téměř vůbec pozorovatelné [8].



Obr. 3.1: Příklad snímků sítnice:

a) levé oko RGB; b) pravé oko RGB; c) levé oko – šedotónová verze; d) pravé oko – šedotónová verze (snímky z databáze viz kap. 3.2.)

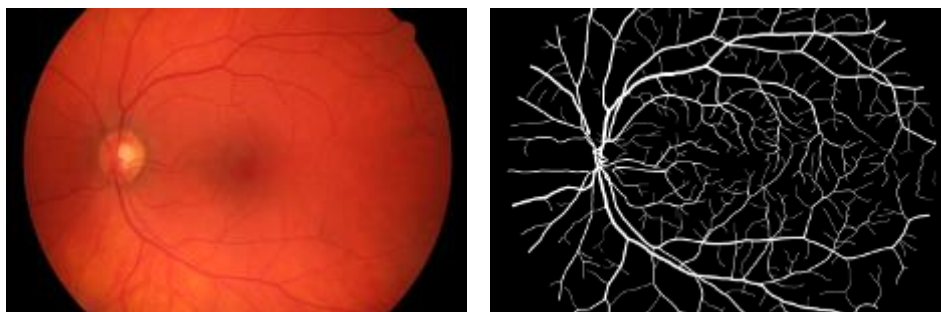
3.2 Databáze obrazových dat

Tato databáze byla vytvořena spoluprací dvou vědeckých institucí^{1,2} za účelem podpory srovnávací studie automatických segmentačních algoritmů pro obrazy sítnice. Soubor obrazů se skládá z 15 snímků pacientů oční kliniky. Obrazy byly pořízeny digitální fundus kamerou CANON CF-60 UVi s vestavěným digitálním fotoaparátem CANON EOS-20D s 60° zorným polem (FOV) a rozlišením 3504 x 2336 pixelů. Snímky vznikly na klinice MUDr. Tomáše Kuběny ve Zlíně. Všechny obrazy byly uloženy v JPEG formátu s nízkým kompresním poměrem. Bitová hloubka každého

¹ Brno University of technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Biomedical Engineering, Brno, Czech Republic

² Friedrich-Alexander University Erlangen-Nuremberg, Pattern Recognition Lab, Erlangen-Nuremberg, Germany

obrazu je 24 bitů na pixel (True Color) [24]. Na Obr. 3.2 vidíme příklad snímku sítnice z databáze zlatých standardů segmentace cév (databáze dostupná z [25]).



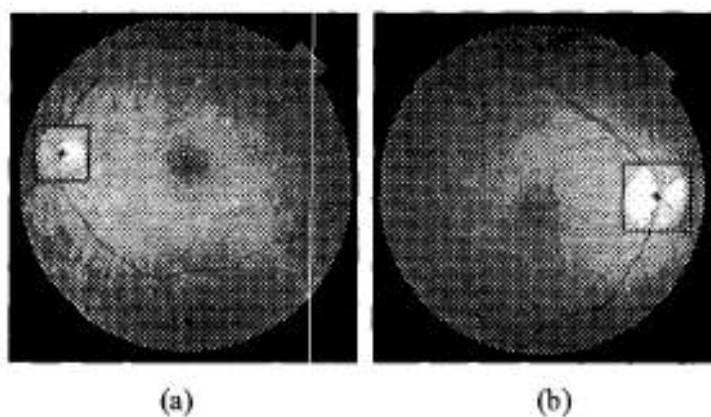
Obr. 3.2: Příklad snímku sítnice z databáze s vysegmentovanou cévní strukturou

4 REŠERŠE METOD LOKALIZACE OPTICKÉHO DISKU

Spolehlivá a účinná lokalizace optického disku je velmi důležitou součástí automatického vyšetření očního pozadí. Zpracování obrazových dat je časově náročný, vysoce specializovaný úkol, který je však náchylný k subjektivní chybě. Proto je zapotřebí vytvořit automatizovanou analýzu z digitalizovaných dat snímaných fundus kamerou [12]. V minulosti již bylo navrženo několik technik pro automatickou detekci OD na sítnici. Obecně mají tyto techniky tyto kroky – předzpracování obrazu, na které navazuje několik operací zpracování obrazu a nakonec samotná lokalizace OD. Tato kapitola se zabývá rešerší metod detekce OD.

4.1 Shlukování a PCA metoda

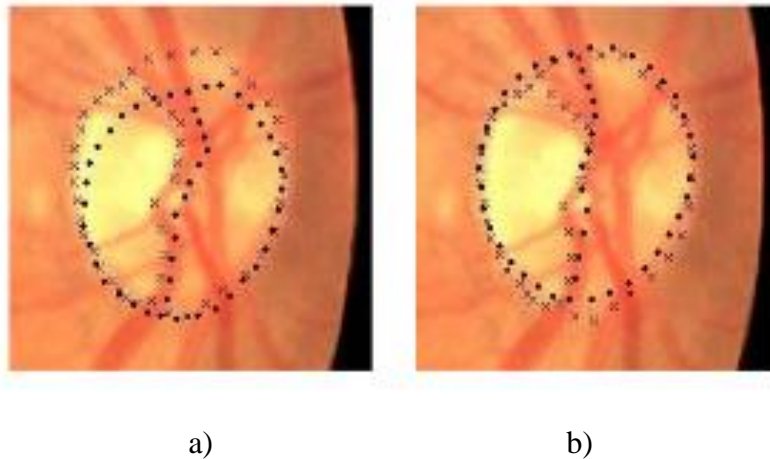
Intenzita OD je vyšší než intenzita okolní plochy sítnice. Jednou z běžných metod lokalizace je hledání největšího shluku pixelů s nejvyšší hodnotou jasu. Li a Chutatape v [19] navrhli metodu identifikace OD a to i v přítomnosti zvápenatělých kapének mukoproteinů a mukopolysacharidů, které mohou být dokonce jasnější než OD. Jejich metoda je založena na PCA (Principal component analysis – analýza hlavních komponent). Algoritmus vypočítá charakteristické vektory z cvičných obrazů, projektuje nový obraz sítnice do prostoru specifikovaného vlastními vektory a potom vypočítá vzdálenost mezi obrazem na sítnici a jeho projekcí. Centrum optického disku je umístěno v bodě s minimální vzdáleností. PCA je aplikována na každý pixel v obrazu, proto je počítání zdlouhavé [44]. Výsledné nalezení OD je znázorněno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Lokalizace OD na snímcích sítnice; a) levé oko; b) pravé oko (převzato z [19])

4.2 Analýza hlavních komponent a metody registrace objektů v obraze

Další postup automatické detekce hlavních objektů na snímku sítnice je také založen na lokalizaci pomocí analýzy hlavních komponent (PCA) a jeho tvar je detekován díky active shape modelu (ASM). Exsudáty (nahromaděné odpadní látky) jsou extrahovány pomocí kombinované segmentace narůstáním oblastí a pomocí detekce hran. Li a Chutatape [43] byli pomocí těchto metod úspěšní v 99%, 94% a 100% při lokalizaci optického disku, jeho hranic a lokalizaci fovey. Přítomnost cév uvnitř optického disku nebo okolo něj je také brána v úvahu. Nalezení hranic optického disku je znázorněno na Obr. 4.2.

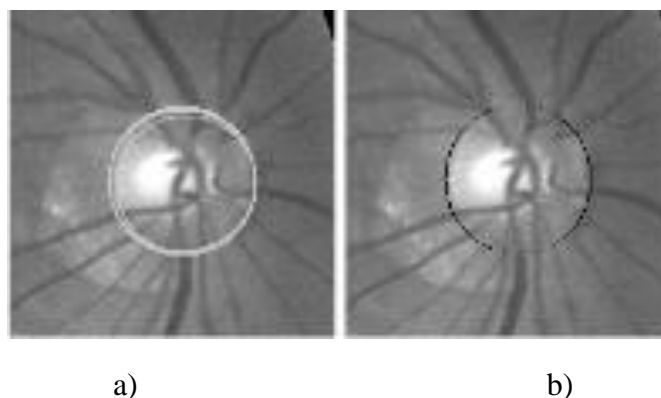


Obr. 4.2: Nalezení hranic OD pomocí a) ASM; b) modifikované ASM (převzato z [43])

4.3 Detekce obrysů objektů a vlnková transformace

Obrysy objektů jsou obvykle reprezentovány hranami v obraze a obrazovými prvky složenými z bodů, ve kterých se hodnota obrazové intenzity výrazně liší. To je rozhodující pro přesnou identifikaci žluté skvrny, umožňují úspěšné odhalení makulárních patologií, jako je diabetická makulopatie. Nicméně, variace intenzity v oblasti optického disku a rozdíly intenzity v blízkosti hranic optického disku představují hlavní problém v automatizované detekci OD. Přítomnost krevních cév a dalších patologických změn také znesnadňuje detekci. Použitý algoritmus je určen k detekci OD na základě vlnkové transformace. V práci Pallawala et al. [45] se používá Daubechiesových vlnek pro přiblížení polohy OD. Abstraktní reprezentace OD je získána pomocí šablony. Metoda vykazuje dobré výsledky v případě nehomogenní intenzity OD. Dodatečné vlnkové zpracování se provádí na složitějších případech ke

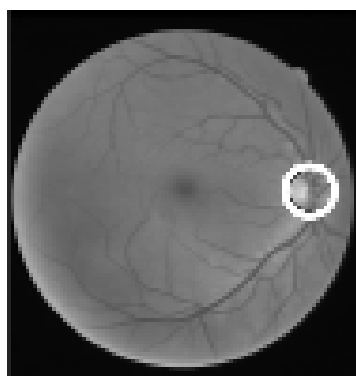
zlepšení míry detekce kontur. Výsledky této metody vidíme na Obr. 4.3.



Obr. 4.3: Lokalizace OD: a) Algoritmem vybrané vhodné hrany OD; b) hrana nejlépe odpovídající poloze OD (převzato z [45])

4.4 Sobelova metoda detekce hran a regrese metodou nejmenších čtverců

Optický disk může být vidět jako vybledlý, dobře definovatelný kruh nebo vertikálně mírně oválný disk. Detekce se provádí nejprve díky výběru kandidátských oblastí výskytu OD, následně se použije sobelova metoda detekce hran. Kandidátské oblasti jsou identifikovány a je použit shlukovací algoritmus podle Li a Chutatape [46] pro shromáždění sousedních pixelů do shluků. Těžiště největších shluků je definováno jako centrum kandidátské oblasti. Pro získání hran OD je použita sobelova detekce hran. Nejprve je však potřeba odstranit šum. Proto následuje regrese metodou částečných nejmenších čtverců pro získání předběžného odhadu tvaru OD. Další metoda podle Lupascu et al. [11] používá deskriptory textury a regresní metody pro zjištění nejvhodnějšího tvaru, který by mohl odpovídat OD. Úspěšná detekce OD je vidět na Obr. 4.4.



Obr. 4.4: Příklad detekovaného OD (převzato z [11])

4.5 Barevná morfologie

Osareh et al. v [21] rozvinuli metodu použití jednoduchého porovnávání s maskou k odhadu centra OD. Předpokládají, že tvar OD je přibližně kruhový a je složený z jasných pixelů. Normalizace barevného snímku se provádí za použití histogramu na jednotlivé barevné složky (R, G a B). Šablona je vytvořena zprůměrováním oblastí OD o velikosti 110×110 pixelů z (s předpokladem, že OD se nachází v centru této oblasti). Přibližný střed OD je nalezen v bodě maxima výstupu konvoluce obrazu LZK s maskou. Sinthanayothin et al. [14] lokalizovali optický disk pomocí identifikace oblasti s nejvyšší změnou intenzity vzhledem k sousedním pixelům. Po lokálním zesílení kontrastu byla maximální hodnota intenzity rozptylu obrazu vybrána jako střed OD. Na Obr. 4.5 vidíme úspěšnou detekci hlavních struktur na sítnici.



Obr. 4.5: Rozpoznání OD a makuly na fundus snímku(převzato z [14])

4.6 Hranová segmentace optického disku

Při hranové segmentaci se používají metody vycházející z detekce hran. V případě hledání polohy OD můžeme zmínit Houghovu transformaci a metodu aktivních kontur.

4.6.1 Houghova transformace

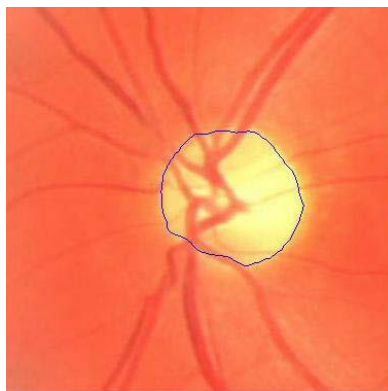
Houghova transformace je metoda pro nalezení objektů v obraze, vyhledávání hranic nebo určování orientace objektů. Její použití pro lokalizaci OD můžeme vidět např. v práci [17]. Dosahuje velmi dobré přesnosti, je třeba ale znát alespoň analytický popis tvaru hledaného objektu. Proto je tato metoda používána hlavně pro detekci

jednoduchých objektů v obraze jako kružnice, přímky, elipsy apod. Mezi výhody této metody patří dobrá odolnost vůči nepravidelnostem a porušením hledané křivky [26]. Pro detekci hran, pro pozdější zpracování obrázku, je použit Cannyho hranový detektor. Jedná se o algoritmus, zahrnující několik kroků, pro získání co nejlepšího výsledku při detekci hran v dvourozměrném diskrétním obraze [27]. Požadavky při detekci jsou: minimální počet chyb (musí být detekovány všechny hrany, nesmí být detekována místa, která hranami nejsou), přesnost (poloha hrany musí být určena co nejpřesněji) a jednoznačnost (odezva na jednu hranu musí být jedna, nesmí docházet ke zdvojení) [26].

4.6.2 Aktivní kontury

Aktivní kontura [28] je metoda postupného tvarování kontur až ke hraně. Křivka, definovaná uvnitř obrazu, mění své vlastnosti na základě interních sil (kontrolují hladkost průběhu – ohyb, zlom), definovaných samotnou křivkou, a externích sil, vypočítaných z obrazových dat. Interní a externí síly jsou definovány pro následné přizpůsobení kontury hranám hledaného objektu nebo dalším požadovaným vlastnostem objektu. Obvykle se používají parametrické aktivní kontury a geometrické aktivní kontury. Na téma aktivních kontur můžeme uvést práce [29], [30].

Na Obr. 4.6 je vidět křivka ohraničující OD, nalezená pomocí algoritmu aktivních kontur.



Obr. 4.6: Lokalizace OD pomocí aktivních kontur (převzato z [29])

4.7 Metoda založená na texturní analýze

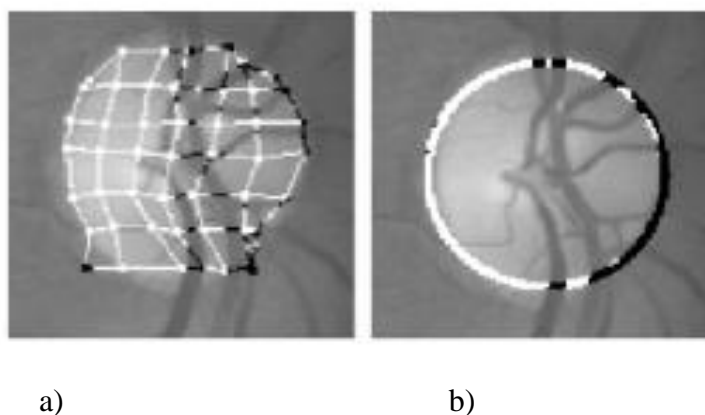
V práci Chu et al. [47] bylo pro testování diskutované metody náhodně vybráno 23 snímků jako trénovací soubor a dalších 23 pro testování. V tréninkovém kroku byly vybrány 3 bloky z každého obrazu a ty se použily jako trénovací množina. Regresní metodou byla získána váhová funkce a parametry, které byly poté použity k detekci

oblasti OD. Lokalizace OD bylo dosaženo iterační metodou prahování a následnou analýzou spojitých komponent [48].

