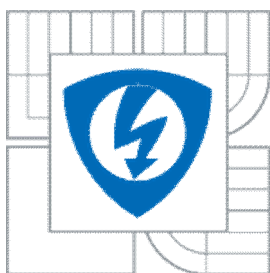




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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 OPTIC DISC FROM FUNDUS PHOTOGRAPHS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. BARBORA PĚCHOTOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ODSTRČILÍK

BRNO 2012



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: 2011/2012

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) Navrhněte 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: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Jan Odstrčilík

Konzultanti diplomové práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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 a je vybrána metoda pro další práci s obrazovými daty. Práce se podrobněji zabývá vybranou metodou detekce OD pomocí geometrického modelu s využitím segmentace cévního řečiště pomocí metody založené na přizpůsobené filtraci. Na originálních snímcích z dostupné databáze je otestována navržená semiautomatická metoda pro lokalizaci polohy optického disku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optický disk, oční pozadí, retinální snímky, cévní segmentace, geometrický model.

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 available methods that have been used for localization of optic disc. For further work is selected proposal of the geometrical model of vessel structure by using the method of segmentation of vessels by matched filtering. Original images are tested with semi-automatic method for optic disc localization.

KEYWORDS

Optic disc, eyeground, retinal images, vessel sementation, geometrical model.

PĚCHOTOVÁ, B. *Lokalizace optického disku na snímcích sítnice*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012. viii, 48 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 účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Úvod	9
1 Anatomie zrakového orgánu	10
1.1 Stavba oka	10
1.2 Nevus opticus - zrakový nerv	12
1.3 Oční pozadí.....	13
2 Vyšetření očního pozadí	14
2.1 Fundus kamera.....	14
3 Popis obrazových dat pro analýzu	17
3.1 Obecný popis snímku sítnice.....	17
3.2 Databáze obrazových dat	18
4 Metody lokalizace optického disku	20
4.1 Shlukování a PCA metoda	20
4.2 Analýza hlavních komponent a metody registrace objektů v obrázku	20
4.3 Detekce obrysů pomocí vpisování elips a vlnkové transformace.....	21
4.4 Sobelova metoda detekce hran a regrese metodou částečných nejmenších čtverců.....	21
4.5 Barevná morfologie	21
4.6 Optimalizace pomocí simulovaného žíhání	22
4.7 Hranová segmentace optického disku.....	22
4.7.1 Houghova transformace.....	22
4.7.2 Aktivní kontury.....	22
4.8 Metoda založená na texturní analýze	23
4.9 Aktivní topologické sítě (TAN).....	23
4.10 Fuzzy metody	24
4.11 Lokalizační algoritmus.....	24
5 Detekce optického disku pomocí geometrického modelu cévního řečiště	26
5.1 Geometrický model cévní struktury.....	26
5.2 Model identifikace parametrů.....	29
6 Metoda segmentace cévního řečiště pomocí přizpůsobené filtrace	30

7	NÁVRH APLIKACE pro detekci optického disku	34
7.1	Popis navrženého algoritmu	34
7.2	Realizace programu	36
8	Vyhodnocení metody a diskuze výsledků	42
8.1	Testování úspěšnosti metody.....	46
8.2	Diskuze výsledků.....	48
9	ZÁVĚR	49
	Literatura	51
	Seznam zkratk	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Schéma horizontálního řezu pravým okem.....	11
Obr. 1.2: Struktura sítnice.....	12
Obr. 1.3: Zrakový nerv.	12
Obr. 1.4: Schéma očního pozadí	13
Obr. 2.1: Principiální schéma fundus kamery.....	15
Obr. 3.1: Příklad snímku sítnice.....	18
Obr. 3.2: Příklad snímku sítnice z databáze.....	19
Obr. 4.1: Lokalizace OD pomocí aktivních kontur.....	23
Obr. 4.2: Lokalizační algoritmus	25
Obr. 5.1: Obrázek sítnice s cévním řečištěm a OD	27
Obr. 6.1: Příklad masky rotující v rozmezí 0° - 165° s krokem 15°	31
Obr. 6.2: Příklad parametrického obrazu obsahujícího maxima všech odpovědí filtru .	31
Obr. 6.3: Celkový výsledek cévní segmentace	32
Obr. 6.4: Barevné označení pixelů na základě detekce orientace cév.....	32
Obr. 6.5: Zdravý snímek z databáze a jeho zpracování.....	33
Obr. 7.1: Hlavní okno programu	36
Obr. 7.2: Parametry modelu.....	36
Obr. 7.3: Okno pro vypsání hodnot souřadnic OD a parametrů modelu.....	37
Obr. 7.4: Načtení dat	38
Obr. 7.5: Uživatelské rozhraní po načtení směrové mapy a fundus snímku	38
Obr. 7.6 a),b): Ukázka výběru souřadnic cév	39
Obr. 7.7: Označení vybraných bodů a spuštění výpočtu.....	40
Obr. 7.8: Výsledek výpočtu.	40
Obr. 7.9: Výsledné hodnoty.....	41
Obr. 7.10: Výsledky odhadu OD pro jednotlivé snímky a odpovídající binární masky .	46

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.

V této práci je popsáno několik metod, které již byly převážně úspěšně k lokalizaci OD použity. Podrobněji se zabývá metodou detekce pomocí parametrického modelu cévního řečiště, který předpokládá, že všechny cévy vycházejí z optického disku a sledují přibližně parabolický směr.

1 ANATOMIE ZRAKOVÉHO ORGÁNU

Oko je malý párový orgán, který má v průměru jen něco přes 20 mm. Přesto je velmi důležitý, neboť zrakem vnímáme 75 – 85 % okolí. Hlavní částí zrakového orgánu je oční koule, která slouží k vlastnímu vnímání obrazové informace. Správnou funkci oka zajišťují přídatné orgány. Oko je uloženo v kostní schránce – očníci, která zajišťuje mechanickou ochranu [1].

1.1 Stavba oka

Oko se skládá z následujících struktur (Obr. 1.1):

1. **Bělima** (*sclera*) je tvořena hustým kolagenním vazivem, který pozorujeme jako bílý obal oka. Její funkcí je udržovat tvar bulbu a poskytovat mu i mechanickou ochranu. V přední části přechází v průhlednou rohovku (*cornea*). Za rohovkou se nachází přední komora oka, která je vyplněna komorovou vodou.

2. **Cévnatka** (*choroidea*) tvoří vnitřní vrstvu oční koule. Je bohatě zásobena cévami. Její buňky obsahující pigment zabraňují rozptylu světla uvnitř oka. Vpředu přechází cévnatka v prstenec hladkých svalů a vaziva – řasnaté tělísko, které mění zakřivení čočky. Tento jev se nazývá akomodace oka a umožňuje přizpůsobení zraku dané vzdálenosti pozorované věci.

3. **Duhovka** (*iris*) je kruhový terčik 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.

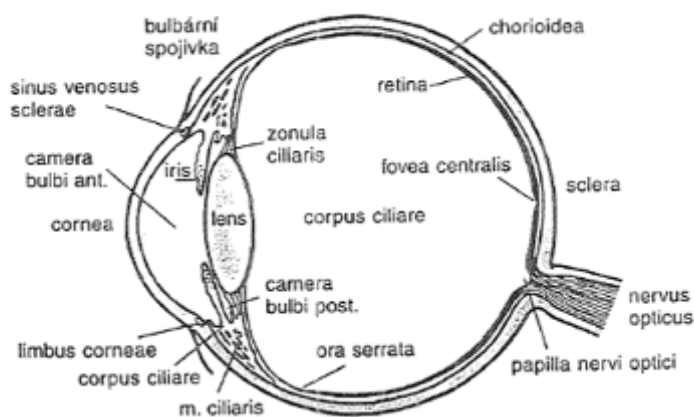
4. **Čočka** (*lens*) bikonvexního tvaru je zavěšena na vazivových vláknech, které vycházejí z řasnatého tělíska. Tvořena je rosolovitou, průhlednou hmotou s jemným vazivovým pouzdrem. Je součástí světlolomného systému oka.

5. **Sklivec** (*corpus vitreum*) vyplňuje prostor za čočkou. Jeho huspeninová konzistence je dána vysokým obsahem kyseliny hyaluronové. Od povrchu sítnice je oddělen bazální laminou. Udržuje nitrooční tlak oční koule [1], [2].

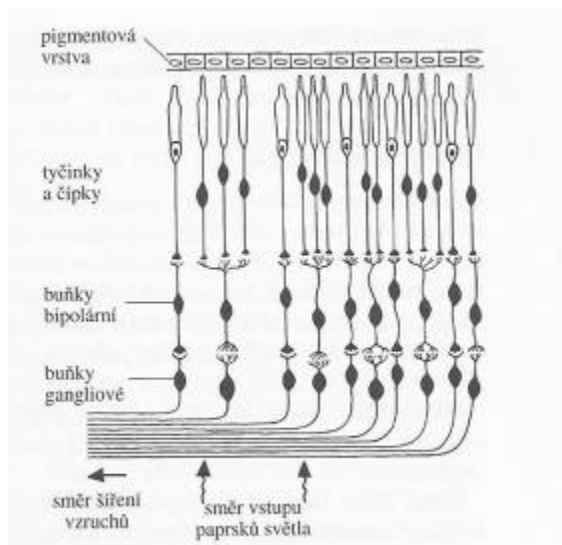
6. **Sítnice** (*retina*) je vnitřní vrstva oční koule (Obr. 1.2). Vznikala jako vychlípenina z diencephala, která se průběhem vývoje prohnula do tvaru očního pohárku, který je dvojrstevný, vnější vrstva funguje jako pigmentový epitel sítnice, vnitřní vrstva umožňuje vznik světločivným a nervovým složkám. Těla fotoreceptorů, stejně jako další vrstvy sítnice, s nimiž jsou tyto buňky v kontaktu, jsou uspořádány směrem k vnitřnímu prostředí oka vyplněného sklivcem [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 dva 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 buněk. 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 svého 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.

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 [1]. Obsahuje převážně čípky, které jsou, jak jsme již zmínili, citlivé na tři vlnové délky viditelného světla.



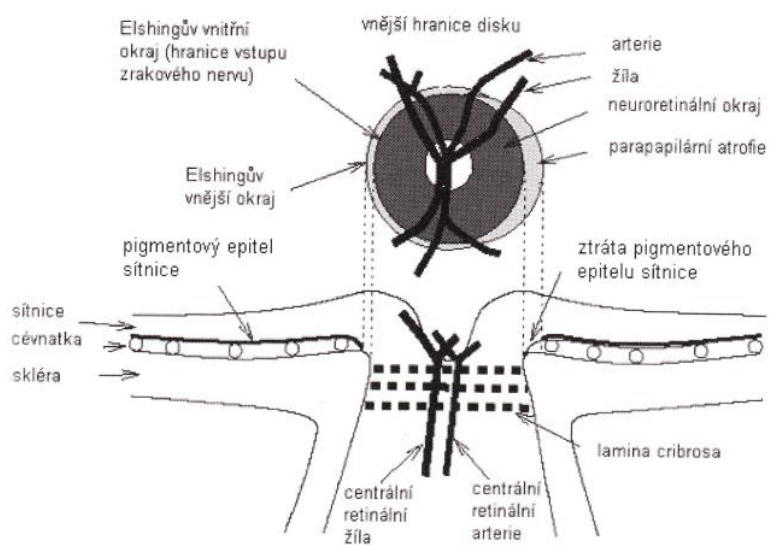
Obr. 1.1: Schéma horizontálního řezu pravým okem. (převzato z [1])



Obr. 1.2: Struktura sítnice. (převzato z [2])

1.2 Nevus opticus - zrakový nerv

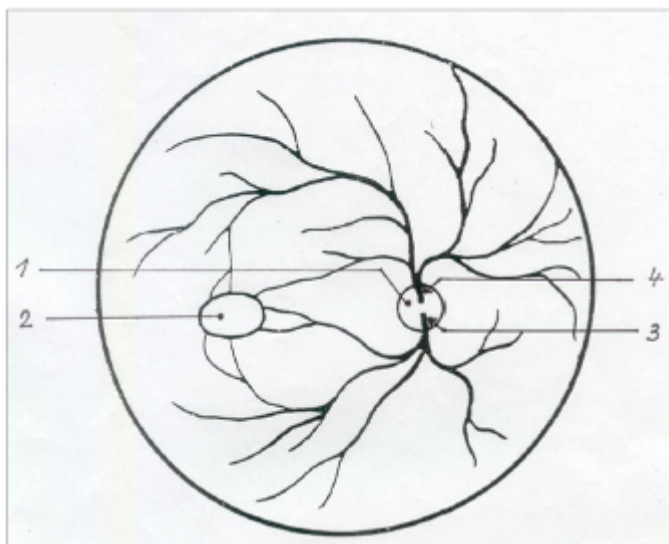
Axony gangliových buněk sítnice se na nitrooční ploše sbíhají k discus nervi optici, který leží na zadní stěně sítnice a odtud dále projdou stěnou očního bulbu a vytváří zrakový nerv. Zrakový nerv má na svém povrchu mozkové obaly, protože vývojově představuje výchlipku CNS (Centrální nervový systém) - diencephala. 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])

1.3 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. 1.4). 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. Na obrazu sítnice zabírá optický disk zhruba 1/7 plochy [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. 1.4: Schéma očního pozadí

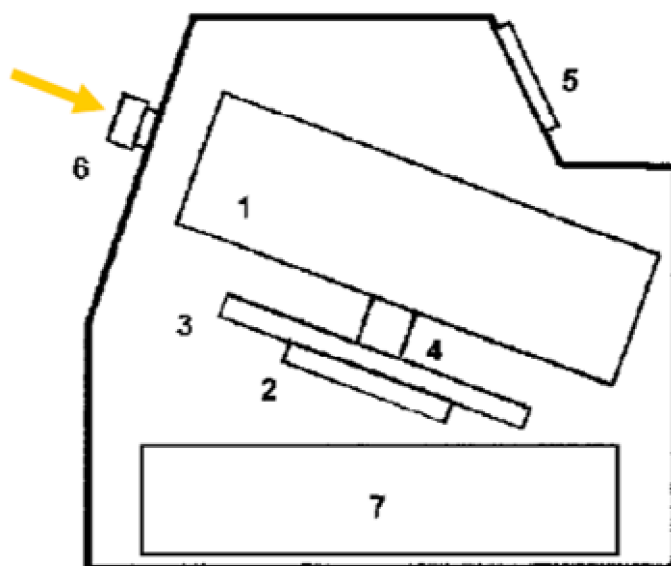
1 – discus nervi optici, 2 – macula, 3 – dolní větev a. centralis retinae, 4 - větev a. centralis retinae (převzato z [4])

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 Fundus kamera

V současné době se do popředí mezi vyšetřovacími metodami očního pozadí (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. 2.1) Je to retinální kamera, jejíž optický systém umožňuje korigovat i vysoké hodnoty ametropie (refrakční vada oka). Také obsahuje světelný zdroj bílého světla, kterým lze osvítit 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. 2.1: Principiální schéma fundus kamery

(1 – zobrazovací jednotka; 2,3,4 – poziční 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:

Tab.1.1: Technické specifikace digitální fundus kamery CANON CF-60 UVi	
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

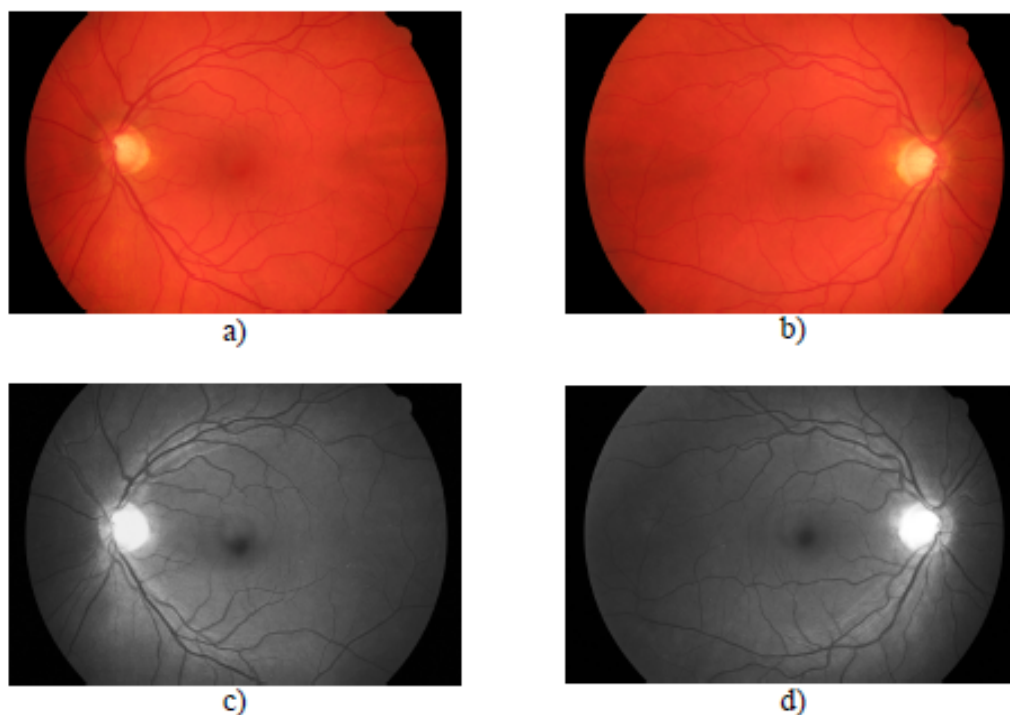
Zdroj: [36]

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 polorovině u pravého oka (Obr. 3.1 b,d) optický disk (u levého oka v levé polorovině, 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 a 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 z 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 žiháním, 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.)

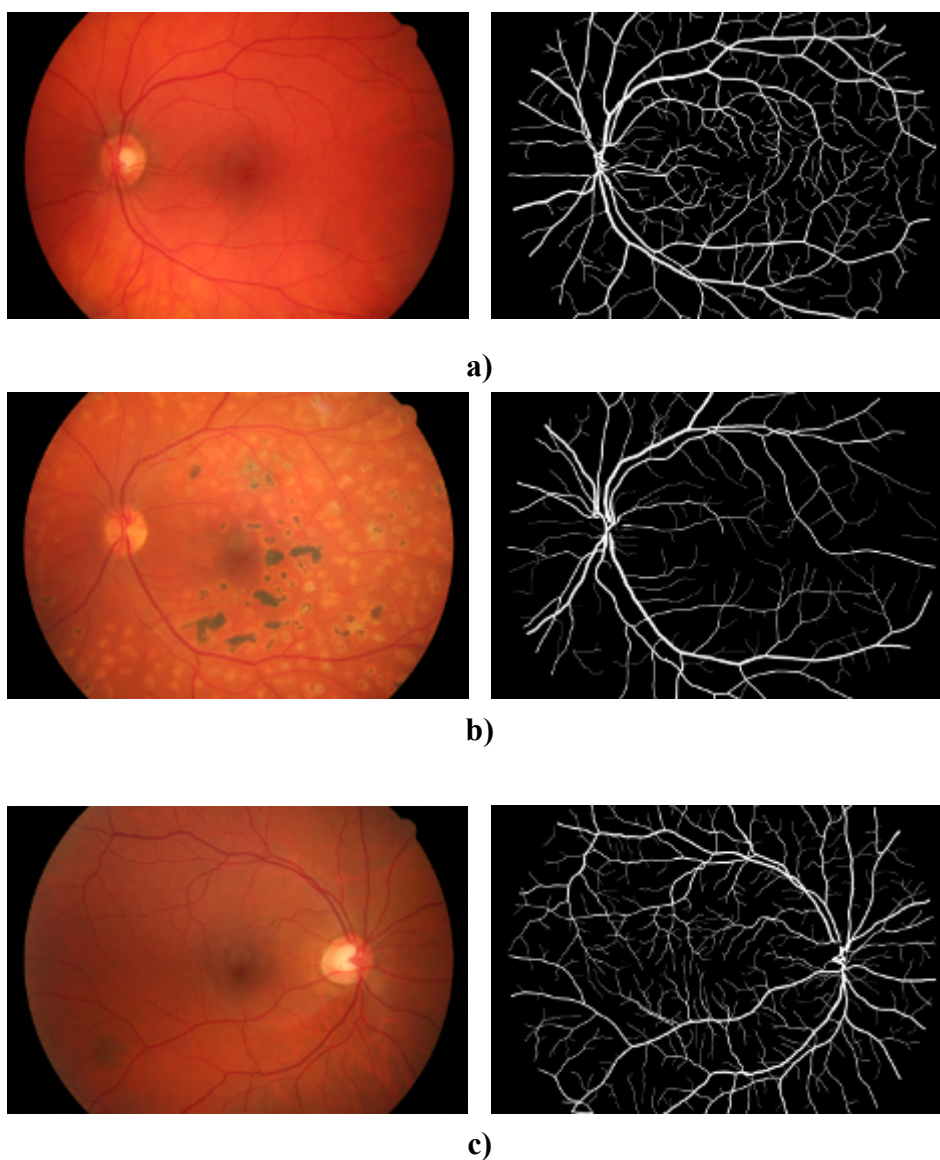
3.2 Databáze obrazových dat

Tato databáze byla vytvořena spoluprací dvou vědeckých institucí^{1,2} za účelem podpory srovnávací studie automatických segmentačních algoritmů pro obrazy sítnice. Databáze obsahuje tři soubory obrazů. Soubor zdravých obrazů se skládá z 15 snímků od zdravých pacientů bez jakéhokoliv patologického nálezu na sítnici. Druhý soubor obsahuje 15 obrazů sítnice pacientů s diabetickým onemocněním sítnice (diabetická retinopatie). Na snímcích z této skupiny mohou být vidět neovaskulární síť, krvácení, jasná poranění, skvrny po laserovém ošetření atd. Třetí skupina se sestává z 15 obrazů pacientů se zeleným očním zákalem v pokročilém stupni projevujícím se ztrátou

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

nervových gangliových buněk sítnice a jejich vláken. Druhá a třetí skupina je považována za testovací sadu, která umožní následné vyhodnocení segmentačních metod v případě patologických změn. 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 obrazu je 24 bitů na pixel (True Color) [24]. Na Obr. 3.2. vidíme příklad snímků sítnice ze všech tří výše zmíněných souborů obrazů z databáze zlatých standardů segmentace cév (databáze dostupná z [25]).