4.8 Aktivní topologické sítě (TAN)

Lalonde et al. [20] lokalizoval optický disk použitím porovnávání maskou, založeném na Hausdorffově vzdálenosti s použitím pyramidové dekompozice. Metoda však není dostatečně citlivá ani dostatečně specifická pro klinické aplikace. Průměrná chyba byla 7%.

Chrastek et al. [49] zmiňuje automatickou metodu segmentace OD, která se skládá ze 4 kroků: nelineární filtrace, Cannyho hranový detektor, Houghova transformace a lokalizace optického disku. Pro redukci šumu byla použita nelineární filtrace jako metoda, která zároveň zachovala hrany. Vzhledem k tomu, že OD má kruhový charakter, autoři použili Houghovu transformaci pro detekci kruhu. Nový přístup k procesu segmentace OD navrhnul Novo et al. [42] pomocí aktivní topologické sítě (TAN). Jedná se o variabilní model pro segmentaci obrazu, který spojuje vlastnosti regionálně a hranově založených segmentačních technik a je schopen přizpůsobit hrany objektu a modelu jejich vnitřní topologii. Optimalizace aktivních sítí se provádí genetickým algoritmem. Metoda by měla být použitelná i bez předchozího předzpracování obrazu.



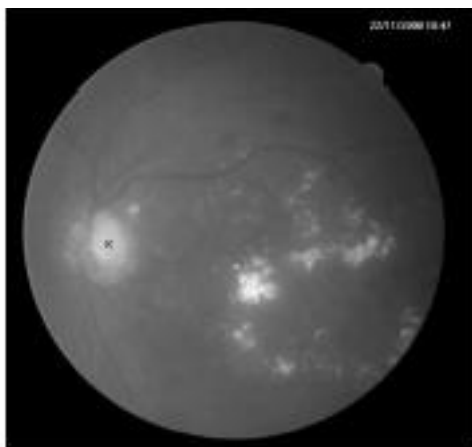
Obr. 4.7: Výsledky detekce OD; a) výsledná segmentace; b) lokalizace OD pomocí externích uzlů (převzato z [42])

4.9 Lokalizační algoritmus

Lokalizační algoritmus je jednoduchý, ale efektivní specializovaný korelační filtr [12]. Lokalizace OD je dosažena použitím specializovaného porovnávání pomocí

šablony a segmentace kontur modelu. Hlavní výhodou je jeho jednoduchost v kombinaci s velkou účinností. Není potřeba žádných úprav od uživatele: algoritmus automaticky vybere umístění centra OD, poté vhodnou hranu k jeho obrysu. Korelační vrchol nám dává přibližný střed optického disku. Použitý filtr se nazývá Laplacian of Gaussian a hledá hrany v obraze přechodem nulou po použití filtru laplacián.

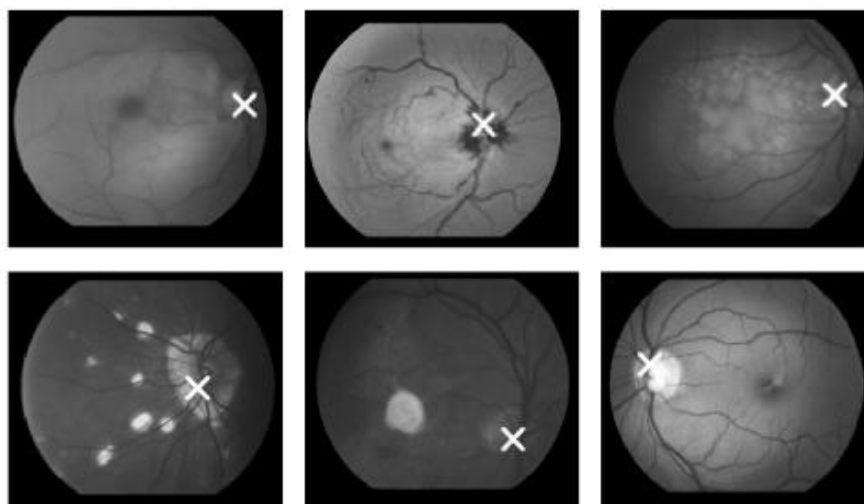
Velikost zřetěženého nervu se významně mění. To by mohlo být podnětem pro návrh filtru v různých stupních. Ve skutečnosti stačí jeden filtr, kde velikost rozdílu maximální korelace leží na prstenci kolem středu zřetěženého nervu; vrchol je proto pořádkem lokalizovaný uvnitř očního nervu, což stačí pro naše požadavky. Algoritmus obvykle nalézá střed uvnitř 15 pixelů, což je přijatelné jako východisko pro segmentaci hran. Obr. 4.8 ukazuje příklady výsledků. Tento jednoduchý přístup přináší vynikající výsledky a je robustní; jeho úspěch leží v pečlivém návrhu filtru [12].



Obr. 4.8: Výsledek lokalizačního algoritmu. Nalezení OD i při výrazných exsudátech (převzato z [12])

4.10 Fuzzy metody

Hoover and Goldbaum [18] užívají fuzzy konvergenci cév k určení centrálního výstupu cévní sítě. Metoda byla testována na 31 obrazech zdravé sítnice a 50 obrazech nemocných pacientů, které vykazovaly široké spektrum lézí a matoucí objekty. Tato metoda určuje OD jako centrální bod sítě krevních cév. K vyhledání polohy OD proto musí být nejprve extrahovány cévy a následně je použita fuzzy konvergence. Jejich metoda úspěšně detekovala OD v 89 % nemocných a ve 100 % zdravých případech. Výsledky metody vidíme na Obr. 4.9. Tímto způsobem je možné OD objevit dokonce v přítomnosti bodů daleko jasnějších než je OD samotný.



Obr. 4.9: Příklady správného určení polohy OD (převzato z [18])

4.11 Metoda využívající cévní strukturu

Jedna z metod založených na cévní struktuře je uvedena v práci [62]. Ze snímku fundu je extrahována cévní struktura a použitý matematický model popisuje očekávanou cévní orientaci pro každý bod snímku. Následně je využita suma směrových odchylek pro porovnání orientace nových cév s matematickým modelem, což vede k lokalizaci OD. Metoda využívá poznatku, že cévní struktura vychází ze zrakového nervu, cévy následují více či méně stejný divergentní směr. Dvě z hlavních cév se stáčejí směrem k makule, další cévy se větví do celé sítnice.

4.12 Detekce optického disku pomocí geometrického modelu cévního řečiště

Metoda detekce OD uvedená v práci [22] je založená na předběžném odhadu hlavního směru retinálních cév. Všechny retinální cévy vychází z OD a jejich směr je téměř shodný (parabolický) ve všech obrazech. Pro určení všeobecného směru cévního řečiště byl navrhnutý geometrický parametrický model [22], kde dva z parametrů modelu jsou souřadnicemi z centra OD. Nicméně, výsledná metoda není založena pouze na odhalení oblasti konvergence cév, ale spíše na nalezení vhodného modelu s ohledem na kompletní cévní strukturu. Výsledné zakreslení nalezených parabol je znázorněn na Obr. 4.10.



Obr. 4.10: Obrázek sítnice s cévním řečištěm a OD (převzato z [22]).

5 SEGMENTACE CÉVNÍHO ŘEČIŠTĚ POMOCÍ PŘIZPŮSOBENÉ FILTRACE

Pro naši práci jsme použili snímky sítnice z databáze, pro které máme směrové mapy cévního řečiště získané pomocí segmentace cév pomocí přizpůsobené filtrace.

Metoda pro segmentaci cévní struktury je založena na 2D filtrování a korelaci dané obrazové oblasti s 2D maskami (získanými průměrováním jasu profilu z cév) [23]. Každá ze základních masek rotuje ve dvanácti různých směrech; tedy 60 masek pro 5 různých šířek. Maximální odezva všech odpovědí filtru pro konkrétní plochu tak nese – pokud je céva přítomna – informaci o šířce a orientaci cévních segmentů. Parametrické mapy představující maximální odezvy filtrů jsou pak kombinovány a nakonec prahovány. Tím získáme binární cévní mapy, které nám pomohou odstranit artefakty způsobené hlukem, a také doplnit chybějící části cév. Výsledky z filtrování – parametrické obrazy – jsou pak kombinovány a poskytnou informaci o šířce a orientaci cév v každém bodě cévní struktury. Tato kombinace je poté prahována za účelem získání binární reprezentace cévního řečiště, které může být popř. doplněno o chybějící části [23].

Přizpůsobená 2D filtrace

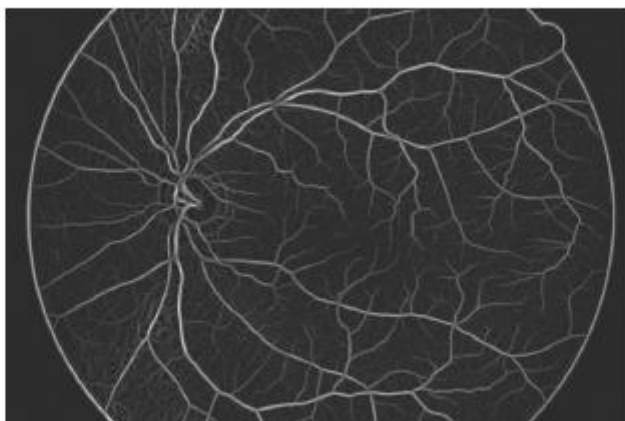
Přizpůsobený 2D filtr je založený na lokální korelaci mezi danými oblastmi, které mohou potenciálně obsahovat části cév, a filtrujícími maskami reprezentujícími typické části cév různých šířek a orientace. Masky jsou vytvořeny měřením kolmého jasu profilu cév (G vrstva RGB obrazů). Tvary jsou poté rozmazány (paralelní zpětná projekce) přes 2D masku. Cévní struktury jsou v obraze orientovány v různých směrech, také proto jsou základní masky rotovány do 12 různých směrů ($0^\circ - 165^\circ$, s krokem 15°). (Obr. 5.1). Přizpůsobený filtr poskytne parametrické obrazy, ve kterých rozsah odpovídá stupni korelace mezi jednotlivou maskou a lokální obrazovou oblastí. Maximální odezva signalizuje masku nejlépe popisující situace v lokální oblasti, to jest šíře a orientace cévního řečiště v dané oblasti. Pokud v dané oblasti nejsou žádné cévy, odezva je nízká [23].



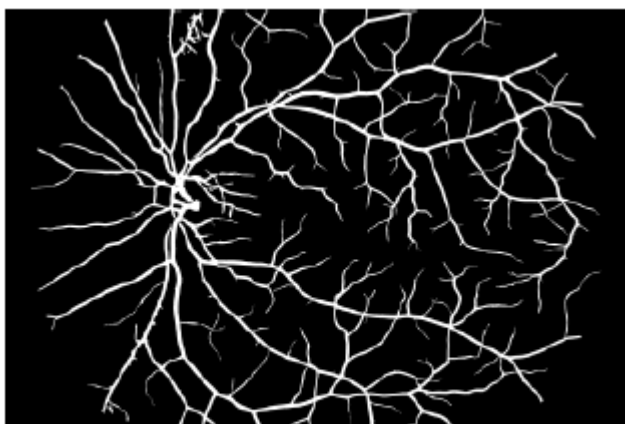
Obr. 5.1: Příklady masky rotující v rozmezí $0^\circ - 165^\circ$ s krokem 15° (převzato z [23]).

Spojení parametrických obrazů a následné zpracování

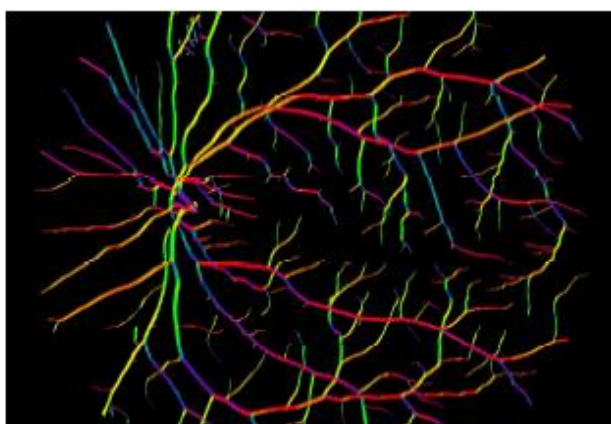
Parametrické obrazy získané filtrací jsou poté spojeny tak, že je vybrána maximální lokální odezva pro každý pixel. Výsledný obraz tak obsahuje informaci o existenci cévní sítě (Obr. 5.2.). Tento obraz může být ihned prahován, čímž získáme binární reprezentaci cévního řečiště. Krátké části cév (obvykle ty tenké) často chybí, je třeba je doplnit na základě těchto podmínek: kruhová oblast kolem konce cévní části je prohledána kvůli možnému pokračování v očekávaném směru. Příklad výsledné binární reprezentace je viditelný na Obr. 5.3. Binární obraz však neposkytuje informaci o šířce a orientaci částí cévního řečiště. Tato informace je vidět při použití spektrální stupnice barev (obr. 5.4): počínaje červenou pro vodorovný směr, přes oranžovou a žlutou k zelené pro vertikální směr a potom přes modrozelenou, modrou a fialovou zpět k červené



Obr. 5.2: Příklad parametrického obrazu obsahujícího maxima všech odpovědí filtru (převzato z [23]).

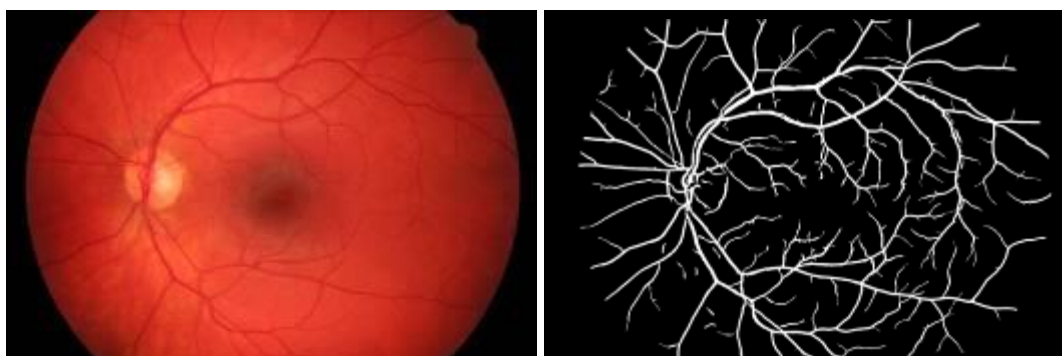


Obr. 5.3: Celkový výsledek cévní segmentace (převzato z [23]).



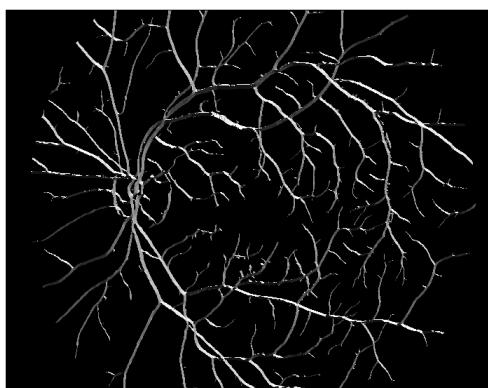
Obr. 5.4: Barevné označení pixelů na základě detekce orientace cév, spektrální škála 0° - 165° (fialová) (převzato z [23]).