Obr. 3.2: Příklady snímků sítnice z databáze: a) "*h_10.jpg*" ze zdravé skupiny; b) "*d_3.jpg*" skupina diabetické retinopatie; c) "*g_17.jpg*" skupina zeleného zákalu

4 METODY LOKALIZACE OPTICKÉHO DISKU

Spolehlivá a účinná lokalizace optického disku je velmi důležitou součástí automatického vyšetření očního pozadí. Třídění 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. Tato kapitola se zabývá stručnou rešerší základních metod detekce OD.

4.1 Shlukování a PCA metoda

Intenzita OD je vyšší než okolní plocha sítnice. Jednou z běžných metod lokalizace je hledání největšího shluku pixelů s nejvyšší hodnotou jasu ve stupních šedi. Li a Chutatape v [19] navrhli metodu za účelem lepší identifikace 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].

4.2 Analýza hlavních komponent a metody registrace objektů v obrázku

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 activ shape modelu (ASM). Exudáty (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. Tento algoritmus může dosáhnout robustnějších výsledků zejména za přítomností velkých oblastí světlých lézí a zastření optického disku cévami.

4.3 Detekce obrysů pomocí vpisování elips a vlnkové 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, extrémní variace intenzity funkce v oblasti optického disku a rozdíly intenzity v blízkosti hranic optického disku představují hlavní překážku 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 a metody vpisování elips. V práci Pallawala et al. [45] se používá Daubechiesových vlnek pro přiblížení polohy OD. Abstraktní reprezentace OD je získána pomocí šablony založené na intenzitě. Metoda vykazuje dobré výsledky v případě nehomogenní intenzity OD. Vpisování elips se pak využívá k detekci obrysu OD. Dodatečné vlnkové zpracování se provádí na složitějších případech ke zlepšení míry detekce kontur.

4.4 Sobelova metoda detekce hran a regrese metodou částečných nejmenších čtverců

Optický disk může být vidět jako vybledlý, dobře definovatelný kruh nebo vertikálně mírně oválný disk. Detekce se provádí nejprve díky výběru kandidátů na oblast 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.

4.5 Barevná morfologie

Osareh et al. v [21] rozvinuli metodu použití jednoduchého porovnávání maskou k odhadu centra OD. Sinthanayothin et al. [14] lokalizovali optický disk pomocí identifikace oblasti s nejvyšší změnou intenzity sousedních pixelů. Po lokálním zesílení kontrastu byla maximální hodnota středního rozptylu obrazu vybraná jako střed OD.

4.6 Optimalizace pomocí simulovaného žihání

Metoda využívající simulované žihání je založena na předběžném určení hlavního směru retinálních cév. Následně je aplikován parametrický model ke zjištění polohy OD [22]. Metoda založena na parametrickém modelu je podrobněji popsána v kapitole 5.

4.7 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.

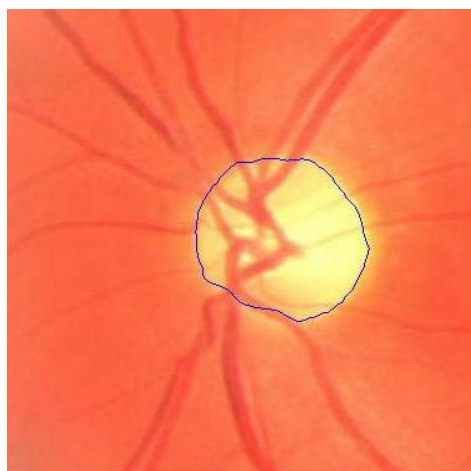
4.7.1 Houghova transformace

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 nepravidlostem 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 diskretním 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].

4.7.2 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. 4.1 je vidět křivka ohraničující OD, nalezená pomocí algoritmu aktivních kontur.



Obr. 4.1: Lokalizace OD pomocí aktivních kontur (převzato z [29])

4.8 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. Eliminováno se riziko nesprávného určení polohy OD. Lokalizace OD bylo také dosaženo iterační metodou prahování pro identifikaci první sady kandidátských regionů a následnou analýzou spojených komponent [48].

4.9 Aktivní topologické sítě (TAN)

Lalonde et al. [20] lokalizoval optický disk použitím porovnávání maskou, založeném na Hausdorffově vzdálenosti a použitím pyramidové dekompozice. Metoda 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: lokalizace optického disku, nelineární filtrace, Cannyho hranového detektoru a Houghovy transformace. Pro redukci šumu byla použita nelineární filtrace jako metoda, která zároveň zachovala hrany. Vzhledem k tomu, že OD je kruhová struktura, autoři použili Houghovu transformaci pro detekci kruhu. Houghova transformace jim dala střed a poloměr kruhové aproximace hranic OD. 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.

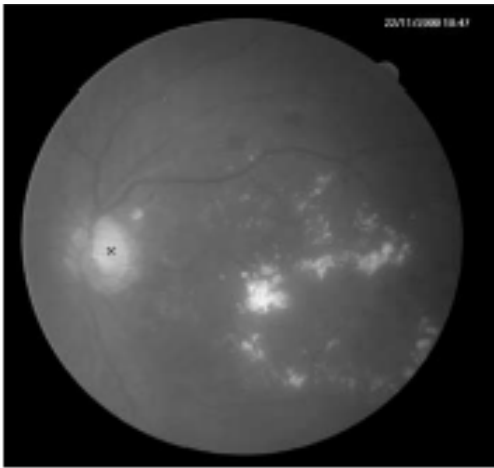
4.10 Fuzzy metody

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. Jejich metoda úspěšně detekovala OD v 89 % nemocných a ve 100 % zdravých případech. Tímto způsobem je možné OD objevit dokonce v přítomnosti bodů daleko jasnějších než je OD samotný.

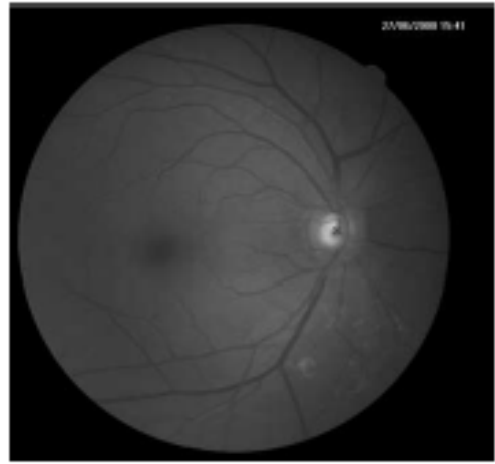
4.11 Lokalizační algoritmus

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. OD se skládá z přibližně kruhové hrany vysoké intenzity s centrálně lokalizovanou skupinou krevních cév; další části disku (včetně vnitřku) nejsou pro nás podstatné. Maska se skládá z Laplaceova Gaussianu s vertikálním kanálem ve středu, který odpovídá hlavní skupině cévek.

Velikost zrakového nervu se významně mění. To by mohlo být důvodem pro návrh filtru v různých stupních. Ve skutečnosti stačí jeden filtr, kde velikost rozdílu maximální korelace leží na prstenci kolem středu zrakového nervu; vrchol je proto ještě pořád lokalizovaný uvnitř očního nervu, což stačí pro naše požadavky. Algoritmus obvykle nalézá střed uvnitř 15 pixelů, což je přijatelné jako východisko pro segmentaci hran. Centrální bod je uvnitř OD. Obr. 4.2 ukazuje příklady výsledků. Tento jednoduchý přístup přináší vynikající výsledky a je robustní; jeho úspěch leží v pečlivém návrhu filtru [12].



(a)



(b)

Obr. 4.2: Lokalizační algoritmus. a) Gross exudation; b) Strong Pallor (převzato z [12])

5 DETEKCE OPTICKÉHO DISKU POMOCÍ GEOMETRICKÉHO MODELU CÉVNÍHO ŘEČIŠTĚ

Optický disk (OD) se na snímcích fundu obvykle jeví jako kulatá oblast, jasnější než okolí (Obr. 5.1). Z něj vycházejí centrální cévy a tepny a pokrývají spolu s dalším větvením většinu z povrchu sítnice.

Metoda detekce OD uvedená v práci [22], ze které jsme vycházeli, 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 navrhnoutý geometrický parametrický model [22], kde dva z parametrů modelu jsou souřadnicemi z centra OD. Naší snahou je vytvořit model geometrických směrů retinálního cévního systému, který implicitně vloží informaci o pozici OD jako bod konvergence všech cév. Nicméně, výsledná metoda není založena pouze na odhalení oblasti konvergence cév, ale spíše na nalezení vhodného modelu s ohledem na kompletní cévní strukturu.

5.1 Geometrický model cévní struktury

Definice směrového modelu pro retinální cévy vyžaduje vymezení funkce na celém obraze [22]:

$$\theta^{\text{mod}}(x, y; p) \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta^{\text{mod}} \leq \frac{\pi}{2}$$

který reprezentuje hlavní směr cévního řečiště v bodě (x,y). Vektor p je soubor parametrů definujících model a jeho umístění, a to zahrnuje i souřadnice optického disku. Na Obr 5.1 vidíme běžný směr cév v obraze: hlavní cévy vychází z OD a následují specifický kurs, který může být geometricky určen jako dvě paraboly, s vrcholem uvnitř OD [22]. Model tedy může být založený na tomto předpokladu.



Obr. 5.1: Obrázek sítnice s cévním řečištěm a OD (převzato z [22]).

Jestliže použijeme kartézský souřadnicový systém, mohou být tyto paraboly popsány jako geometrický lokus Γ [22]:

$$\Gamma = \{(x, y) : ay^2 = |x|\} \quad (1)$$

kde a je parametr řídící aperturu parabol (kvůli zjednodušení prozatím řekněme, že začátek souřadnicového systému je vrchol parabol).

Pro všeobecný bod (x, y) patřící lokusu Γ na parabole, je model vyjádřený implicitní rovnicí [22]:

$$\tan \theta^{\text{mod}}((x, y; p)) = \text{sgn}(x) \text{sgn}(y) \frac{1}{2a \sqrt{\frac{|x|}{a}}} \quad \begin{array}{l} (x, y) \in \Gamma \\ x \neq 0 \end{array} \quad (2)$$

kde funkce $\text{sgn}(\)$ vrací znaménko argumentu a vektor \mathbf{p} je parametr. Výše uvedený vztah vychází z toho, že na parabolách hlavního směru cév je tečna. Za účelem kompletní definice modelu je nezbytné vyjádřit hlavní směr také vně parabol. Implicitně se dělí každý kvadrant na dvě oblasti: vnitřní oblast (s ohledem na konvexnost paraboly) a vnější oblast. Anatomická znalost signalizuje, že se cévy rozdvíhají při výstupu z optického disku. Cévy uvnitř paraboly se rychle ohýbají směrem k macule ve spánkové oblasti (levá strana na obr 4.4.), zatímco v nazální oblasti tento vnitřní sklon nastane mnohem méně (pravá strana na obr 4.4.).