Na následujících snímcích (Obr. 5.5) z databáze (kap. 3.2) vidíme ukázky zdravých snímků společně s vysegmentovanými cévami a směrovou mapou cévního řečiště.



a)

b)



c)

Obr. 5.5: Zdravý snímek z databáze a jeho zpracování: a) retinální snímek zdravého oka; b) cévní segmentace; c) směrová mapa cévního řečiště (převzato z [23]).

6 TEORETICKÉ POZADÍ APLIKACE PRO LOKALIZACI OD

Následující část práce je věnována návrhu automatického detektoru polohy optického disku. Nejprve je potřeba zmínit teoretické pozadí, na kterém je myšlenka detekce OD založena.

6.1 Základní morfologické operace pro zpracování obrazu

V práci je použito několik morfologických operací. V následující kapitole je uvedeno jejich teoretické pozadí. Primární morfologické operace zpracovávají binární obrazy a obecně mění celkovou velikost a tvar oblastí v obraze. Používají se pro např. pro vyhlazení, rozšíření či omezení a hledání vnitřní či vnější hranice objektů. Tyto operace připravují snímky pro další zpracování. V Matlabu jsou morfologické operace prováděny funkcí `bwmorph` se dvěma parametry: proměnná binárního obrazu a použitý typ operace. Volitelným parametrem je konstanta, kolikrát bude operace aplikována [64], [66].

6.1.1 Eroze

Eroze binárního obrazu vhodnou maskou je definována jako průnik množiny obrazu A s množinou všech posunů masky B . Pokud má jak obraz pod centrálním pixelem tak všechny hodnoty obrazu, které leží pod elementy masky hodnotu 1, pak zůstane výsledná hodnota pod centrálním pixelem na hodnotě 1, v každém jiném případě bude přepočítávaný pixel nastaven na hodnotu 0. Eroze provádí nevratné změny v obraze: zmenšuje objekty, odstraňuje pruhy podél hranic objektů, vyhlazuje hrany, odstraňuje izolované malé objekty, rozděluje nežádoucí propojení [64].

6.1.2 Dilatace

Dilatace binárního obrazu vhodnou maskou je sjednocení množiny obrazu A s množinou všech posunů masky B . Tato funkce má opačný účinek než eroze, jelikož je ekvivalentní k narušení pozadí. Jedná se o funkci sjednocení. Pokud je prvek hodnoty 1 z obrazu překrývající se s maskou, alespoň v jednom bodě hodnoty také 1, pak je centrální element masky nastaven na hodnotu 1. Dilatace provádí nevratné změny v obraze: zvětšuje objekty, přidává pruhy podél hranic objektů, vyhlazuje hrany (vyplňuje zálivy), vyplňuje malé otvory v objektech, propojuje objekty [64].

6.1.3 Otevření a uzavření

Operace jsou definovány pomocí dilatace a eroze. Obě operace fungují jako filtry - vyhlazují objekty. Zásadní vliv na filtraci obrazu má první použitá operace, druhá operace vliv filtrace nekompensuje. Funkce otevření je eroze následovaná dilatací, tento proces odstraní malé objekty a vyhladí hranice objektů. Tato operace nemění nijak významně plochu a tvar objektů. Funkce uzavření je dilatace následovaná erozí. Tento proces vyplní drobné otvory a vyhlazuje hranice. Operace opět významně nemění plochu ani tvar objektů [64].

6.1.4 Skeletonizace

Skeletonizace je dekompozice uzavřené oblasti (2D entit) na posloupnost křivek (1D entit). Jedná se o proces, při kterém dochází k redukci informace a celkovému zjednodušení objektu, při zachování jeho tvarové charakteristiky [6]. Výsledkem procesu skeletonizace je topologická kostra tzv. skeleton. Pomocí opakovaní úpravy okrajových pixelů na nulovou hodnotu je vytvořena kostra objektu. Skeletonizace zabráňuje tomu, aby byly přerušeny linie objektu [65], [66].

6.2 Evoluční algoritmy

Velký rozvoj technik evolučních algoritmů, což jsou optimalizační metody založené na Darwinovské myšlence evoluce, můžeme sledovat od 60. let dvacátého století. Pod pojem evoluční algoritmy můžeme zařadit genetické algoritmy, evoluční strategie, evoluční programování a genetické programování. Velkým průkopníkem genetických algoritmů byl John Holland [67].

6.2.1 Genetické algoritmy (GA)

Genetické algoritmy jsou v podstatě založeny na biologických principech a snaží se využívat toho, jakým způsobem řeší různé úlohy sama příroda. Cílem GA je tyto procesy napodobit.

Nejprve je potřeba zmínit několik základních pojmů, jejichž znalost je potřebná pro ujasnění biologických procesů a následně pro výpočetní řešení.

Gen

- specificky vymezený úsek DNA, která nese dědičnou informaci
- geny určují znaky jedince

Alela

- je konkrétní podoba genu

Chromozom

- je tvořen lineárně uspořádanými geny, nachází se v buněčném jádře
- každý organismus má unikátní, neměnný počet chromozomů, jejich tvar a velikost [68]

Genotyp

- soubor všech genů živého organismu [68]
- v oblasti genetických algoritmů se zjednodušuje definice a to tak, že genotyp obsahuje pouze jeden chromozom, který naprosto dostatečně charakterizuje daného jedince [67]

Fenotyp

- genotyp + prostředí
- množina všech vnějších vlastností daného jedince [67]

Genofond

- množina všech genů celé populace konkrétního druhu organismu [67]

Fitness/Ohodnocující funkce

- měřítko, které udává jaký chromozom (jedinec, genotyp) je z určitého hlediska preferovanější
- obvykle vyjadřuje určitou požadovanou vlastnost či porovnání s ideálem (výsledkem výpočtu) [67]

Křížení

- základní technika pro vznik nových jedinců, obecně vznik celé nové populace
- probíhá na základě výměny genů (dědičné informace) [68]

Mutace

- změna v DNA
- je to změna nekódovaná, neprogramovaná a náhodná
- trvalé pro další život buňky [68]

Hledání optimálního řešení probíhá formou soutěže v rámci populace postupně se vyvíjejících řešení. Pro posouzení toho, kteří členové populace mají největší šanci podílet se na dalším vývoji hledání řešení, musí být schopnost jedinců kvantifikovatelná. Mluvíme poté o ohodnocení, míře kvality, vhodnosti či síle jedince (v literatuře se vesměs užívá pojem fitness). Jedinci s lepším ohodnocením (vyšší hodnotou fitness) mají větší šanci podílet se na vytváření další generace. Následným použitím technik křížení a reprodukce a vícečetným opakováním tohoto evolučního cyklu vznikne populace s jedinci s vysokým ohodnocením, kteří mohou představovat dostatečné či optimální řešení problému. Tento proces však také zahrnuje značný podíl náhodnosti a může se stát, že nejlepší jedinec bude prezentovat pouze lokální optimum, které může být od globálního optima odlišné. Vzhledem ke zmíněné náhodnosti procesu můžeme genetické algoritmy označit jako stochastickou

optimalizační metodu. Stochastické znamená, že v daném algoritmu hraje určitou roli náhoda. Slovo optimalizační znamená, že na konci takového algoritmu nemusí být jeden řekněme ideální výsledek, ale může se jednat o řadu různých výsledků, které dostatečně splňují zadání úlohy. Proto se následně používají statistické metody, které zahrnou nejlepší, nejhorší a průměrné hodnoty sledovaných ukazatelů [67].

Většina genetických algoritmů probíhá v následujících krocích:

1) Vytvoření populace

Vytvoření všech původních jedinců probíhá obvykle pomocí náhodného přiřazení čísel (které představují alely genů) do chromozomu (řetězec určité délky s neměnným počtem pozic). Každý jedinec z populace pak představuje jedno řešení dané úlohy.

2) Ohodnocení jedinců - funkce Fitness

Pojem fitness můžeme chápat jako úspěšnost či vhodnost. Vyjadřuje míru schopnosti jedince přizpůsobit se prostředí a tím možnost předat svou genetickou informaci potomkům. Zavedení funkce fitness je potřeba pro zhodnocení jedince v závislosti na předpokládaném řešení. Ohodnocení jedinců neboli fitness se provádí porovnáváním jejich chromozomů s určitým ideálním chromozomem – vzorem, který představuje uspokojivé řešení.

3) Reprodukce, vznik potomků

Dojde ke vzniku potomků, které probíhá rozmnožováním jedinců.

Nejprve se musí vybrat konkrétní dva jedinci do páru. Poměrně rozšířenou formou implementace přirozeného výběru je použití tzv. ruletového mechanismu selekce. Na rozdíl od klasické rulety nejsou u tohoto mechanismu obsahy výsečí čísel stejné (tudíž pravděpodobnost výběru také), ale odpovídají hodnotě fitness, tedy konkrétních ohodnocujících funkcí. Darwinovská evoluce obsahuje dva procesy, křížení a mutace. Ty se musí při vzniku nového jedince realizovat. Nejjednodušší verzí křížení je jednobodové křížení, kdy se vybere jeden konkrétní gen (jedno konkrétní číslo v řetězci) a od tohoto genu si rodiče vymění geny; tedy vzájemně se prohodí všechna čísla v řetězci od daného konkrétního čísla včetně. Křížením dvou jedinců tedy vzniknou dva potomci, každý z nich má určité geny společné s rodiči. Mutace se provádí tím, že se hodnoty náhodně vybraných genů chromozomu změní. Tím dochází k vytváření určité genové pestrosti populace ale nedochází ke zmenšení genofondu.

4) Ohodnocení potomků

Probíhá obdobně jako u kroku 2.

5) Vznik nové populace

Poté se musí vybrat nová populace jedinců, protože nyní je populace příliš velká (rodiče + potomci), tudíž může existovat konkurenční boj. Nejjednodušší možnost je nechat původní populaci vymřít a pracovat dále už jen s populací potomků.

6) Splnění či nesplnění zadané úlohy

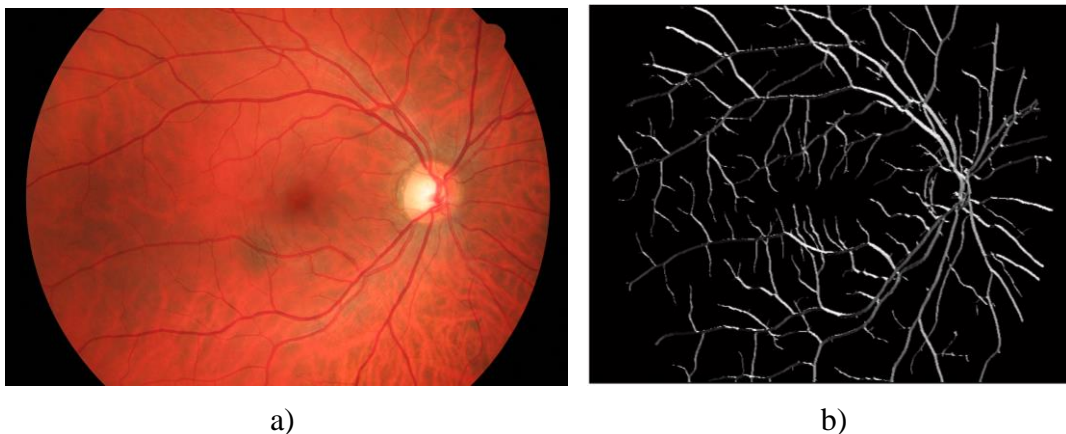
Pokud se cyklem algoritmu dosáhne vytvoření potomka nebo třídy potomků, které vyhovují danému vzoru řešení, pak se genetický algoritmus ukončí. V opačném případě algoritmus dále pokračuje ve své práci v krocích 3-6. Může se stát, že by algoritmus mohl vytvářet potomky do nekonečna. V tom případě se ukončení algoritmu může zajistit určitým počtem jeho iterací [67].

7 NÁVRH APLIKACE AUTOMATICKÉHO DETEKTORU OPTICKÉHO DISKU

V následující kapitole je popsán vlastní návrh aplikace pro detekci optického disku. K návrhu detektoru bylo využito programové prostředí MATLAB R2009. K otestování byly použity snímky popsané v kapitole 3.2. Metoda je založena na několika předpokladech. Podle článku [22] můžeme očekávat, že cévy na snímku sítnice mají přibližně parabolický tvar a vrchol paraboly by mohl značit polohu oblastí optického disku. Optický disk se v optimálním případě nachází na všech snímcích vertikálně i horizontálně přibližně na stejném místě. Rozlišujeme však rozdílné umístění na snímku u pravého a levého oka.

7.1 Předzpracování dat

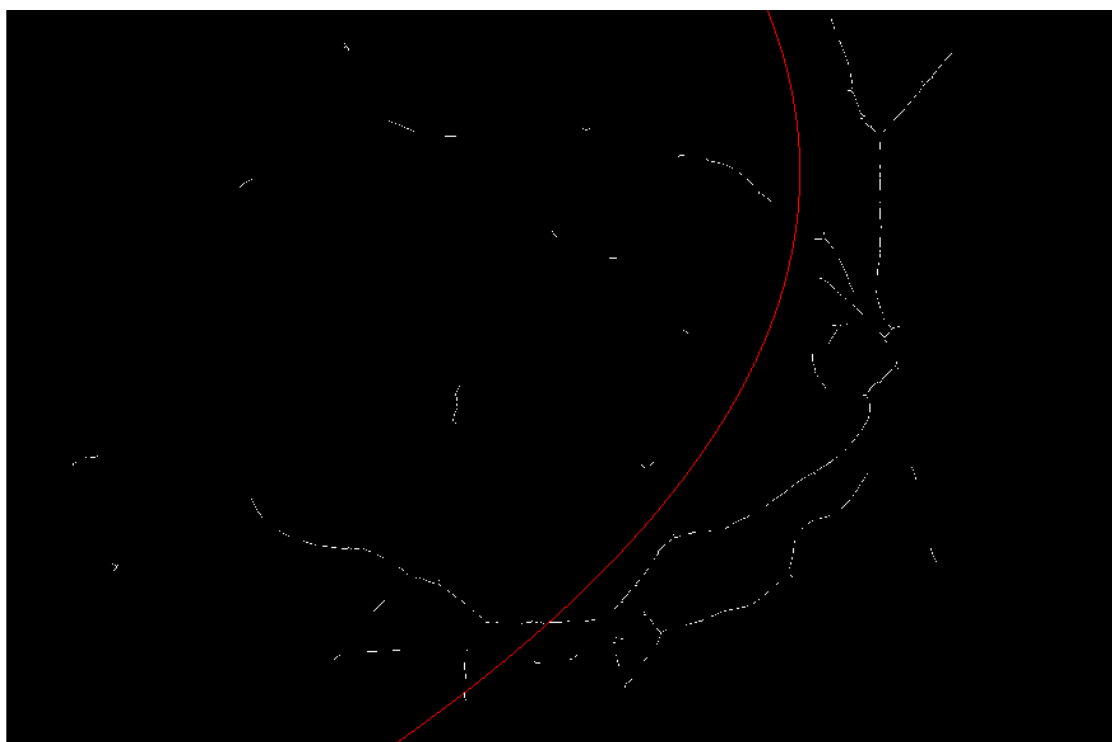
K získání informace o cévních směrech byly na upravený obraz sítnice aplikovány filtrační masky. Filtrace byla provedena pro dvanáct různých směrů. Porovnáním maximálních odezví jednotlivých filtrů byla vytvořena směrová mapa cévního řečiště [23]. Příklad originálního snímku spolu s výsledkem segmentace podle teorie popsané v kapitole 5 můžeme vidět na Obr. 7.1 a), b).