Tangentová rovnice tak byla rozšířena pro body vně Γ přidáním korekce času d [22]:

$$d(x, y; p) = \frac{y = \operatorname{sgn}\left(y\sqrt{\frac{|x|}{a}}\right)}{c(x)} \quad (3)$$

$$c(x; p) = \frac{c_1}{1 + e^{-x}} + \frac{c_2}{1 + e^x} \quad c_1 > 0; c_2 < 0 \quad (4)$$

Čítec (3) je nula pro bod Γ náležící, zatímco pro bod vně Γ se jeho absolutní hodnota zvyšuje úměrně k vertikální vzdálenosti mezi bodem a Γ . Tento přírůstek je vyjádřen výrazem (4), který vyjádří poměr divergence směru v dané x souřadnici. Pro zvýšení $|x|$ se tento poměr přiklání k hodnotě parametru $c_1(c_2)$ pro kladné (záporné) hodnoty x . Nicméně hodnoty c_1 a c_2 reprezentují limitní poměr konvergence k $\pi/2$ (svislému směru) směru cév pro kladné a záporné hodnoty x . Tyto dva poměry určují stupeň zakřivení cév v nazální a spánkové straně sítnice: nižší udává absolutní hodnotu konstanty, vyšší určuje zakřivení cév vycházejících z OD.

Vzhledem k použití obecného systému kartézských souřadnic, byla použita transformace (translace), aby byly paraboly zaměřeny na souřadnice středu OD(x_{OD} , y_{OD}) [22].

$$\begin{aligned} x^* &= x - x_{OD} \\ y^* &= y - y_{OD} \end{aligned} \quad (5)$$

Kompletní model pro cévní směr θ^{mod} v bodě (x, y) v obrazu je dán následující rovnicí [22]:

$$\theta^{\text{mod}}(x, y; p) = \arctan \left\{ \frac{\operatorname{sgn}(x - x_{OD}) \operatorname{sgn}(y - y_{OD})}{2a \sqrt{\frac{|x - x_{OD}|}{a}}} + \frac{(y - y_{OD}) - \operatorname{sgn}(y - y_{OD}) \sqrt{\frac{|x - x_{OD}|}{a}}}{\frac{c_1}{1 + e^{-(x - x_{OD})}} + \frac{c_2}{1 + e^{(x - x_{OD})}}} \right\} \quad (6)$$

5.2 Model identifikace parametrů

Použitím vhodných technik identifikace parametrů modelu lze pro jakýkoliv obrázek (daný souborem dat) určit optimální hodnotu pro p , a tedy pro x_{OD} , y_{OD} . Data jsou směry cév θ_i naměřené v bodech (x_i, y_i) , $i=1, \dots, N$ [22].

Pro extrakci cévního řečiště z obrázků fundu bylo navrženo mnoho algoritmů (viz např. [37] - [39]). Získaná cévní síť může být tedy reprezentována souborem čtveřic $(x_i, y_i, c_i, \theta_i)$, jejichž prvky reprezentují souřadnice ve středu cév (x_i, y_i) , průměr cév c_i a směr cév θ_i v daném bodě.

Parametry modelu jsou identifikovány ze souboru dat, představujících směr cév na souboru obrazových bodů, pomocí minimalizace funkce nejmenších čtverců [22].

$$RSS = \sum_i w_i [\theta(x_i, y_i) - \theta^{\text{mod}}(x_i, y_i; p)]^2 \quad (7)$$

Veličiny w_i jsou váhy, používané k modulaci šířky cév. Pro náš vlastní výpočet nejsou později váhy brány v úvahu, protože neznáme informaci o šířce cév ve směrové mapě. Optimalizované hodnoty parametrů (x_{OD}, y_{OD}) představují nejlepší umístění OD v závislosti na tom, jak model pasuje na dostupná data $(x_i, y_i, c_i, \theta_i)$. Minimalizaci funkce nejmenších čtverců pomocí gradientu je riziková v tom, že může dosahovat mnoha lokálních minim [22].

Absolutní minimum je správně určeno ve chvíli, kdy x_{OD} , y_{OD} jsou uvnitř OD. Gradientní algoritmus může být ale také snadno zachycen v jednom z mnoha lokálních minim. Řešením tohoto problému mohlo být stanovení optimalizačního algoritmu simulovaného žhání (simulated annealing – SA). SA je globální stochastický optimalizační algoritmus, který teoreticky zaručuje konvergenci směrem ke globálnímu minimu [40].

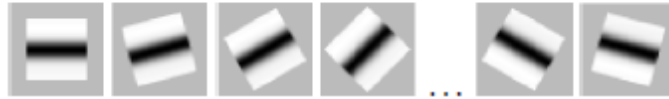
6 METODA SEGMENTACE CÉVNÍHO ŘEČIŠTĚ POMOCÍ PŘIZPŮSOBENÉ FILTRACE

Navrhovaná metoda geometrického modelu je založena právě na modelu cévní struktury, ale nezávislá na aktuální viditelnosti (nebo dokonce přítomnosti) OD. 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

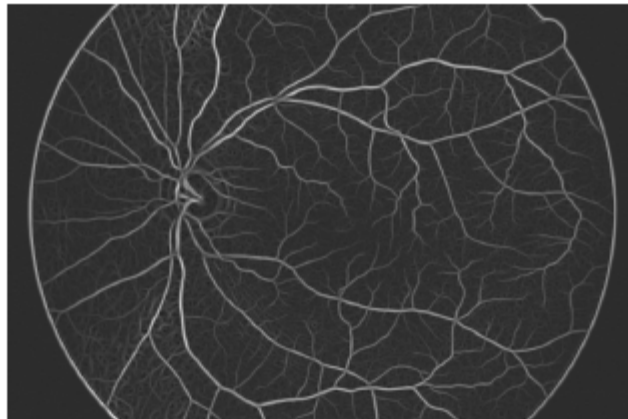
Přizpůsobený 2D filtr je založený na lokální korelaci mezi danými oblastmi, které mohou potenciálně obsahovat části cév, a filtrujícími maskami reprezentujícími typické části cév různých šířek a orientace. Masky jsou vytvořeny měřením kolmého jasu profilu cév (G vrstva RGB obrazů). Tvary jsou poté rozmazány (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° - 165° , s krokem 15°). (Obr 6.1). 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].



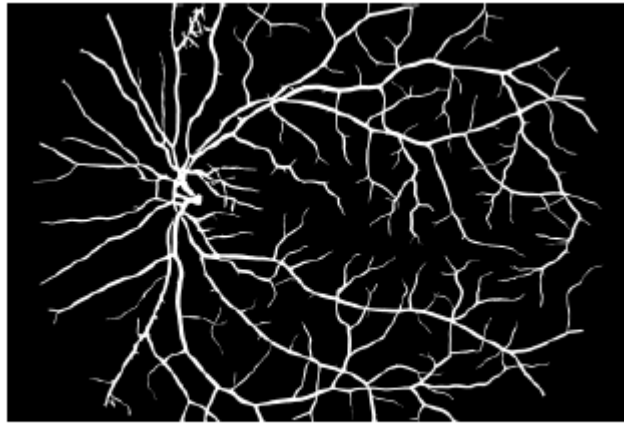
Obr. 6.1: Příklady masky rotující v rozmezí 0° - 165° s krokem 15° (převzato z [23]).

Spojení parametrických obrazů a následné zpracování

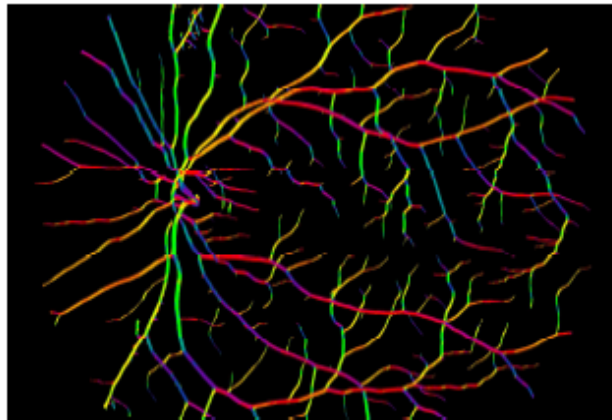
Parametrické obrazy získané filtrací jsou poté spojeny tak, že je vybrána maximální lokální odezva pro každý pixel. Výsledný obraz tak obsahuje informaci o existenci cévní sítě (Obr. 6.2.). Tento obraz může být ihned prahován, čímž získáme binární reprezentaci cévního řečiště. Krátké části cév (obvykle 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. 6.3. Binární obraz však neposkytuje informaci o šířce a orientaci částí cévního řečiště. Tato informace je vidět při použití spektrální stupnice barev (obr. 6.4): 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. 6.2: Příklad parametrického obrazu obsahujícího maxima všech odpovědí filtru (převzato z [23]).

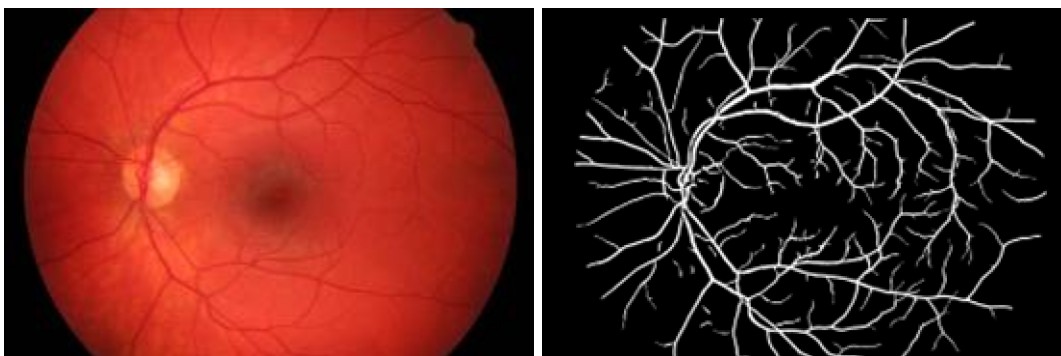


Obr. 6.3: Celkový výsledek cévní segmentace (převzato z [23]).



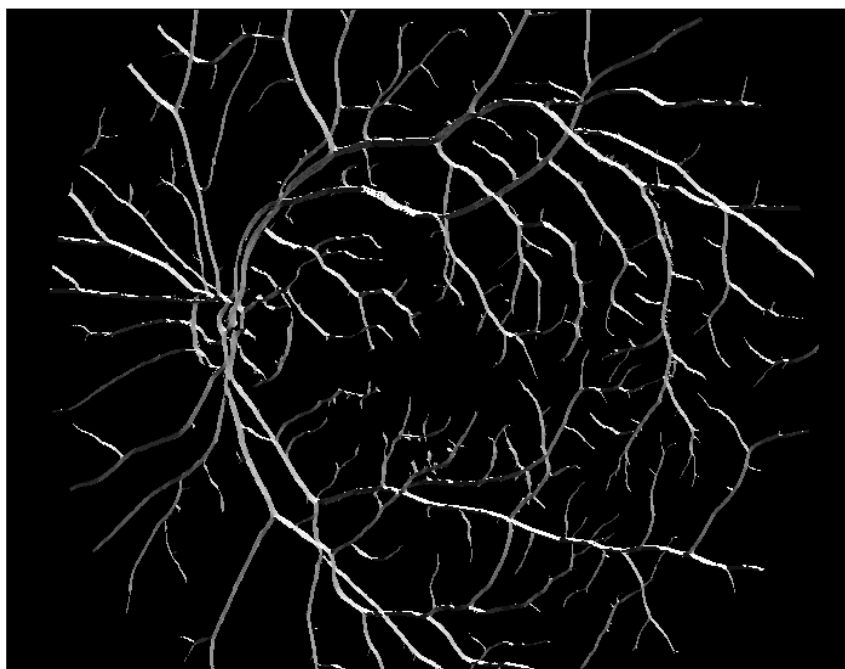
Obr. 6.4: Barevné označení pixelů na základě detekce orientace cév, spektrální škála 0° - 165° (fialová) (převzato z [23]).

Na následujících snímcích (Obr. 6.5) z databáze (kap. 3.2.) vidíme ukázky zdravých snímků společně s vysegmentovanými cévami a směrovou mapou cévního řečiště.



a)

b)



c)

Obr. 6.5: Zdravý snímek z databáze a jeho zpracování: a) retinální snímek zdravého oka; b) cévní segmentace; c) směrová mapa cévního řečiště

7 NÁVRH APLIKACE PRO DETEKCI OPTICKÉHO DISKU

7.1 Popis navrženého algoritmu

Dle teorie popsané v kapitole 5 byl navržen parabolický model trajektorie cévních struktur, díky němuž lze detekovat pozici optického disku na snímcích sítnice. K návrhu detektoru pozice OD bylo využito programové prostředí MATLAB R2009.

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 odezev jednotlivých filtrů byla vytvořena směrová mapa cévního řečiště [23]. K získání hodnot ve stupních byly získané hodnoty pro cévy vynásobeny 15 a následně bylo také nutné převést hodnoty ze stupňů na radiány. Z důvodu urychlení výpočtů byla načtená data podvzorkována s faktorem 5.

Implementace modelu a optimalizace vstupních hodnot pro nalezení pozice OD a definice parametru modelu

Do navrženého programového vybavení byl implementován model cévních směrů (popsaný v kap. 5). Vstupem tohoto modelu jsou souřadnice popisující pozici bodů náležejících dané cévě a potenciální souřadnice polohy OD. Dále také konstanta definující aperturu paraboly (a) a její zakřivení (c_1 a c_2). Vstupními daty pro nalezení optimální polohy OD jsou směrové mapy, které jsme měli k dispozici díky metodě popsané v kap. 6.

Optický disk je v optimálním případě na všech snímcích vertikálně i horizontálně přibližně na stejném místě. Rozlišujeme však rozdílné umístění na snímku u pravého a levého oka. Uživatel tedy musí po načtení snímku vybrat, zda je snímek z pravého či levého oka. Díky tomuto předpokladu je možné snížit dobu výpočtu, a to tak, že OD bude hledán v okolí očekávaného výskytu OD. Okolí vyhledávání je omezeno na okno 61×61 pixelů, které bylo experimentálně navrženo jako optimální. Následně je ručně vybráno 20 bodů z nejsilnějších cév v obraze. Každá hodnota daného vybraného bodu je průměrována s jedním nejbližším pixelem z okolí ve všech čtyřech směrech a zaokrouhlena. V případě, že je vybrán bod neobsahující informaci o cévním směru, je tato hodnota odstraněna.

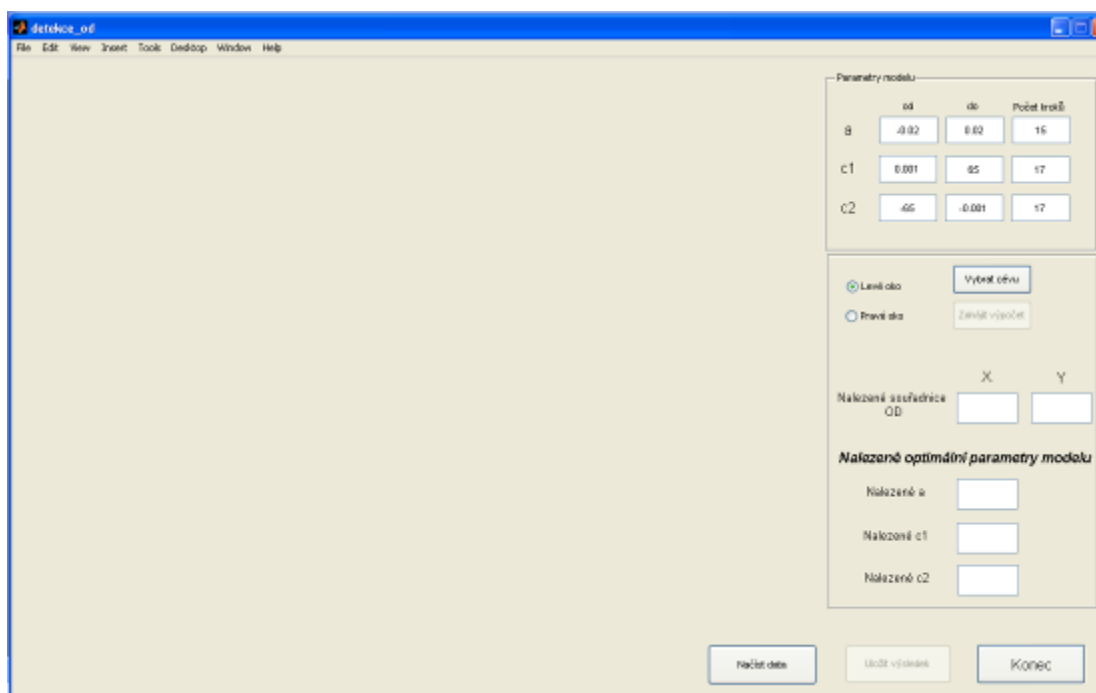
Takto vytvořený model je společně s informací o cévních směrech vložen do minimalizační funkce RSS (7). Následně jsou krokovány všechny parametry modelu a jednotlivé výsledné hodnoty jsou zaznamenávány. V průběhu jednotlivých kroků jsou uložené hodnoty porovnávány. Pokud je aktuální hodnota funkce RSS nižší než původní, tak je zapsána do matice výsledků namísto hodnoty z předchozího kroku. Současně jsou v jednotlivých krocích do pomocných matic ukládány příslušné hodnoty parametrů a , c_1 a c_2 . Po ukončení krokování všech parametrů je z matice výsledků vybráno minimum, reprezentující minimum funkce RSS. Tomuto minimu jsou následně přiřazeny souřadnice reprezentující pozici OD. Krokování parametrů probíhá v rozsahu, jež je definován uživatelem. Počáteční hodnoty byly experimentálně zjištěny na základě testování s využitím dostupných obrazových dat. Jedná se o počáteční hodnoty pro parametry a , c_1 , c_2 , ale taky souřadnice $x(OD)$ a $y(OD)$. Parametr a (značí aperturu parabol) je lineárně rozložen v 15 bodech mezi hodnotami -0.021 a 0.02. Parametr c_1 je lineárně rozložen v 17 bodech mezi hodnotami 0.001 a 65. Parametr c_2 je lineárně rozložen v 17 bodech mezi -65 a -0.001. Tyto parametry c_1 , c_2 nám určují, jak se parabola stáčí ke středu obrazu. Tyto hodnoty včetně rozsahu může samozřejmě uživatel změnit, je však nutné si uvědomit, že v závislosti na počtu kroku se mění i doba optimalizace. Do výpočtu nejsou zahrnuty váhy.

Pro jednotlivé body X_{od} , Y_{od} je počítán rozdíl mezi ručně definovanými pozicemi cév a hodnotami modelu.

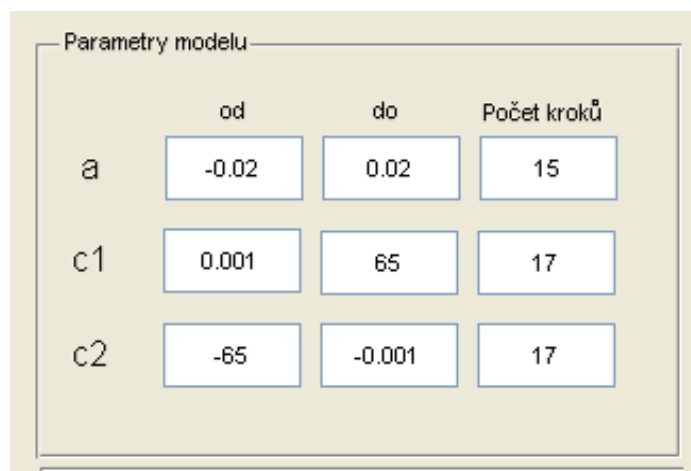
7.2 Realizace programu

Popis uživatelského prostředí

Po spuštění programu se objeví okno programu (Obr. 7.1), které obsahuje několik panelů umístěných v pravé části uživatelského rozhraní. V okně „Parametry modelu“ jsou přednastaveny nejvhodnější hodnoty parametrů a , c_1 a c_2 (Obr. 7.2)



Obr. 7.1: Hlavní okno programu



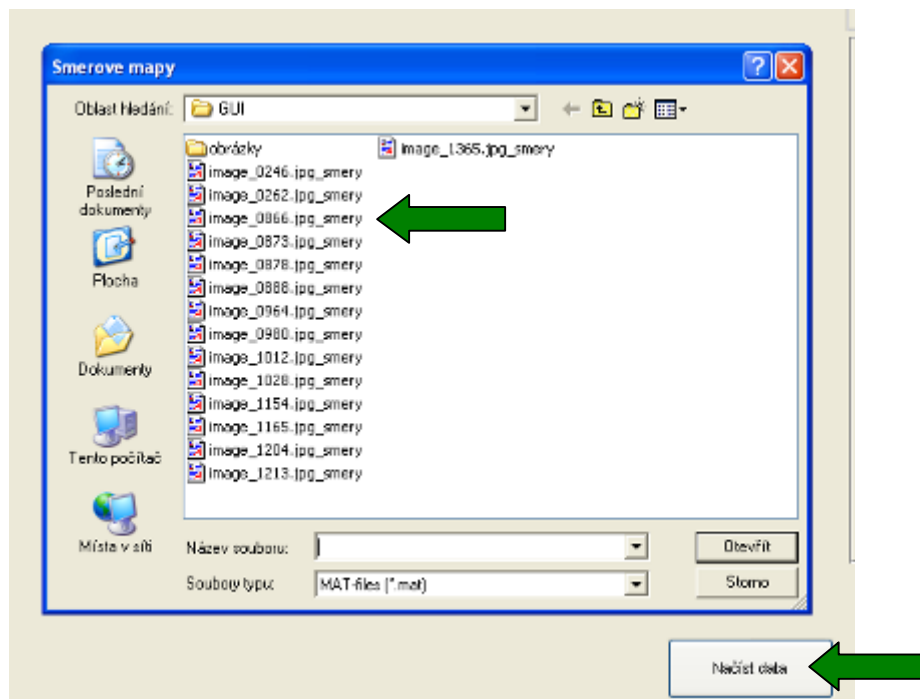
Obr. 7.2: Parametry modelu

V druhém okně je vytvořena možnost výběru Levé/Pravé oko. Po načtení snímku vybereme odpovídající možnost. V tomto okně jsou po výpočtu zobrazeny nalezené souřadnice OD. Jsou zde taktéž vypsány optimální parametry modelu (Obr. 7.3). Ve spodní části obrazovky se nacházejí tři tlačítka, pro načtení dat, uložení výsledků (aktivní až po vytvoření výpočtu) a ukončení programu.