Obr. 7.1: Originální snímek a směrová mapa: a) originální snímek_0246.jpg; b) směrová mapa cévní struktury pro snímek_0246.jpg

Směrová mapa představuje velice přesný popis cévní struktury a byla tedy využita pro další analýzu obrazu. Jak již bylo napsáno v úvodu, cévní řečiště opisuje tvar paraboly. Algoritmus pro nalezení optického disku tedy prokládá obraz krevního řečiště

parabolou. Obyčejné proložení pomocí např. pomocí metody nejmenších čtverců aplikované na významné body (určené např. na základě tloušťky cév) nám neurčí parabolu tak, jak bychom potřebovali (viz Obr. 7.2). Pro nalezení paraboly, která prokládá cévní řečiště s přesnějším výsledkem je proto použit princip genetického algoritmu (viz Kapitola 6.2.1). Způsob výběru podmnožiny cévního řečiště, která se parabolou prokládá (v genetické terminologii genofond), je popsán níže v práci.



Obr. 7.2: Nevhodně proložená parabola na snímku cévní struktury

7.2 Předzpracování obrazu – morfologické operace

Pro předzpracování obrazu bylo využito funkcí Matlabu pro zpracování obrazu. Zejména bylo využito morfologických operací obecně zmíněných již v kapitole 6.1. Pro vyhlazení okrajů cév byla použita funkce uzavření. Uzavření je dilatace následovaná erozí stejného rozsahu. Velikost objektů tím není podstatně změněna. Operace vyhladí obrysy a zaplní malé díry a zářezy. Rovněž může spojit těsně sousedící objekty. Při binární dilataci sčítáme množinu X s množinou X' , která je od množiny X posunuta o strukturální element B (druhá, většinou menší množina) [69]:

$$X \oplus B = \{p \in E^2 : P = X + B, X \in x \wedge b \in B\} \quad (1)$$

To můžeme také vyjádřit Minkowského součtem (sjednocení posunutých množin) [69]:

$$X \oplus B = \bigcup_{b \in B} X_b \quad (2)$$

Binární eroze je duální morfologická transformace k dilataci. Principem je skládání dvou množin pomocí Minkowského rozdílu. Binární eroze se používá ke zjednodušení objektu. Objekty menší než strukturální element z obrazu zmizí. Erozi můžeme vyjádřit také jako průnik všech posunů obrazu X o vektory $-b \in B$ [69]:

$$X \ominus B = \bigcap_{b \in B} X_{-b} \quad (3)$$

Binární uzavření je dilatace následovaná erozí. Tímto krokem můžeme v obrazu odstranit malé mezery. Uzavření můžeme tedy definovat takto [69]:

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B \quad (4)$$

Myšlenkou vytvoření skeletonu je jeho definice pomocí tzv. maximálních kruhů. Maximální kruh je takový, který je vepsaný do objektu a dotýká se jeho hran ve dvou či více bodech. Kostra je poté tvořena sjednocením středu kruhů. Tento postup je ale výpočetně náročný a proto je možné využívat např. metodu ztenčování. Sekvenční ztenčování je metoda skeletonizace využívaná při zpracování obrazu pro rozpoznání. Skeleton se ve výsledku skládá pouze z čar tloušťky 1 a izolovaných bodů. Operace ztenčování je formálně definována jako [69]:

$$X \oplus B = X \setminus (X \otimes B) \quad (5)$$

Kde X je obraz a B strukturální element

Obvykle se ztenčování používá opakovaně. Sekvenční ztenčování pak můžeme vyjádřit jako posloupnost několika strukturálních elementů [69]:

$$X \oplus \{B_{(i)}\} = (((X \oplus B_{(1)}) \oplus B_{(2)}) \dots \oplus B_{(n)}) \quad (6)$$

7.3 Způsob hledání paraboly

Jsou stanovena kritéria, která omezují, jakých parametrů může hledaná parabola nabývat. To významně zmenšuje celý prostor parametrů, které je nutné prohledat pro nalezení řešení. Zároveň jsou stanoveny hodnotící funkce, na základě kterých jsou jednotlivá řešení (paraboly) mezi sebou porovnávány.

Byla stanovena tato kritéria:

- Osa paraboly je vodorovná – parabola není natočená. Lze ji tedy popsat rovnicí(7)

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (7)$$

- Otevření paraboly (velikost parametru a) je omezená podle $|a| < 0,002$ (8)

- Vrchol paraboly $V(x,y)$ leží v prostoru vymezeném šířkou a výškou obrazu takto:

$$V_y \in (0, sirka), V_x \in \left(\frac{1}{3} vyska, \frac{2}{3} vyska\right) \quad (9)$$

Byly definovány tyto hodnotící funkce:

A) Hodnotící funkce vzdálenosti od cévy:

$$S_{vzd} = \frac{\sum_{(x,y)} D(x, y)}{total} \quad (10)$$

kde $D(x, y)$ vrací nejkratší vzdálenost bodu (x,y) ležícího na parabole k bodu v obraze. $total$ je celkový počet bodů, které tvoří parabolu v obraze. Kritérium S tedy udává průměrnou vzdálenost bodu paraboly k bodům v obraze (genofond). Čím je hodnota menší, tím lepší je proložení parabolou.

V programu je pro určení kritéria využito funkcí Matlabu pro zpracování obrazu. Speciálně je použito morfologických operací a to následujícím způsobem:

Čítatel je získán postupem:

1. Parabola, kterou chceme ohodnotit, je vykreslena jako binární obraz.
 2. Je vytvořena distanční mapa obrazu (genofondu).
 3. Je provedeno pronásobení distanční mapy a obrazu paraboly prvek po prvku.
 4. Hodnoty všech bodů pronásobeného obrazu jsou sečteny.
- Jmenovatel je určen jako součet binárního obrazu paraboly.

B) Funkce hodnotící průchody nejsilnějšími cévami:

$$S_{vzd} = \frac{\sum_{(x,y)} T(x, y)}{total}, \quad (11)$$

kde $T(x, y)$ pro bod (x,y) ležící na parabole vrací 1, pokud neprotíná cévu. Pokud cévu protíná, vrací obrácenou hodnotu její tloušťky. Funkce tedy nabývá

hodnot $(0,1>$, kdy hodnota 1 říká, že parabola neprotíná cévy a pro hodnoty menší jak 1 říká, že parabola cévy protíná a to tak, že čím je menší, tím protíná větší část cév nebo cévy silnější. Pro lepší odezvu kritéria byl obraz tloušťek dilatován.

Čítatel je získán postupem:

Opět je využito funkcí pro zpracování obrazu ke spočítání kritéria.

1. Parabola, kterou chceme ohodnotit, je vykreslena jako binární obraz.
2. Je vytvořena kostra cév s popisem jejich tloušťek (popsáno níže při vytváření genofondu).
3. Popis tloušťek je dilatován pro silnější odezvu.
4. Je spočítán obraz obrácených hodnot (hodnotící mapa).
5. Je provedeno pronásobení obrazu s obrácenými hodnotami a obrazu paraboly prvek po prvku.
6. Hodnoty všech bodů pronásobeného obrazu jsou sečteny.

Ukázka programu realizující kritérium podle síly cév:

```
% Vytvoreni tloustkove hodnotici mapy
% pouziti: pronasobit s hodnocenym vzorem - cim mensi, tim lepsi;
%         rozsah <1,0) .. nejhorsí 1, nejlepsi ->0.
%         faktor f: >1 zesiluje , <1 zeslabuje rozdily

I = BWtloustka;

% vytvoreni silnejsi reprezentace tloustek cev - pro silnejsi odezvu
a = imdilate(I, strel('disk', 4, 4));
a = imdilate(a, strel('disk', 8, 8));

% nahrazeni 0 na 1 - pro odstraneni singularit
A = a;
A(A==0) = 1;

ma = max(max(a));

% (1 / A) ^ f
fitMapTloustka = (ones(size(a))./A).^f_fitMapTloustka;
```

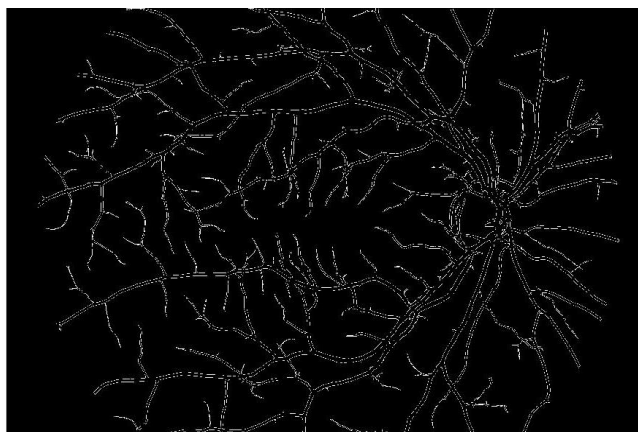
7.4 Zpracování směrových map – vytvoření genofondu

Směrové mapy poskytují podrobný popis cév. Pro účely nalezení paraboly je však vhodné vybrat pouze významné cévy. Jako významné lze označit ty cévy, které mají větší průměr. Proto je nutné určit tloušťky jednotlivých cév. Pak je možné pomocí vhodného prahu vybrat pouze cévy, které se na prokládání parabolou hodí nejlépe. Navíc je pro zjednodušení vhodné brát v úvahu pouze méně složitý model řečiště, například jeho kostru.

Pro zjištění síly cév je opět s výhodou využito morfologických operací. Pro urychlení výpočtu je vhodné původní snímky podvzorkovat. Myšlenka, jak určit sílu cév je následující:

1. Extrahujeme kontury cév.
2. Vytvoříme distanční mapu cévních kontur. Výsledný obraz bude mít ve středu kontur hodnotu poloměru cévy v daném místě.
3. Vytvoříme kostru (skeleton) cévního řečiště. Pro vytvoření jednoduššího skeletonu je vhodné výchozí obraz vyhladit – upravit tak, aby neobsahoval malé zářezy ve směru dovnitř cév. To lze zajistit pomocí operace uzavření.
4. Pronásobením skeletonu a distanční mapy prvek po prvku vznikne obraz s ohodnocenou kostrou podle poloměru cév. Pro průměr se obraz ještě vynásobí dvěma.
5. Pro získání významných cév je skeleton s hodnotami tlouštěk cév prahován vhodným prahem. Tím vznikne obraz s množinou bodů, které se budou dále prokládat parabolou – tzv. genofond.

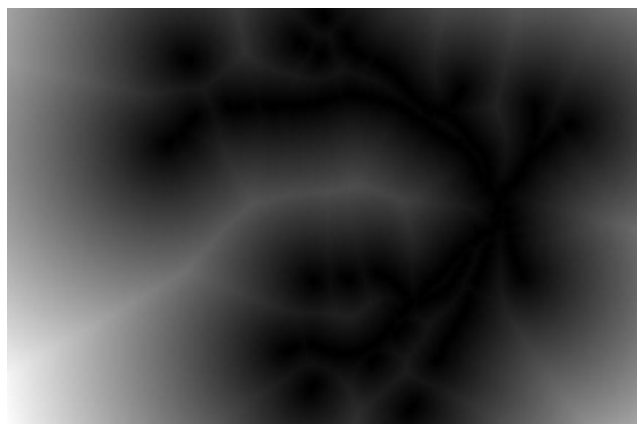
Kontury jednotlivých cév lze nalézt pomocí funkce 'remove'. Funkce 'remove' odstraňuje vnitřní pixely. Tato volba nastaví pixel na hodnotu 0, pokud jeho 4 okolní sousedé mají hodnotu 1, čímž ponechává pouze okrajové body objektu. Výsledek nalezení kontur cév a příklad distanční mapy je znázorněn na Obr. 7.3 a), b), c).



a)



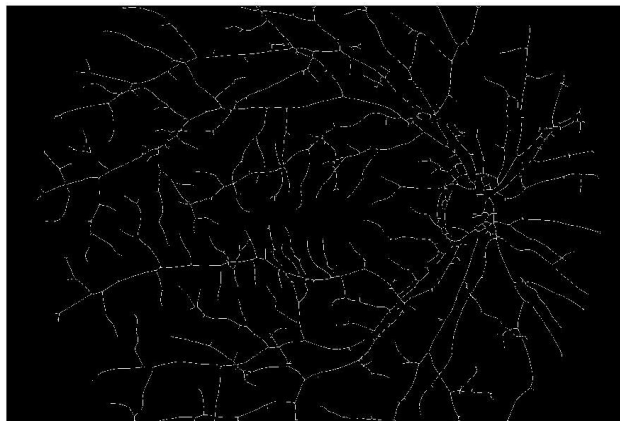
b)



c)

Obr. 7.3. Kontury cév a jejich distanční mapa (snímek_0246.jpg): a) kontury celého snímku; b) přiblížení části snímku s konturami cév; c) distanční mapa.

Dalším krokem bylo vytvoření skeletonu cév. Kostra musí mít šířku jeden pixel, musí vést středem objektu (cévy) a musí zachovat její tvar. Výsledky skeletonizace vidíme na Obr. 7.4 a), b).



a)



b)

Obr. 7.4: Skeletonizace: a) skelet celého snímku; b) přiblížení skeletu snímku

Část programu vytvářející popis tloušťky cév je ukázán níže:

```

%% Urceni tloustek cev (za pouziti morfologickych operaci)

% podvzorkovani
BW = smery_pom(1:n_sampling:end, 1:n_sampling:end);

% uzavreni pro hladsi skeleton
BWclosed = bwmorph(BW, 'close');

% vypocet skeletonu
BWskel = bwmorph(BWclosed, 'skel', Inf);

% odstraneni vnitrnich bodu - nalezeni okraju
BWcont = bwmorph(BW, 'remove');

% vypocet distancni mapy kontury
BWdist = bwdist(BWcont);

% vymaskovani distancni mapy kontury skeletonem
% vynasobeno dvema pro ziskani prumeru
BWtloustka = BWdist.*BWskel*2;

```

7.5 Vytvoření jedince a hledání řešení

Jedinec je vytvářen náhodným výběrem genů z genofondu. Genofond, jak již bylo výše popsáno, tvoří množina bodů, reprezentující významné části cévního řečiště. Jako geny lze brát např. samostatné body z této množiny. Protože jsou ale body uspořádány podle tvaru cév, je vhodnější brát v úvahu celé úseky (větve skeletu). Genofond je tedy rozdělen na samostatné větve. Geny jsou pak jednotlivé větve. Pro jednodušší popis jsou odstraněny větve o malé délce (ploše).

Ukázka programu, který rozdělí skeleton na větve:

```
%% Segmentace skeletu na zaklade tloustky a delky

I = BWtloustka;

% prahovani dle tloustky
I2 = (I>tlThreshold);

% ziskani uzlovych bodu
uzly = bwmorph(I2, 'branchpoints');

% odstraneni uzlovych bodu a ziskani vetvi
tmp = (I2 + imdilate(uzly, strel('disk', 0, 0)) );
branches0 = (tmp == 1);

% odstraneni vetvi kratsich nez tlAreaThreshold
branches = bwareaopen(branches0, tlAreaThreshold);

genofond = branches;
```

Samotný jedinec je pak vytvářen následovně:

1. Vyberou se náhodně 3 různé větve z genofondu
2. Body všech tří větví se proloží parabolou pomocí metody nejmenších čtverců
3. Nalezená parabola (jedinec) se ohodnotí jednou z výše popsaných funkcí.