The screenshot shows a software window with a light beige background. At the top left, there are two radio buttons: 'Levé oko' (selected) and 'Pravé oko'. To the right of these are two buttons: 'Vybrat cévu' and 'Zahájit výpočet'. Below this, there are two input fields labeled 'X' and 'Y' under the heading 'Nalezené souřadnice OD'. Underneath, there is a section titled 'Nalezené optimální parametry modelu' with three input fields labeled 'Nalezené a', 'Nalezené c1', and 'Nalezené c2'. At the bottom of the window, there are three buttons: 'Načíst data', 'Uložit výsledek', and 'Konec'.

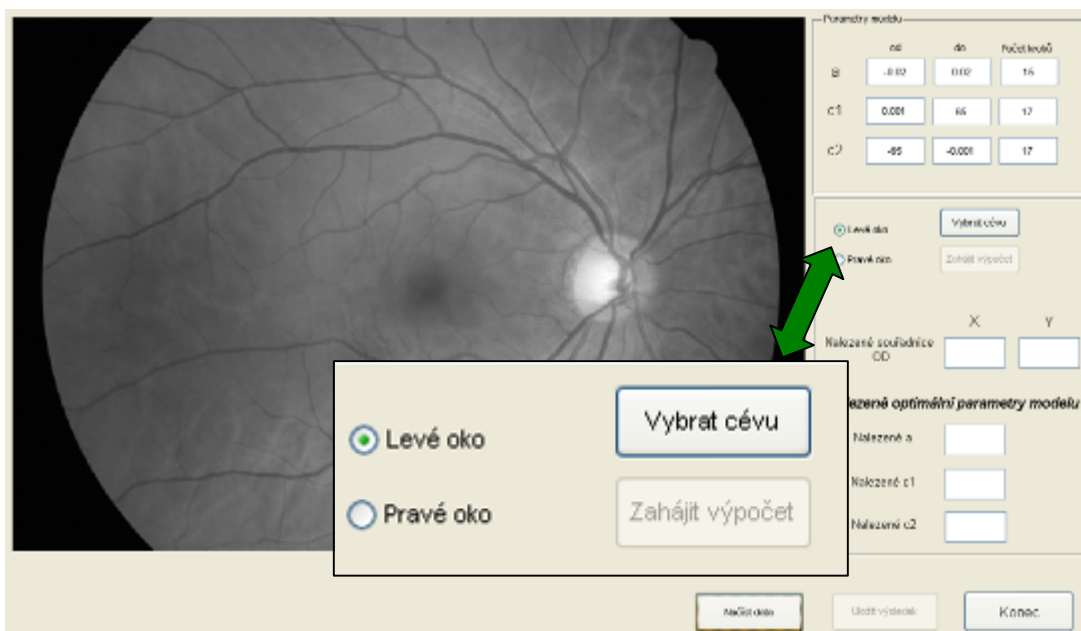
Obr. 7.3: Okno pro vypsání hodnot souřadnic OD a parametrů modelu.

Pomocí tlačítka „Načíst data“ (Obr. 7.4) uživatel vybere dostupnou směrovou mapu, spolu s mapou se načte i fundus snímek sítnice (Obr. 7.5).



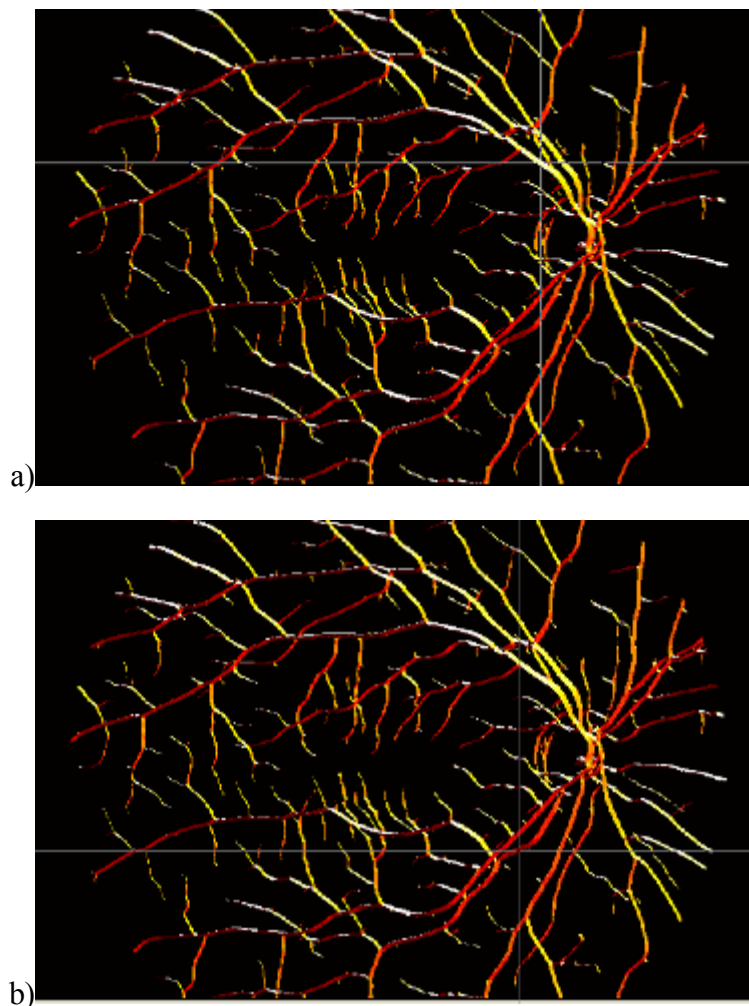
Obr. 7.4: Načtení dat

Vzhledem k předpokladu, že pro pravé oko by se měl optický disk nacházet v pravé polovině obrázku, vertikálně i horizontálně vždy přibližně na stejném místě, což platí i pro levé oko a OD v levé polovině, vybereme jednu z nabízených možností (Obr. 7.5). Následně tlačítkem vybrat cévu (Obr. 7.5), vybereme vhodné body náležící cévní síti.



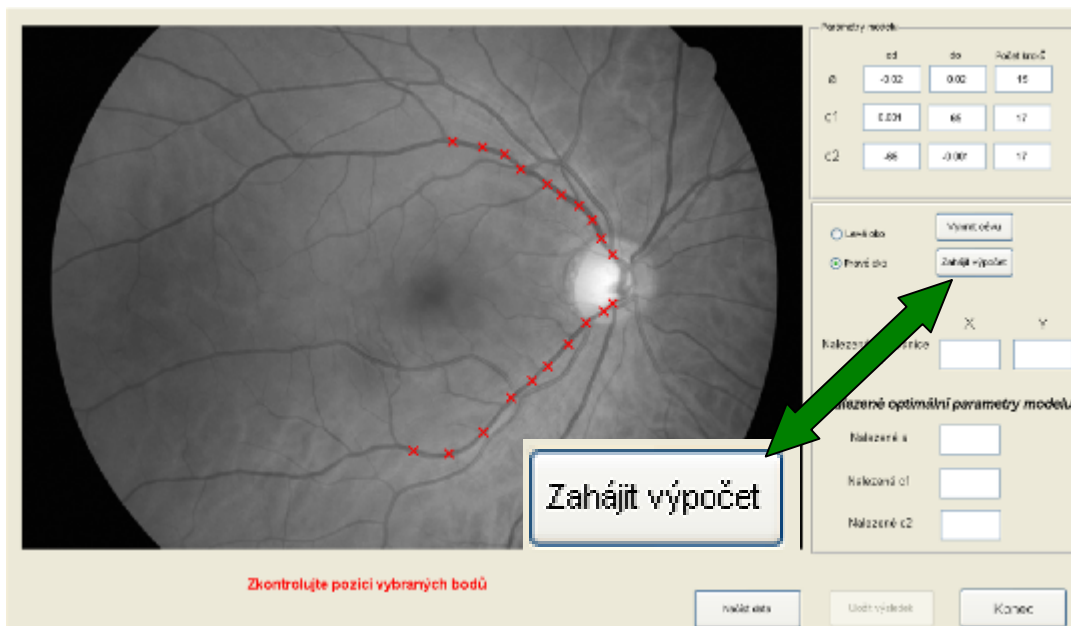
Obr. 7.5: Uživatelské rozhraní po načtení směrové mapy a fundus snímku

Stisknutím tlačítka Vybrat cévu (Obr. 7.5) se v aplikaci načte mapa cévního řečiště. Následně je ručně vybráno 20 bodů náležejících dvěma nejširším cévám (jedna v horní a jedna v dolní polovině obrázku), vycházejícím z OD. Tento výběr je individuální, avšak měli bychom vycházet z předpokladu parabolického průběhu cév. Příklady výběru jsou uvedeny na Obr. 7.6 a),b)



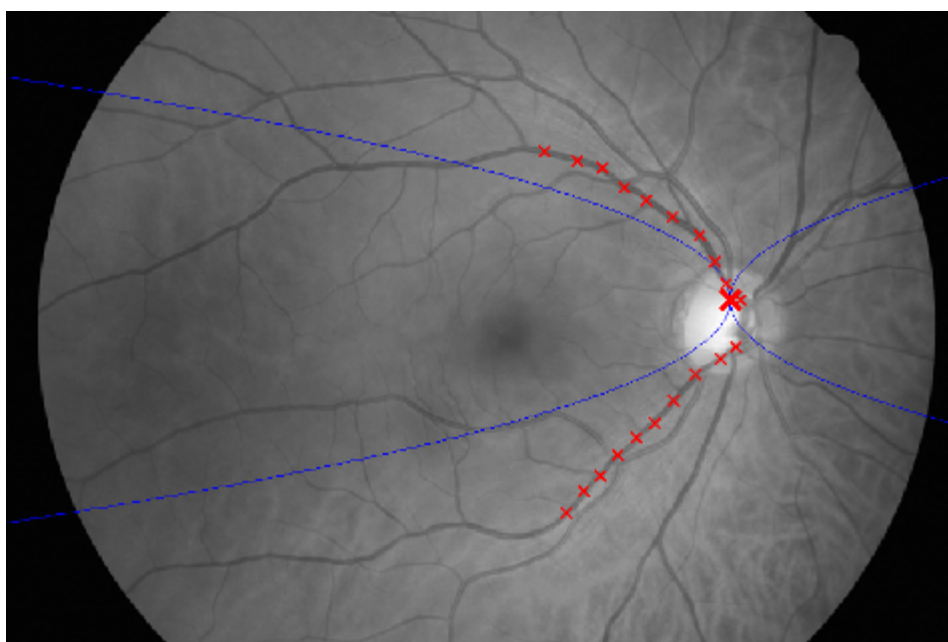
Obr. 7.6 a),b): Ukázka výběru souřadnic cév

Nyní je možné vizuálně zhodnotit, zda navolené body odpovídají přibližně tvaru parabol (Obr. 7.7). Poté můžeme přikročit ke spuštění vlastního výpočtu.



Obr.7. 7: Označení vybraných bodů a spuštění výpočtu

Na Obr. 7.8 vidíme výsledek výpočtu jako červený křížek pro bod náležející vypočítané lokalizaci OD. V obrázku je také vykreslen model parabol.



Obr. 7.8: Výsledek výpočtu.

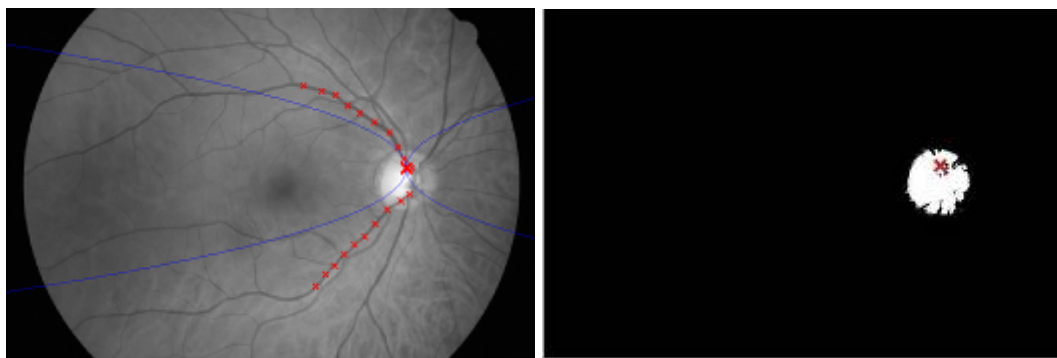
Spolu s grafickým znázorněním jsou ve výsledku v okně vypsány všechny dopočítané souřadnice OD a optimální parametry modelu (Obr. 7.9). Doba trvání výpočtu byla průměrně 130s.

	X	Y
Nalezené souřadnice OD	530	204.8276
<i>Nalezené optimální parametry modelu</i>		
Nalezené a	-0.02	
Nalezené c1	4.0634	
Nalezené c2	-0.001	

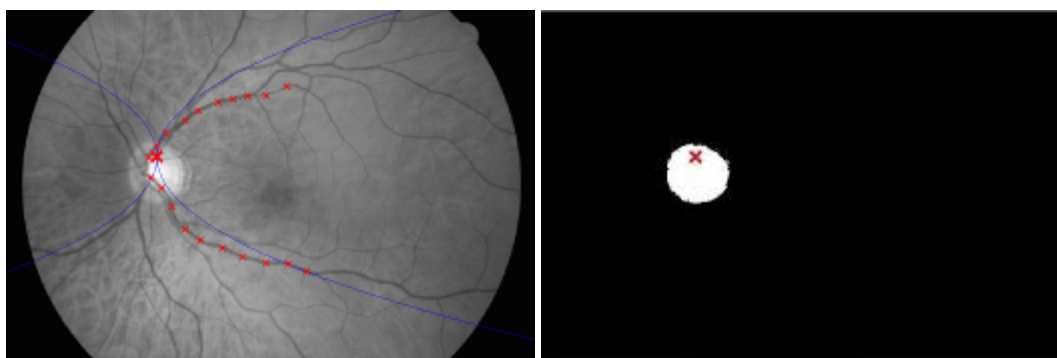
Obr. 7.9: Výsledné hodnoty

8 VYHODNOCENÍ METODY A DISKUZE VÝSLEDKŮ

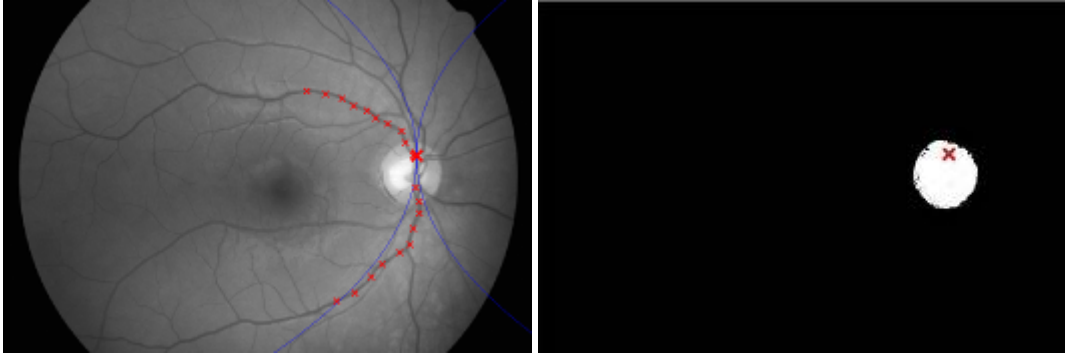
Na následujících snímcích (Obr. 7.10) jsou výsledky testované semiautomatické metody pro detekci OD na základě znalostí cévní mapy. Testováno bylo 15 snímků z databáze uvedené v kapitole 3.2. Podle typu snímku (zda je snímek pro pravé/levé oko) je vytvořen automatický prvotní odhad OD. Následně je na uživateli, aby z mapy cévních směrů vybral hlavní nejsilnější cévy a na základě vybraných bodů je vypočítána přibližná poloha OD. 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. 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 obrázcích vidíme, že metoda správně určila polohu OD na základě směrových informací cév ve 13 případech z 15. Na obrázku 7.10 f) image_0888.jpg a 7.10 o) image_1365.jpg vidíme, že poloha OD byla automaticky detekována mimo fyzické umístění OD. Tomu odpovídá i binární mapa, na které není detekce zaznamenána.