Metoda nejmenších čtverců při prokládání dat parabolou je definována následovně:

Parabola, neboli polynom druhého řádu je definována

$$P_2(x) = ax^2 + bx + c \quad (12)$$

Optimální parametry a, b, c získáme řešením soustavy rovnic

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2, x_1, 1 \\ x_2^2, x_2, 1 \\ \vdots \\ x_n^2, x_n, 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (13)$$

ze které již formálně (za předpokladu regularity matice soustavy) můžeme vypočítat koeficienty a, b, c [70].

Ukázka programu pro nalezení paraboly:

```
%% Nalezeni paraboly
Im = jedinec;

index = find(Im>0);
[vyska, sirka] = size(Im);
x = mod(index, vyska);
y = floor(index/vyska);
coeffs = [ones(size(x)), x, x.*x];
```

```

knowns = y;

v = coeffs \ knowns;          % v is [a; b; c]
a = v(3);
b = v(2);
c = v(1);

% Nasleduje vykresleni paraboly

```

Pro nalezení celkového řešení je vygenerována pouze jedna generace o velikosti 200 jedinců. Z této generace je vybrán nejlepší jedinec podle zvolené hodnotící funkce, který odpovídá určeným kritériím.

Souřadnice vrcholu paraboly pak určují polohu OD.

$$X = \left(\frac{-b}{2a} \right) \quad (14)$$

$$Y = aX^2 + bX + c \quad (15)$$

Část program kontrolující kritéria paraboly a počítající hodnotící funkce:

```

%% Ohodnoceni paraboly

% Aplikace kriterii
preskoc = 0;
if(abs(a) < 2e-3)
    preskoc = 1;
end
% urceni vrcholu paraboly
X = -b/(2*a);
Y = a*X^2+b*X+c;
if(X<vyska2*Q | X>vyska2*(1-Q) | Y<0 | Y>sirka2)
    preskoc = 1;
end

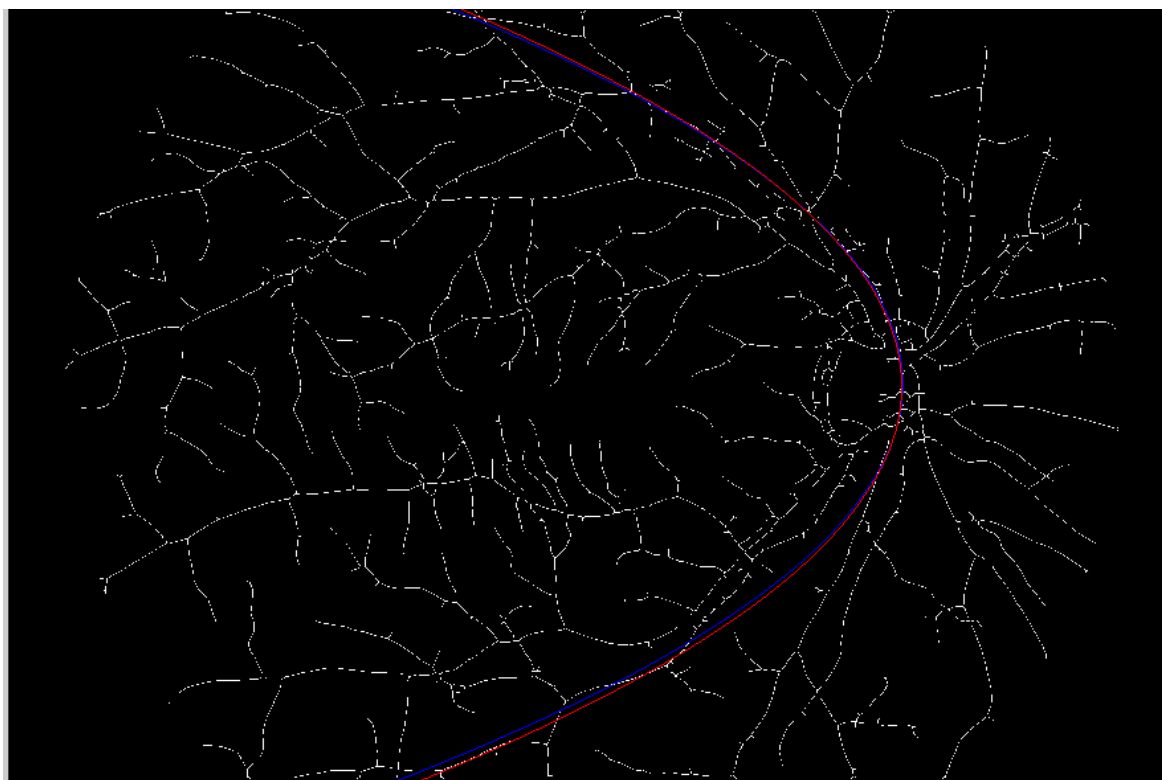
if (preskoc == 0)
    celkem_bodu = sum(sum(parabola));
    % hodnotici mapy
    mapaVzd = bwdist(genofond);
    mapaSil = fitMapTloustka;
    % vypocet hodnoticich funkci a prirazeni do vektoru s vysledky
    % ostatnich jedincu
    fitnesVzdalenost = sum(sum(mapaVzd.*parabola))/celkem_bodu;
    fitnesVzd = [fitnesVzd, fitnesVzdalenost];
    fitnesSila = sum(sum(mapaSil.*parabola))/celkem_bodu;
    fitnesSil = [fitnesSil, fitnesSila];
    jedinci = [jedinci, v];

```

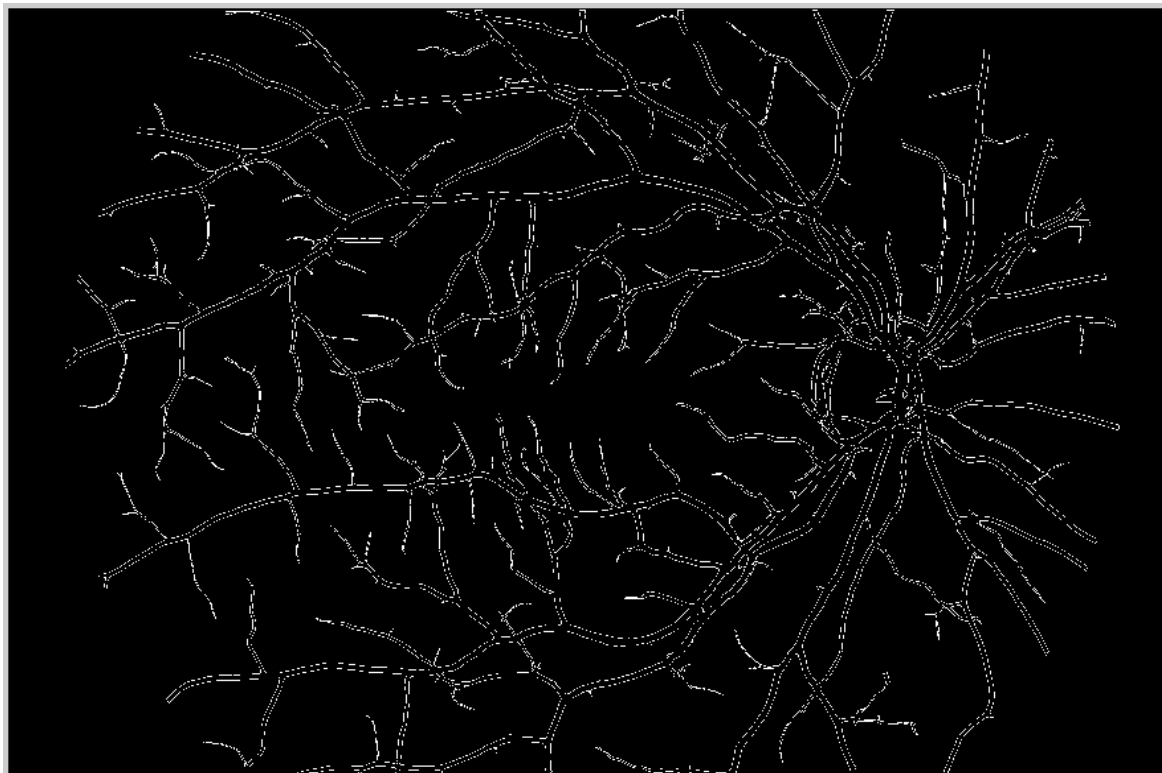
Testováním bylo zjištěno, že při každém spuštění výpočtu pro daný snímek jsou z genofondu o 200 jedincích vybrány 3 různé větve, které jsou následně proloženy parabolou. Vzhledem k náhodnosti vybírání větví se výsledek při každém spuštění mohl mírně lišit. Pro lepší zhodnocení a znázornění výsledků detekce byl proto vytvořen datový soubor pro každý snímek, který obsahuje výsledky výpočtu pro 1000 jedinců (možno ve skriptu následně zobrazit pro 5 dílčích částí), což je sice časově náročnější, ale dává nám přesnější výsledek.

7.6 Zobrazení výsledků

V následující podkapitole jsou uvedeny obrazové výsledky detekce optického disku. Příklad výsledků detekce je znázorněn pro snímek *image_0246.jpg* (Obr. 7.5 až Obr. 7.9).



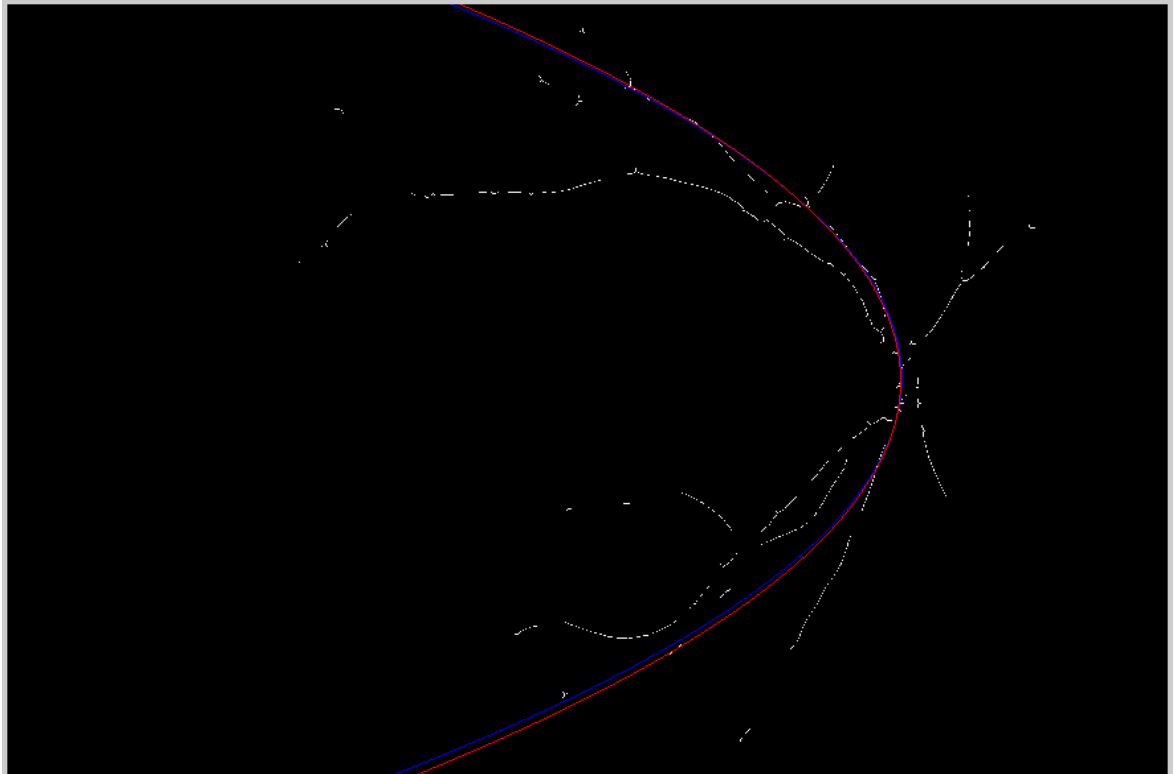
Obr. 7.5: Skeleton cév spolu s vykreslením parabol hodnocené jak podle kritéria vzdálenosti (modrá), tak podle kritéria tloušťky (červená).



Obr. 7.6: Kontury cévní struktury



Obr. 7.7: Tloušťková hodnotící mapa



Obr. 7.8: Genofond s vykreslením paraboly hodnocené jak podle kritéria vzdálenosti (modrá), tak podle kritéria tloušťky (červená).

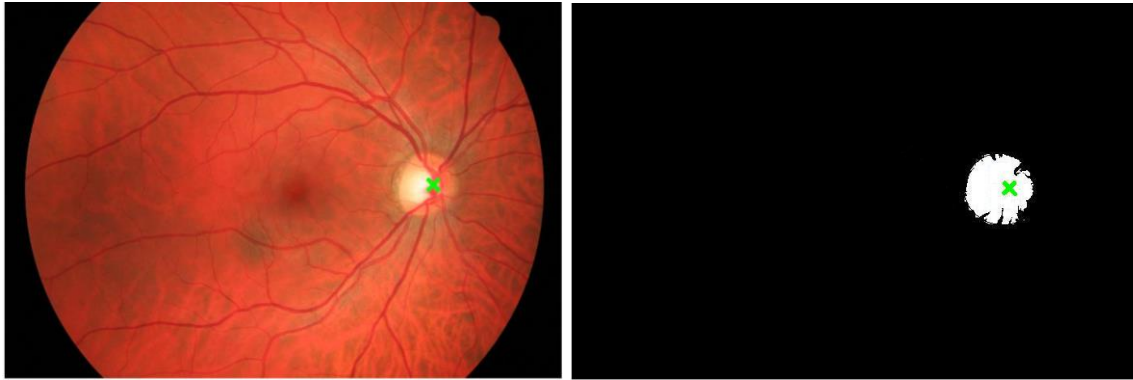


Obr. 7.9: Vykreslení originálního snímku s detekcí optického disku (zelený křížek)

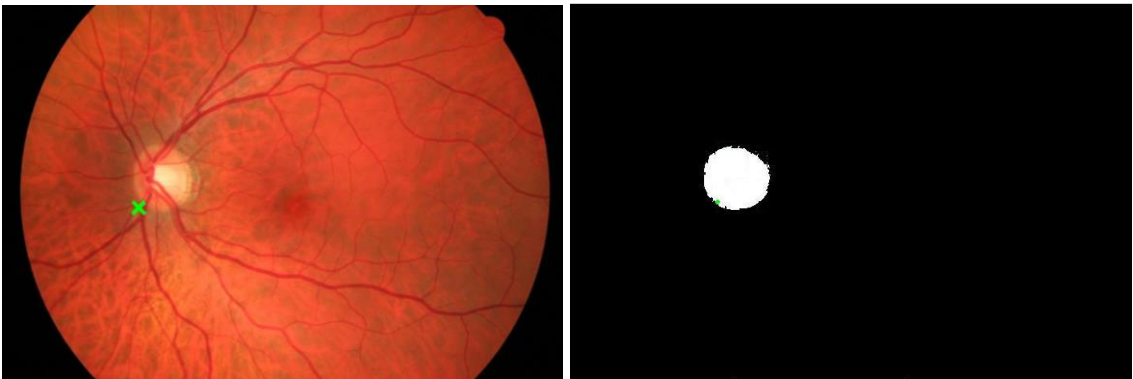
8 VYHODNOCENÍ METODY

Na následujících snímcích (Obr. 8.1) jsou shrnuty výsledky navrženého automatického detektoru optického disku. Testováno bylo 15 snímků z databáze uvedené v kapitole 3.2. Originální snímek z databáze spolu s odpovídající směrovou mapou cév je načten do algoritmu pro detekci OD. Hlavní myšlenka proložení cévní struktury parabolou tak, že její vrchol odpovídá bodu náležejícímu oblasti OD je propojena s metodou genetického algoritmu. Pomocí selekce významných cév a jejich větví a následným vytvořením paraboly pomocí metody nejmenších čtverců je možné nalézt optimální vrchol paraboly. Spolu s výsledkem detekce OD je u každého snímku vytvořena binární maska. Binární maska byla získána prahováním původního snímku a následně do ní byl vykreslen odpovídající bod lokalizovaný jako místo OD (tedy vrchol paraboly). Tato maska nám z obrázku sítnice ohraničí oblast OD a můžeme porovnat, jak byla detekce OD úspěšná (zda se vypočítané souřadnice OD nacházejí v místě fyzického výskytu OD). Na základě toho poté můžeme získat hodnoty TP (True Positive), FN (False Negative) a z těchto hodnot lze určit sensitivitu a specifitu navržené metody. Na následujících snímcích (Obr. 8.1 a) až o)) vidíme, že metoda správně určila polohu OD ve 12 případech z 15. Na Obr. 8.1 b) image_0262.jpg, Obr. 8.1 d) image_0873.jpg a Obr. 8.1 i) image_1012.jpg vidíme, že poloha OD byla automaticky detekována mimo fyzické umístění OD. Tomu odpovídá i binární mapa, na které není detekce zaznamenána. Testováním bylo zjištěno, že při každém spuštění výpočtu pro daný snímek jsou z genofondu o 200 jedincích vybrány 3 různé větve, které jsou následně proloženy parabolou. Vzhledem k náhodnosti vybírání větví se výsledek při každém spuštění mohl mírně lišit. Pro lepší zhodnocení proto byl vytvořen datový soubor pro každý snímek, který obsahuje výsledky výpočtu pro 1000 jedinců (možno ve skriptu následně zobrazit pro 5 dílčích částí), což je sice časově náročnější detekce, ale dává nám přesnější výsledek. Příčinou chybné detekce u některých snímků je tedy pravděpodobně náhodné generování parabol při každém spuštění algoritmu, které vykreslilo parabolu mimo očekávaný směr cév a následně byl vrchol paraboly určen mimo OD. Řešením by mohlo být navýšení počtu jedinců pro výpočet, jak je zmíněno výše, což by však mělo za následek zvýšení časové náročnosti výpočtu.

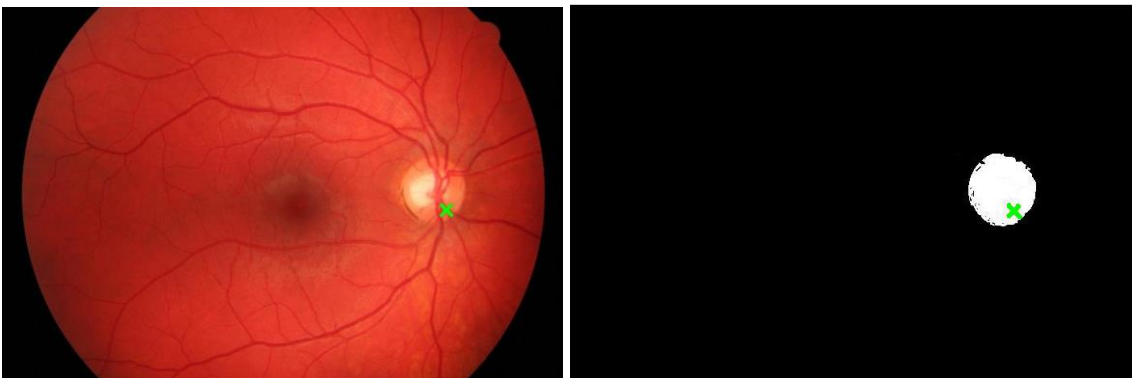
Následující snímky (Obr. 8.1) s detekcí vrcholu paraboly jsou výsledkem algoritmu, který generoval jednu generaci o velikosti 1000 jedinců. Následně bylo vybráno neoptimálnější proložení parabolou a to jak pro parabolu hodnocenou podle kritéria tloušťky, tak podle kritéria vzdálenosti.



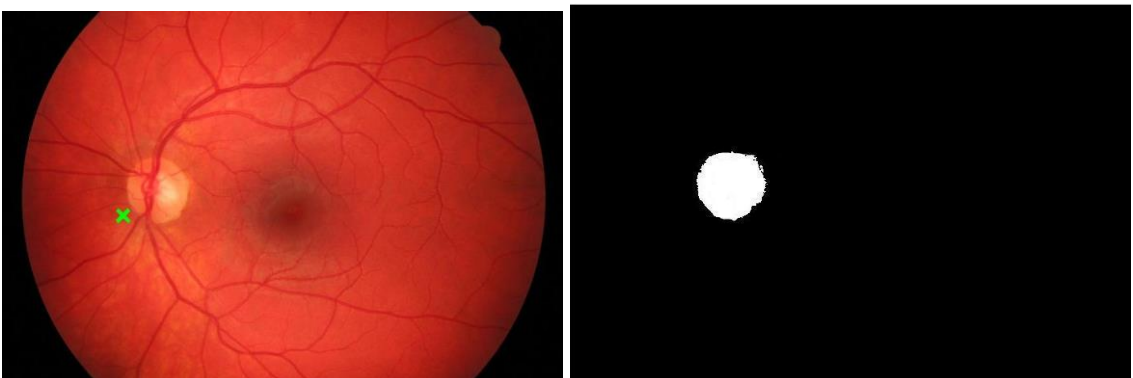
a) image_0246.jpg



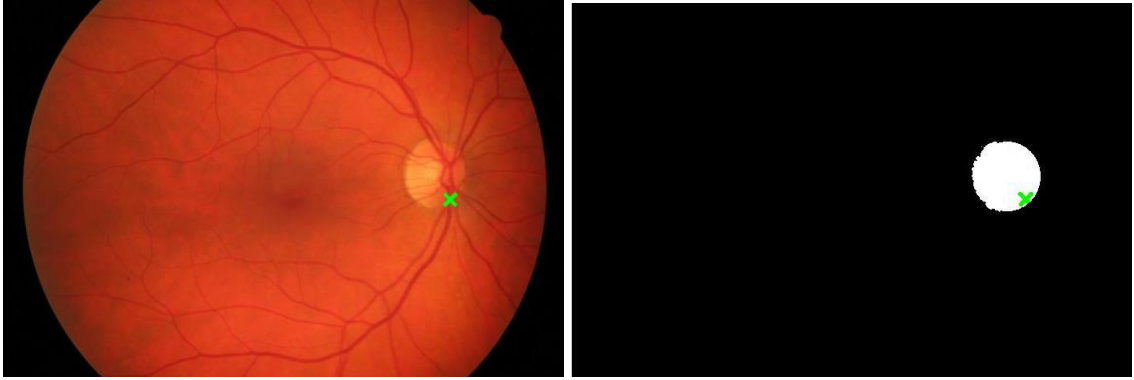
b) image_0262.jpg



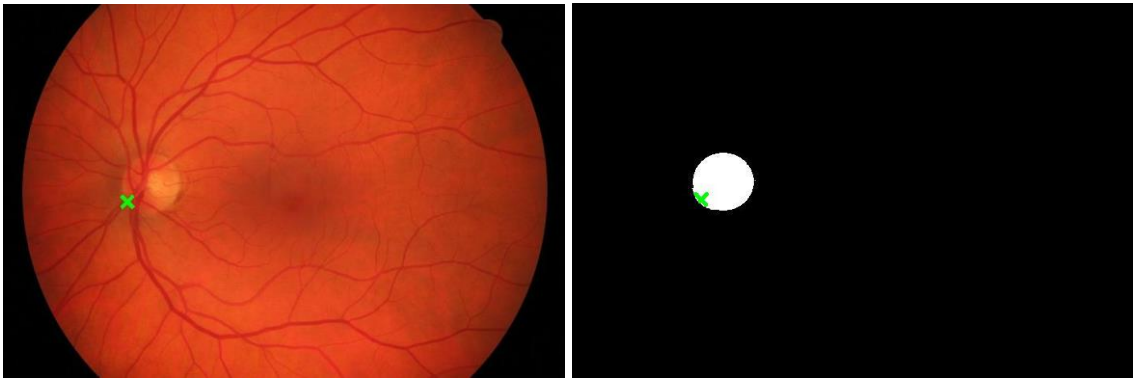
c) image_0866.jpg



d) image_0873.jpg



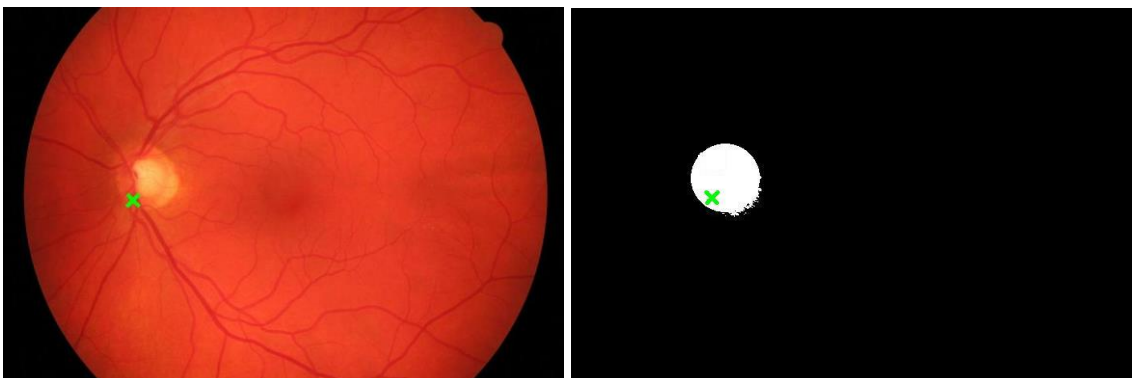
e) image_0878.jpg



f) image_0888.jpg



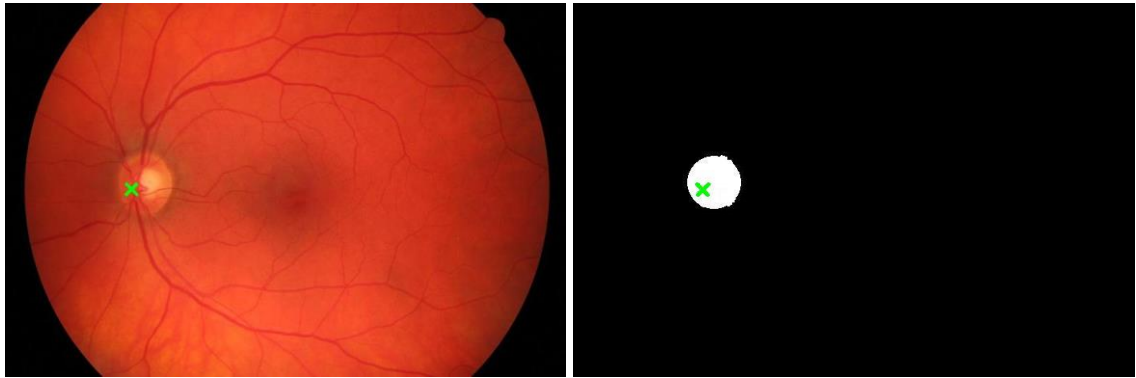
g) image_0964.jpg



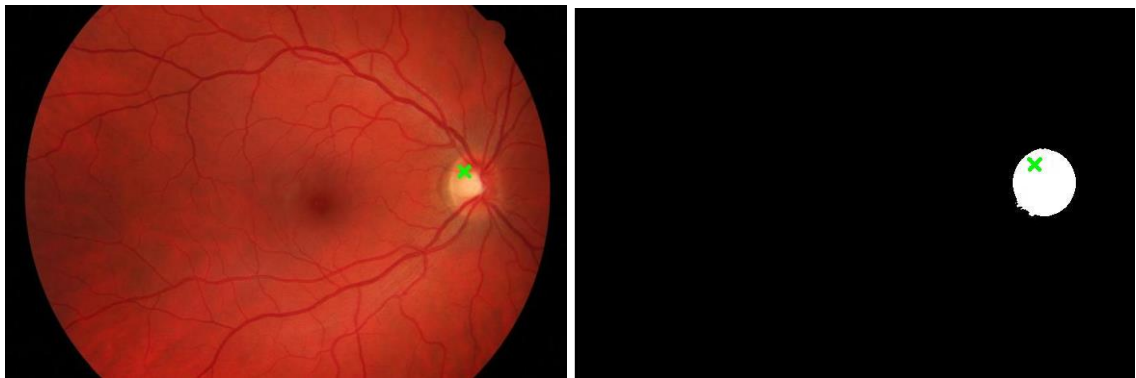
h) image_0980.jpg



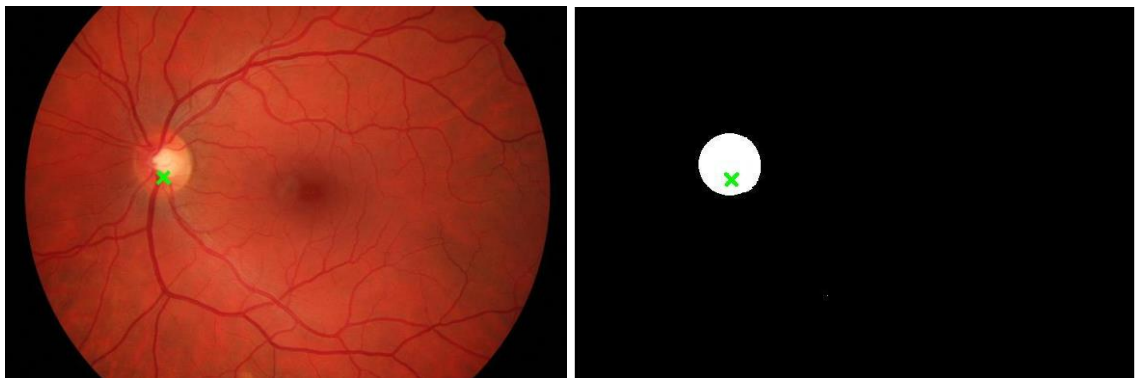
i) image_1012.jpg



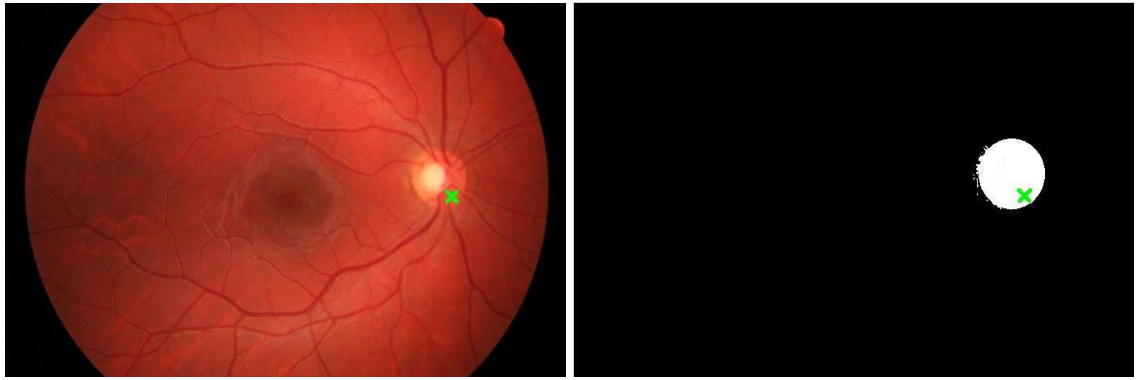
j) image_1028.jpg



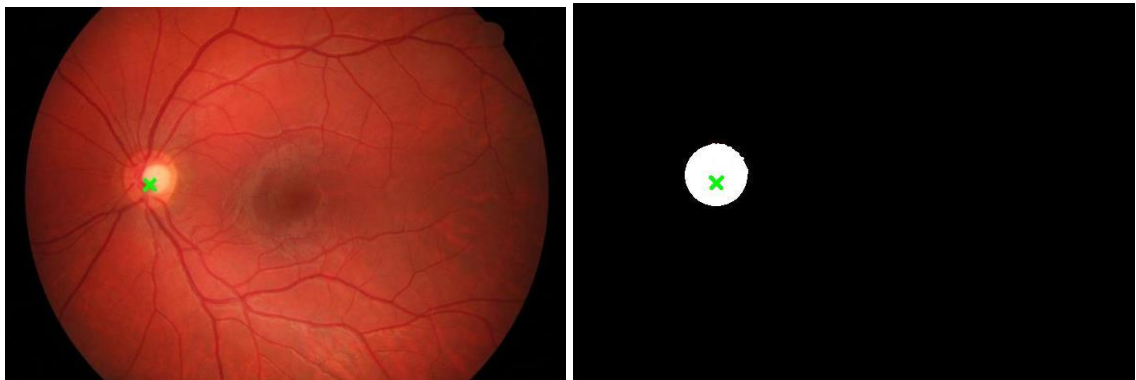
k) image_1154.jpg



l) image_1165.jpg



m) image_1204.jpg



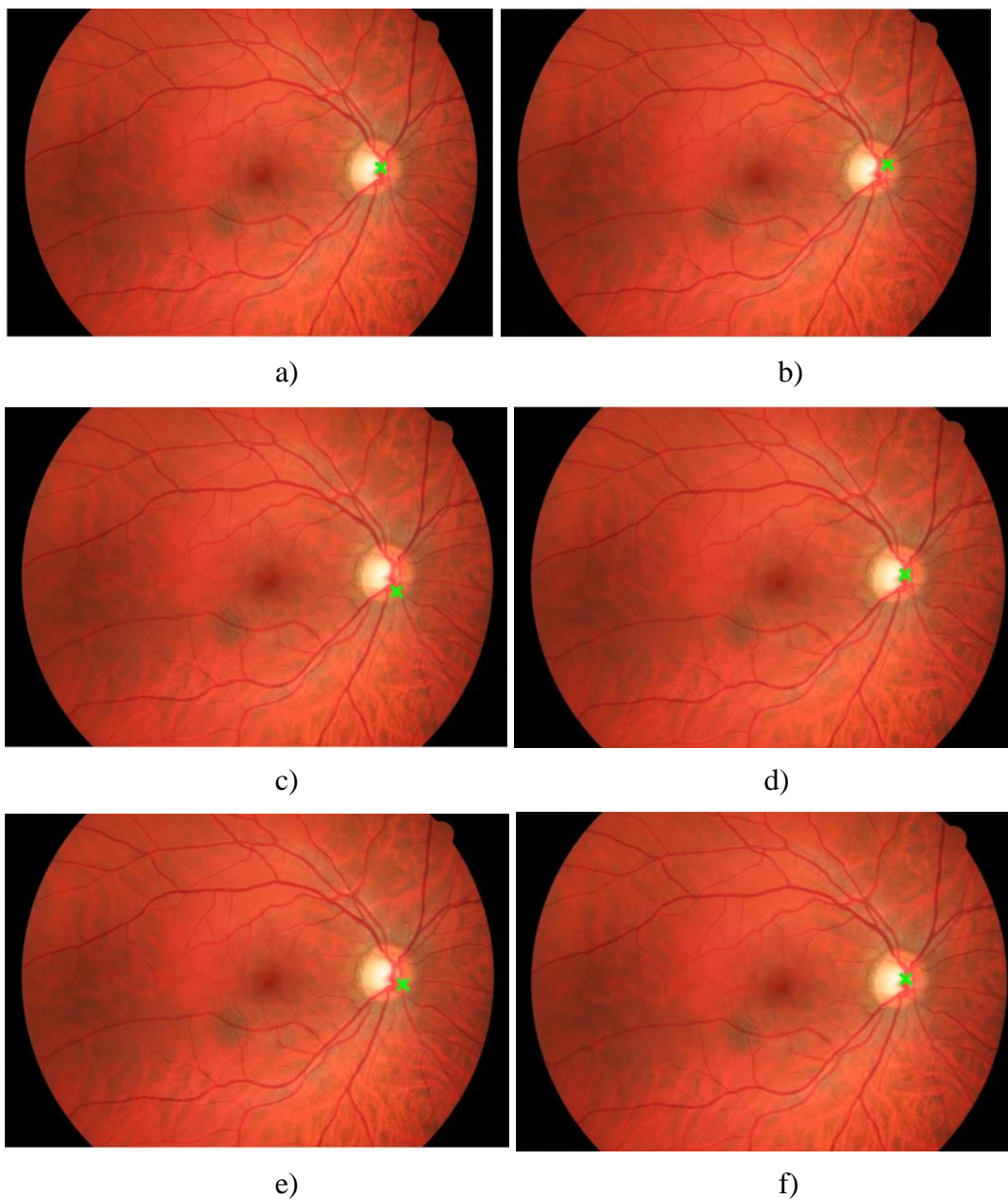
n) image_1213.jpg



o) image_1365.jpg

Obr. 8.1: Výsledky odhadu OD pro jednotlivé snímky a odpovídající binární masky

Na následujících snímcích můžeme vidět porovnání nejlépe ohodnocené paraboly výpočtu pro 1000 jedinců (Obr. 8.2 a)) spolu s výsledky dílčích pěti generací (vždy pro 200 jedinců) pro snímek_0246.jpg (Obr. 8.2 b) až f)).



Obr. 8.2: Výsledky detekce OD na základě počtu jedinců generace a části výpočtu:

- a) 1000 jedinců; počet částí výpočtu: 1
- b) 200 jedinců, počet částí výpočtu: 5, pořadové číslo části výpočtu: 1;
- c) 200 jedinců, počet částí výpočtu: 5, pořadové číslo části výpočtu: 2;
- d) 200 jedinců, počet částí výpočtu: 5, pořadové číslo části výpočtu: 3;
- e) 200 jedinců, počet částí výpočtu: 5, pořadové číslo části výpočtu: 4;
- f) 200 jedinců, počet částí výpočtu: 5, pořadové číslo části výpočtu: 5

8.1 Testování úspěšnosti metody

Pro testování úspěšnosti metody lokalizace OD je potřeba určit, v kolika případech porovnání obrázku s maskou se podařilo, aby vypočítané souřadnice OD (zelený křížek) byly opravdu v místě fyzického výskytu OD [50]. V Tabulce 1 je uvedeno teoretické obsazení jednotlivých buněk. V Tabulce 2 jsou již uvedeny počty správně a nesprávně určených pozic OD na testovaných snímcích.

Tab. 1: Tabulka pro určení správně a nesprávně lokalizovaných objektů

	Místo OD	Okolí OD
Správná detekce	+	-
+	TP	FN

Hodnota TP (správně pozitivní, true positive) je počet křížků, které jsou správně určeny v místě OD.

Hodnota FN (falešně negativní, false negative) je počet křížků, které jsou chybně určeny mimo OD.

Tab. 2: Počet správně a nesprávně lokalizovaných pozic OD.

	Místo OD	Okolí OD
Správná detekce	+	-
+	12	3

Na základě této tabulky můžeme vypočítat sensitivitu metody (procentuální úspěšnost).

Sensitivita

Sensitivita, neboli TPR (True Positive Rate), je popsána jako míra pravdivé pozitivity [50].

Sensitivitu můžeme vyjádřit rovnicí [51]:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

$$TPR = \frac{12}{12 + 3}$$

$$TPR = 0,8 = 80\%$$

Na základě výsledku výpočtu sensitivity můžeme říct, že metoda byla úspěšná v 80 % případů.

9 POPIS PROGRAMOVÝCH MODULŮ

Skript *od_estimation.m*:

Skript slouží k nalezení paraboly prokládající mapu cévního řečiště parabolou.

VSTUPY:

- Obraz cév - jeho název v parametru "image"
- Směrová mapa - umístění a název shodný s "image" s příponou "_smery.mat"

PARAMETRY:

- pocet_jedincu - počet jedinců, který se má vygenerovat. S parametrem roste úměrně časová náročnost. Roste však také stabilita řešení.
- n_gens - počet genů, vybíraných z genofodu (počet větví, který se má použít k sestavení jedince)
- f_fitMapTloustka - faktor ovlivňující rozdíly v mapě tloušťek cév, faktor >1 zesiluje, <1 zeslabuje rozdíly
- Q - jaká část obrazu se má vyloučit (nahore a dole) pro umístění slepé skvrny ($0 \leq Q < 0.5$)

Následující parametry jsou spolu svazány a není doporučeno je měnit:

- n_sampling - koeficient podvzorkování vstupních dat
- tlThreshold - práh pro prahování tloušťkového popisu cév. Jsou vybrány pouze silnější cévy než práh
- tlAreaThreshold - práh pro výběr cév podle jejich délky. Jsou vybrány pouze cévy delší než práh

VÝSTUPY

- skeleton cév s vykreslenou parabolou hodnocenou podle kritéria vzdálenosti
- kontura cév
- tloušťková hodnotící mapa
- genofond s vykreslením paraboly hodnocené podle kritéria tloušťky
- originální snímek s nalezeným bodem detekce
- distanční mapa

Skript *skript.m*:

Skript slouží k nalezení paraboly prokládající mapu cévního řečiště pro všechna data zaregistrovaná v poli `snimkyX`

VSTUPY:

- Obrazy cév - jejich názvy v parametrech "cesta"+[snimkyX]+.jpg
- Směrové mapy - umístění a název shodný s obrazy s příponou "_smery.mat"

PARAMETRY: stejné jako u skriptu `od_estimation.m` Vypočítaná data se ukládají do paměti na disk s prefixem 'data_'

Skript *skriptNacteni.m*:

Skript načte a zobrazí předvypočtená výsledky hledání optického disku z cévního řečiště.

VSTUPY:

- Předvypočtená data - jejich názvy podle předpisu: `data_+[snimkyX]`
- Obraz cév - jeho název v parametru "image"

PARAMETRY:

- pořadové číslo předvypočtených dat z vektoru `snimkyX`, které chceme zobrazit
- `C` - počet částí, na které chceme data rozdělit
- `Cc` - pořadové číslo části, kterou chceme zobrazit

Např. `C = 1, Cc = 1` zobrazí výsledek ze všech spočítaných jedinců.

`C = 3, Cc = 2` zobrazí výsledek ze druhé třetiny spočítaných jedinců

VÝSTUPY

- skeleton cév s vykreslenými parabolami hodnocenými podle kritéria vzdálenosti i tloušťky
- kontura cév
- tloušťková hodnotící mapa
- genofond s s vykreslenými parabolami hodnocenými podle kritéria vzdálenosti i tloušťky
- originální snímek s nalezeným bodem detekce
- distanční mapa

10 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá oblastí zpracování retinálních snímků pro detekci optického disku. Část práce je věnována teoretickému medicínskému pozadí zrakového systému. Podrobněji popisuje stavbu sítnice, jejíž vyšetření nám dává informace o stavu očního pozadí. Díky vyšetření pomocí digitální fundus kamery (kap. 2) lze diagnostikovat řadu onemocnění, jako např. diabetická retinopatie nebo glaukomatické změny, jejichž příznaky jsou v práci také zmíněny. Pro správnou diagnostiku všech těchto onemocnění je ale důležitá správná lokalizace objektů, které se na sítnici vyskytují. Patří mezi ně žlutá skvrna, nervová vlákna, optický disk a cévní struktury. V práci jsou pro potřeby algoritmu použity snímky z databáze zmíněné v kapitole 3. Databáze obsahuje soubor 15 snímků sítnice.

Rešerše dosud publikovaných hlavních metod pro analýzu snímků sítnice zahrnuje metody publikované zhruba od roku 1992 až do současnosti. Tato oblast výzkumu přináší každoročně několik nových prací zaměřených na lokalizaci OD na snímcích sítnice.

K návrhu detektoru pozice OD bylo využito programové prostředí MATLAB R2009. Vlastní návrh algoritmu pro detekci OD je založen na principu genetických algoritmů. Tyto metody různými strategiemi procházejí prostor možných řešení (generování) a vyhodnocují různá řešení (testování). Pro algoritmus je také klíčovou myšlenkou předpoklad parabolického směru cévní struktury. Optický disk je následně určen jako vrchol zmíněné paraboly. Zároveň však potřebujeme znát princip odhalení cévní struktury na sítnici. K tomu jsme použili metodu segmentace cévního řečiště (kap. 5). Tato metoda je založena na principu přizpůsobené filtrace a jejím výsledkem je kompletní struktura cév, která však neobsahuje informace o šířce cév. V práci se však podařilo pomocí morfologických operací selektovat šířku cév, jejich hrany a celkovou skeletonizaci cévní mapy. Po předzpracování vstupních snímků byla pro detekci vybrána z cévní sítě podmnožina cév (jedinec), která byla následně prokládána parabolou, která byla omezena několika kritérii (vodorovná osa paraboly, míra otevření paraboly a předpoklad polohy OD ve vymezeném prostoru). Parabola byla hodnocena pomocí funkce vzdálenosti od cévy a pomocí funkce hodnotící průchod nejsilnějšími cévami. Obě kritéria byla ve výsledku přibližně stejně úspěšná. Souřadnice vrcholu paraboly, která byla nejlépe ohodnocena dle zmíněných ohodnocovacích funkcí byly zaznamenány jako bod, náležející OD.

Navržená metoda detekce OD s využitím informací o směrech cév úspěšně určila OD v 12 případech z 15 snímků (86 %). Ke zhodnocení správnosti lokalizace byly vytvořeny binární mapy, na kterých bylo dobře patrné, kdy se vypočtené souřadnice trefily do místa OD.

Pro lepší ohodnocení úspěšnosti metody by také bylo vhodné otestovat algoritmus na větším datovém souboru, který by zahrnoval snímky sítnice a k nim odpovídající segmentované směrové mapy cévní struktury (dle kap. 5). Mezi databáze, z kterých by bylo možno čerpat patří například databáze zlatých standardů DRIVE a STARE. Využití by bylo možné i pro snímky s patologickými nálezy, kde nedochází k poškození cévní struktury. Předpokládáme, že ostatní patologické nálezy by nemusely metodu vůbec ovlivnit. Další rozšíření metody pro detekci optického disku na základě myšlenky parabolického směru cévní struktury by se mohlo týkat například vylepšení implementace genetického algoritmu a zdokonalení výběru vhodných kandidátských cév pro proložení parabolou.

LITERATURA

- [1] ROZSÍVAL, P. a kol., *Oční lékařství*, Praha: Galén, 2006, 373 str., ISBN-10: 80-7262-404-0
- [2] NOVOTNÝ, M; HRUŠKA, I., *Biologie člověka*. Praha: Fortuna, 2002, 239 str., ISBN 80-7168-819-3
- [3] ČIHÁK, R., *Anatomie 3*, Praha: Grada, 2., 2004, 692 str., ISBN-10: 80-247-1132X
- [4] URL: <<http://anat.lf1.cuni.cz/souhrny/oko.pdf>> [cit. 2011-04-17].
- [5] as. MUDr. HLOŽÁNEK, M. et al., *Přístrojová technika v oftalmologii*, Praha: ART et FACT, 2006, ISBN 80-902160-9-9
- [6] KOLÁŘ R.: *Diagnostika bio- a ekosystémů, Oko_zobrazovací_systemy -přednáška. ÚBMI, FEKT VUT. 2011.*
URL:<https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/98806/Prednasky/8_tema_Oko_zobrazovací_systemy.pdf> [cit. 2011-04-17].
- [7] DOSTÁL, V.: *Předzpracování obrazů sítnice: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radim Kolář, Ph.D.
- [8] ODSTRČILÍK, J.: *Analýza barevných snímků sítnice se zaměřením na segmentaci cévního řečiště: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 82 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Jan, CSc.
- [9] MALÍNSKÝ, M. *Segmentace významných objektů v barevných oftalmologických obrazech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 57 s. Vedoucí diplom. práce Ing. Radim Kolář, Ph.D.
- [10] URL: < http://www.direct-results.org/progression_of_retinopathy.html> [cit. 2011-04-17].
- [11] Lupascu, C.A.; Tegolo, D.; Di Rosa, L.; , "Automated Detection of Optic Disc Location in Retinal Images," Computer-Based Medical Systems, 2008. CBMS '08. 21st IEEE International Symposium on, vol., no., pp.17-22, 17-19 June 2008.
doi: 10.1109/CBMS.2008.15

- [12] Lowell, J., Hunter, A., Steel, D., Basu, A., Ryder, R., Fletcher, E., Kennedy, L., *Optic Nerve Head Segmentation* (2004), IEEE Transactions on Medical Imaging, 23 (2), pp. 256-264. doi: 10.1109/TMI.2003.823261.
- [13] Shijian Lu; Joo Hwee Lim; , "Automatic Optic Disc Detection From Retinal Images by a Line Operator," Biomedical Engineering, IEEE Transactions on , vol.58, no.1, pp.88-94, Jan. 2011. doi: 10.1109/TBME.2010.2086455
- [14] Sinthanayothin C., Boyce J., Cook H., and Williamson T.; *Automated localisation of the optic disc, fovea, and retinal blood vessels from digital colour fundus images*, Br J Ophthalmol., August 1999; 83(8): 902–910.
- [15] Lee, S.Y.; Kim, K.K.; Seo, J.M.; Kim, D.M.; Chung, H.; Park, K.S.; Kim, H.C.; , "Automated quantification of retinal nerve fiber layer atrophy in fundus photograph," Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS '04. 26th Annual International Conference of the IEEE, vol.1, pp.1241-1243, 1-5, Sept. 2004 doi: 10.1109/IEMBS.2004.1403394
- [16] Vermeer, K.A., Reus, N.J., Vos, F.M., Vossepoel, A.M., Lemij, H.G. *Automated detection of wedge-shaped defects in polarimetric images of the retinal nerve fibre layer* (2006) *Eye*, 20 (7), pp. 776-784. doi: 10.1038/sj.eye.6701999
- [17] Park, M.; Jin, J.S.; Luo, S.; , "Locating the Optic Disc in Retinal Images," Computer Graphics, Imaging and Visualisation, 2006 International Conference on, pp.141-145, 26-28 July 2006 doi: 10.1109/CGIV.2006.63
- [18] Hoover, A.; Goldbaum, M.; , "Locating the optic nerve in a retinal image using the fuzzy convergence of the blood vessels," Medical Imaging, IEEE Transactions on , vol.22, no.8, pp.951-958, Aug. 2003 doi: 10.1109/TMI.2003.815900
- [19] Huiqi Li; Chutatape, O.; , "Automatic location of optic disk in retinal images," *Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on* , vol.2, pp.837-840 vol.2, 7-10 Oct 2001 doi: 10.1109/ICIP.2001.958624
- [20] Lalonde, M.; Beaulieu, M.; Gagnon, L.; , "Fast and robust optic disc detection using pyramidal decomposition and Hausdorff-based template matching," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol.20, no.11, pp.1193-1200, Nov. 2001 doi: 10.1109/42.963823

- [21] Osareh, A.; Mirmehdi, M.; Thomas, B.; Markham, R.; , "Comparison of colour spaces for optic disc localisation in retinal images," *Pattern Recognition, 2002. Proceedings. 16th International Conference on*, vol.1, pp. 743-746, vol.1, 2002
doi: 10.1109/ICPR.2002.1044865
- [22] Foracchia, M.; Grisan, E.; Ruggeri, A.; , "Detection of optic disc in retinal images by means of a geometrical model of vessel structure," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol.23, no.10, pp.1189-1195, Oct. 2004
doi: 10.1109/TMI.2004.829331
- [23] O ODSTRČILÍK, J.; JAN, J.; KOLÁŘ, R.; GAZÁREK, J. Improvement of Vessel Segmentation by Matched Filtering in Colour Retinal Images. In *IFMBE Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Springer. Springer, 2009. s. 327-330. ISBN: 978-3-642-03897- 6.
- [24] BUDAI, A.; ODSTRČILÍK, J.; KOLÁŘ, R.; HORNEGGER, J.; JAN, J.; KUBĚNA, T.; MICHELSON, G. *A Public Database for the Evaluation of Fundus Image Segmentation Algorithms*. Proc. of the Association for Research in Vision and Ophthalmology conference (ARVO) 2011. ARVO 2011. Fort Lauderdale, Florida, USA: Association for Research in Vision and Ophthalmology, Inc., 2011. s. 1-2..
- [25] URL: <<http://www5.informatik.uni-erlangen.de/research/data/fundus-images>>
[cit. 2011-04-17].
- [26] Melša, O. *Detekce optického disku v oftalmologických obrazech: bakalářská práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 48 s.
- [27] JAN, J. *Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration - Concepts and Methods*. Signal Processing and Comm. Signal Processing and Comm. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2006. 760 s. ISBN: 0-8247-5849- 8.
- [28] Chenyang Xu; Prince, J.L.; , "Snakes, shapes, and gradient vector flow," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol.7, no.3, pp.359-369, Mar 1998
doi: 10.1109/83.661186
- [29] Williams D. J., Shah M.: *A Fast Algorithm for Active Contours and Curve Estimation*. CVGIP: Image Understanding, 55, 1, 1992, pp.14-26.
- [30] Ji, L.; Yan, H.; , "Loop-free snakes for image segmentation," *Image Processing, 1999. ICIP 99. Proceedings. 1999 International Conference on*, vol.3, pp.193-197 vol.3, 1999
doi: 10.1109/ICIP.1999.817099
- [31] Inoue, N.; Yanashima, K.; Magatani, K.; Kurihara, T.; , "Development of a simple diagnostic method for the glaucoma using ocular Fundus pictures.," *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference of the*, vol., pp.3355-3358, 17-18 Jan. 2006
doi: 10.1109/IEMBS.2005.1617196

- [32] Nayak, J., Acharya R., Bhat S. P., et al.: *Automated diagnosis of glaucoma using digital fundus images*, J Med. Syst., 2009, vol. 33, no. 5, pp. 337-346.
- [33] Bock R., Meier J., Nykl L. G., Hornegger J., *Glaucoma Risk Index: Automated glaucoma detection from color fundus images*, Medical Image Analysis, 14(3), 471-481, (2010).
- [34] Bělehrad, M.: *Detekce autofluorescenční zóny v oftalmologických obrazech*. Diplomová práce, Brno 2006.
- [35] Hanák, L. *Změny na očním pozadí při celkových onemocněních*. Lékařské listy, 2001, roč. 50, č. 33, s. 14-17.
- [36] *Specifikace fundus kamery CANON CF-60 UVi*. [cit. 21. března 2012]. Dostupné
- [37] Toliás, Y.A.; Panas, S.M.; , "A fuzzy vessel tracking algorithm for retinal images based on fuzzy clustering," *Medical Imaging, IEEE Transactions on* , vol.17, no.2, pp.263-273, April 1998
doi: 10.1109/42.700738
- [38] Hoover, A.D.; Kouznětsova, V.; Goldbaum, M.; , "Locating blood vessels in retinal images by piecewise threshold probing of a matched filter response," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol.19, no.3, pp.203-210, March 2000
doi: 10.1109/42.845178
- [39] Foracchia M., Grisan E., and Ruggeri A.: *Detection of vessel caliber irregularities in color retinal fundus images by means of fine tracking*, in EMBEC'02—IFMBE Proc. Series, vol. 3, Wien, Dec. 2002, pp. 1558–1559.
- [40] Metropolis N., Rosenbluth A., Rosenbluth M., Teller A., and Teller E.: *Equation of state calculation by fast computing machines*, J. Chem. Phys., vol. 21, 1953, pp. 1087–1092.
- [41] STARE project website. Clemson Univ., Clemson, SC. [Online].
- [42] Novo J., Penedo M.G., and Santos J.: *Optic Disc Segmentation by Means of GA-Optimized Topological Active Nets*, in Proc. ICIAR, 2008, pp.807-816.
Doi: 10.1007/978-3-540-69812-8_80
- [43] Li, H.; Chutatape, O.; , "A model-based approach for automated feature extraction in fundus images," *Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference on*, vol.1, 13-16 Oct. 2003, pp.394-399, doi: 10.1109/ICCV.2003.1238371
- [44] Vijaya Kumari Miste V., Suriyanarayanan N.: *Comparative survey of the detection of optic disc and exudates in retinal images*, Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, No. 12, 2008, pp. 925-932.

- [45] Pallawala P., Hsu W., Lee M., and Eong K.: *Automated optic disc localization and contour detection using ellipse fitting and wavelet transform*, Proc. ECCV, 2004, pp. 139–151.
- [46] Li, H.; Chutatape, O.; , "Fundus image features extraction," *Engineering in Medicine and Biology Society, 2000. Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE*, vol.4, 2000, pp.3071-3073, doi: 10.1109/IEMBS.2000.901530
- [47] Chu Y. P., Yang-Mao S. F., Chen Y. F., Chan Y. K., Tsai C. S., and Chiang W. C., *Optic Disk Locating of the Retinal Fundus Images using Simple Statistic Parameters*, International Conference on Biomedical Engineering (BioMED 2005), February 2005, Innsbruck, Austria, pp. 86-89.
- [48] Siddalingaswamy, P.C.; Prabhu, G.K.; , "Automated Detection of Anatomical Structures in Retinal Images," *Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, 2007. International Conference on* , vol.3, no., pp.164-168, 13-15 Dec. 2007 doi: 10.1109/ICCIMA.2007.94
- [49] Chr'astek. R.W. Domth M., Michelson K. and Niemann G.H.: *Optic Disc Segmentation in Retinal Images*. In Bildverar beitung fur die Medizin, 2002, pp: 263-266.
- [50] SVOBODA, O.: *Hodnocení automatických metod segmentace cévního řečiště*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 56 s., 1 příloha. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Odstrčilík.
- [51] PROVAZNÍK I: Úvod do biomedicínské informatiky; Pravděpodobnost v rozhodování-přednáška [pdf dokument].ÚBMI VUT Brno. 2009. [cit. 2011-05-15]
- [52] BERGMANN Jerry; Calkins Joseph. Is the backwards human retina evidence of poor design. *Impact* [online]. 2005, říjen [cit. 2010-12-21]
- [53] KUČHYNKA, P. et al.: *Oční lékařství*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2007, 812 s.
- [54] ROZSÍVAL, P. *Trendy soudobé oftalmologie 2*. 1. vyd., Praha: Galén, 2006, 286 s.
- [55] DIBLÍK, Pavel vedoucí kolektivu překladatelů. *Diagnostika a léčba očních chorob v praxi – The Wills Eye Manual*, Překlad 3. anglického vydání, Praha: TRITON, 2004, 618 s.
- [56] Nayak, J., Acharya U., R., Bhat, P.S., Shetty, N., Lim, T.-C.: Automated diagnosis of glaucoma using digital fundus images. *Journal of medical systems* [online]. 2009, roč. 33, č. 5, s. 337-346 [cit. 2013-05-09].
- [57] Durairaj, V.D., Oliver, S.C.N.: Diabetic retinopathy: An update on treatment. *The American journal of medicine* [online]. 2010, roč. 123, č. 3, s. 213-216 [cit. 2013-05-09].
- [58] Jaspreet Kaur, Dr Sinha, "Automated localization of optic disc and macula from fundus images", *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software*

- Engineering, vol. 2, Issue 4, pp. 242-249, April 2012.
- [59] Qureshi, R. J., Kovacs, L., Harangi, B., Nagy, B., Peto, T., Hajdu, A.: "Combining algorithms for automatic detection of optic disc and macula in fundus images", *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 116, Issue 1, pp. 138-146, Jan 2012.
- [60] Hung-Kuei Hsiao, Chen-Chung Liu, Chun-Yuan Yu, Shiau-Wei Kuo, and Shyr-Shen Yu. A novel optic disc detection scheme on retinal images. *Expert Syst. Appl.* 39, 12 (September 2012)
- [61] Esmaeili, M., Rabbani, H., Dehnavi, A. M.: Automatic optic disc boundary extraction by the use of curvelet transform and deformable variational level set model. *Pattern Recogn.* 45, 7 (July 2012), 2832-2842.
- [62] Welfer, D., Scharcanski, J., Ruschel Marinho, D.: A morphologic two-stage approach for automated optic disc detection in color eye fundus images. *Pattern Recogn. Lett.* 34, 5 (April 2013), 476-485.
- [63] Ruggeri, A., Foracchia, M., Grisan, E.: Detection of optic disc based on a directional model of vascular network. Proc. 3rd International Workshop on Computer Assisted Fundus Image Analysis (CAFIA3), *Eur. J. Ophthalmol.* 13 (2): 228, 2003.
- [64] IMAQ : IMAQ Vision Concepts Manual [online]. 11500 North Mopac Expressway, Austin (Texas) : National Instruments Corporate Headquarters, 2000, June 2003 Edition [cit. 2013-04-01].xvi, 300 s. Dostupné z WWW: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/322916b.pdf>>. PartNumber322916B-01.
- [65] BAYER, Tomáš; ŠÍP, Marcel. Aplikace skeletonu při automatizované kartografické generalizaci[online]. 2008 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z WWW: <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2008/sbornik/Lists/Papers/035.pdf>.
- [66] Mathworks Help. Image Processing Toolbox - Functions - Morphological Operations - Binary Images [cit. 2013-04-01]. Dostupné z www: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/images/ref/bwmorph.html>.
- [67] HYNEK, Josef. Genetické algoritmy a genetické programování. [s.l.] : Grada, 2008. 200 s. ISBN 978-80-247-2695-3.
- [68] ŠMARDA, Jan. Genetika pro gymnázia. Praha: Fortuna, 2003. 144 s. ISBN 80-7168-851-7
- [69] SERRA, J., Image Analysis and Mathematics Morphology. Academic Press, Inc. Orlando, FL, USA, 1983 ISBN 0126372403
- [70] LIKEŠ, J., MACHEK, J., *Matematická statistika*, SNTL Praha 1988, s. 165-169

SEZNAM ZKRATEK

OD – optický disk

PCA – principal component analysis - analýza hlavních komponent

ASM – active shape model

DR – diabetická retinopatie

NPDR – neproliferativní diabetická retinopatie

PDR – proliferativní diabetická retinopatie

GA – genetický algoritmus

SEZNAM PŘÍLOH

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Součástí práce je CD, které obsahuje tyto položky:

- Soubor popisující obsah CD
- Složka „Snímky sítnice a směrové mapy“
 - obsahuje originální snímky sítnice; směrové mapy odpovídající originálním snímkům; Skript *od_estimation.m*; Skript *skript.m*; Skript *skriptNacteni.m*; předvypočtená data pro jednotlivé snímky
- Složka „Zobrazení směrových map cévní struktury“
- Textová část diplomové práce (PDF)