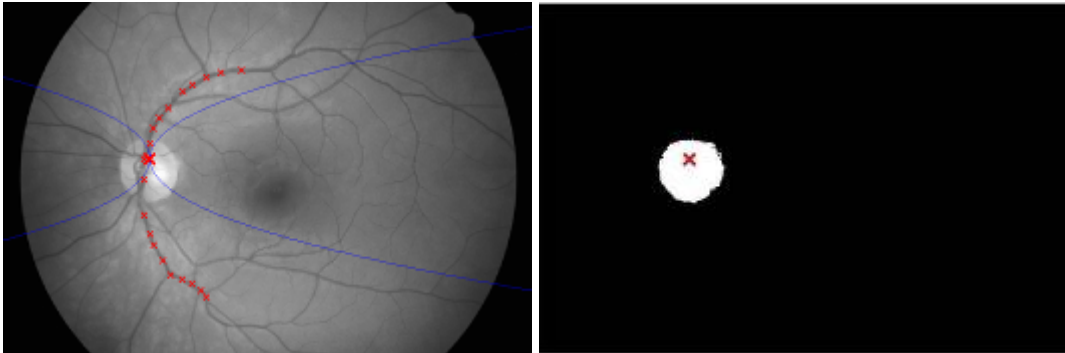
a) image_0246.jpg



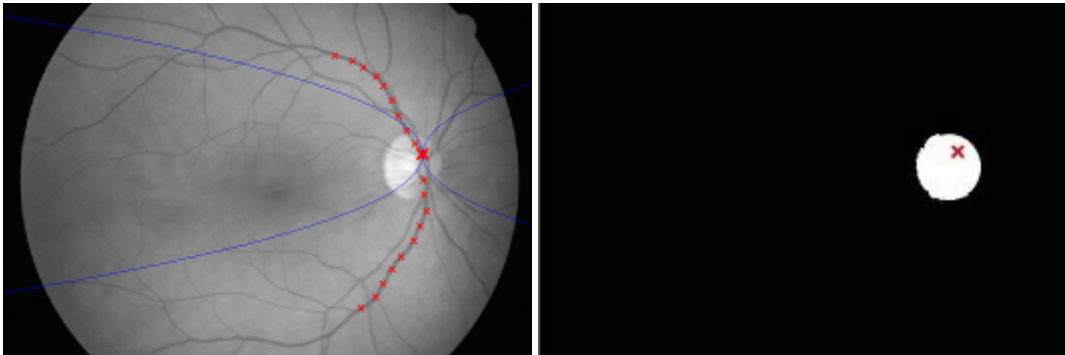
b) image_0262.jpg



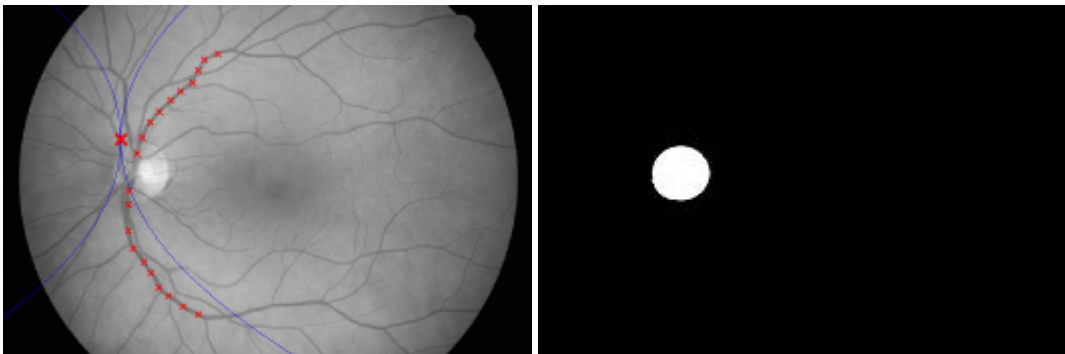
c) image_0866.jpg



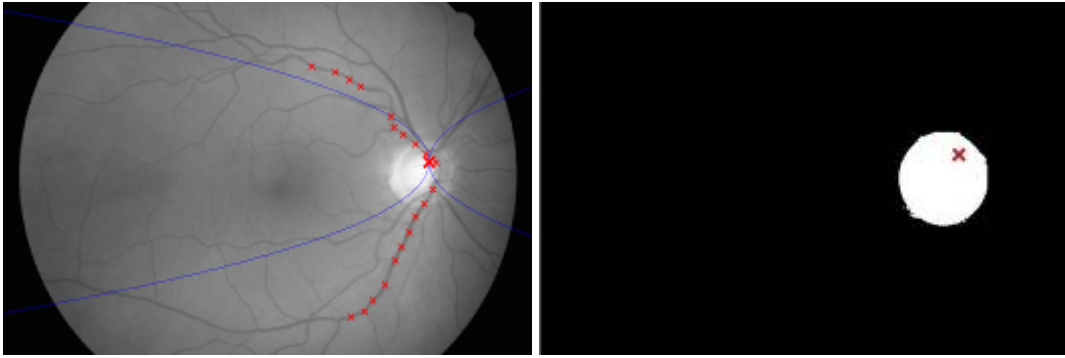
d) image_0873.jpg



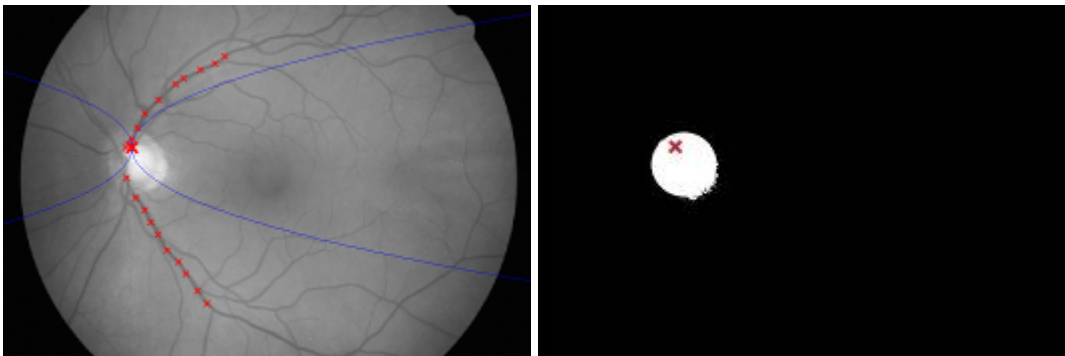
e) image_0878.jpg



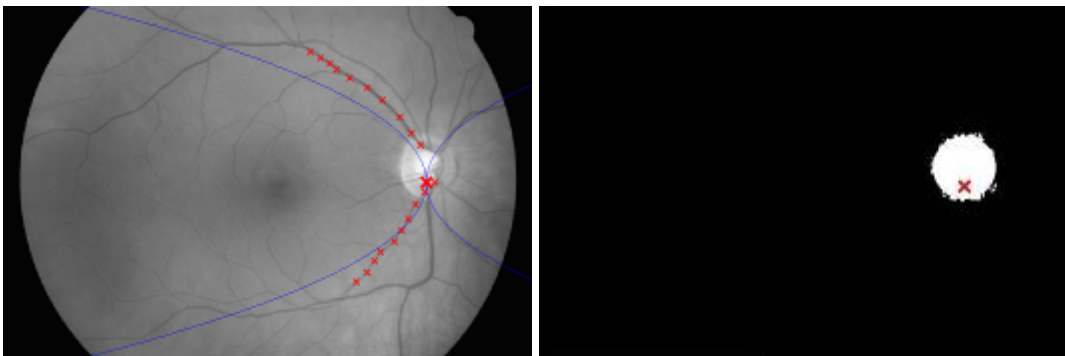
f) image_0888.jpg



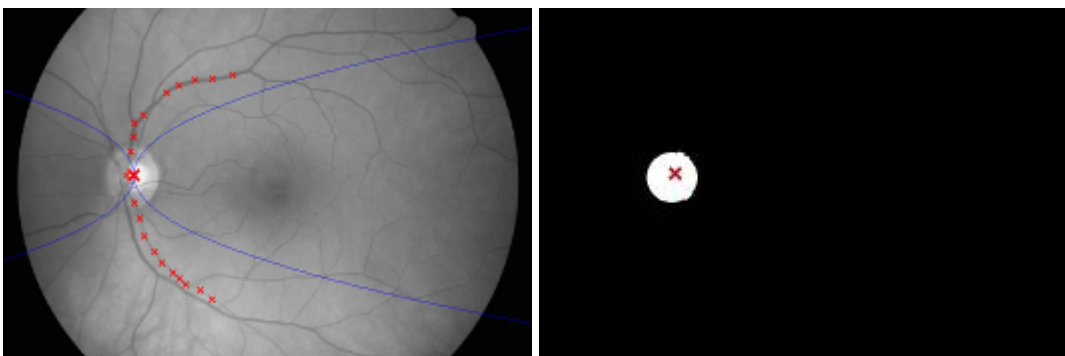
g) image_0964.jpg



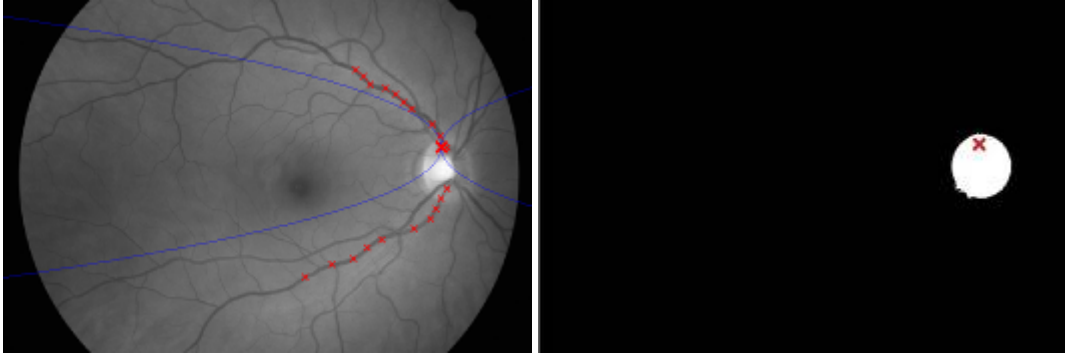
h) image_0980.jpg



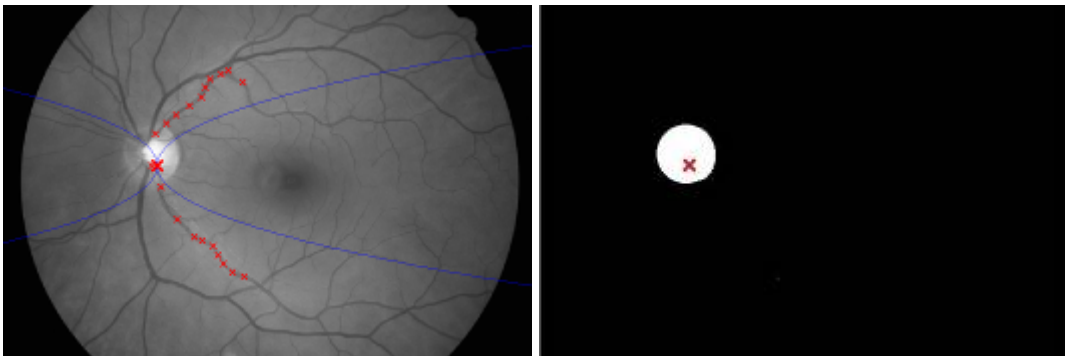
i) image_1012.jpg



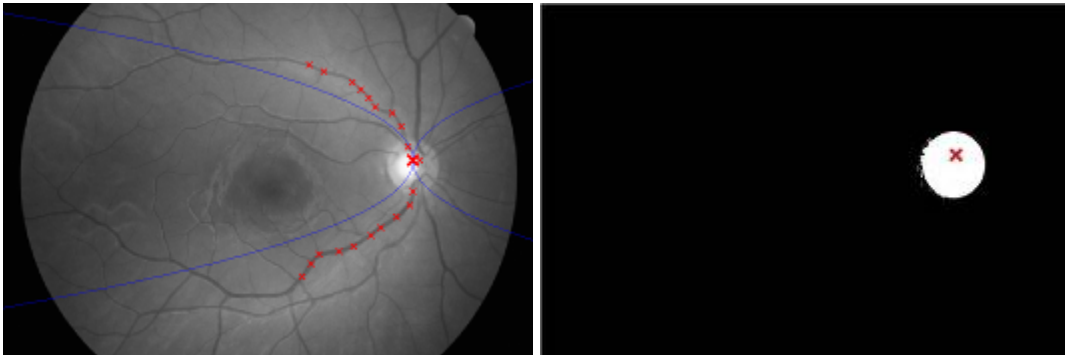
j) image_1028.jpg



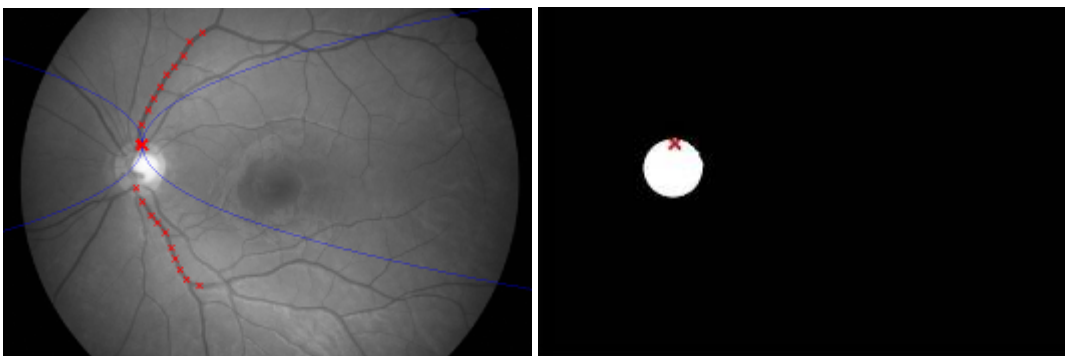
k) image_1154.jpg



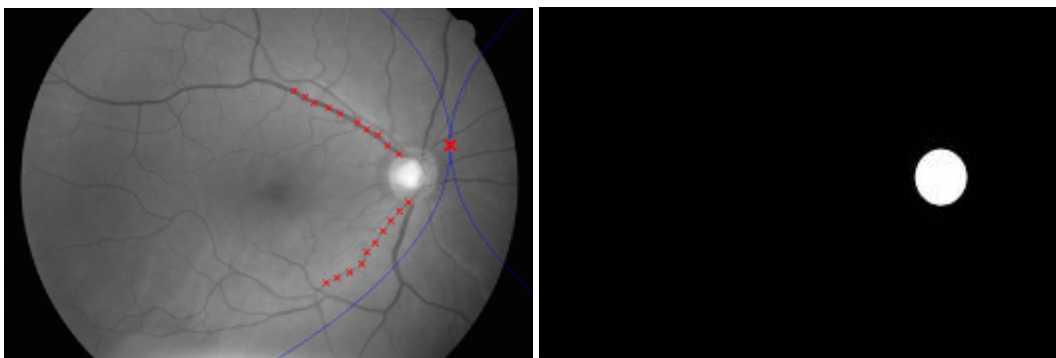
l) image_1165.jpg



m) image_1204.jpg



n) image_1213.jpg



o) image_1365.jpg

Obr. 7.10: Výsledky odhadu OD pro jednotlivé snímky a odpovídající binární masky.

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 (červený 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	+	-
+	13	2

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

Sensitivita

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

Sensitivitu můžeme vyjádřit rovnicí [51]:

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

$$TPR = \frac{13}{13 + 2}$$

$$TPR = 0,8\bar{6} = 86\%$$

Na základě výsledku výpočtu sensitivity můžeme říct, že metoda byla úspěšná v 86 % případů.

V následující tabulce (Tab. 3) jsou shrnuty všechny dosažené hodnoty pro jednotlivé snímky. X_{od}, Y_{od} jsou souřadnicemi nalezeného OD, a je apertura paraboly a hodnoty c₁ a c₂ určují její zakřivení.

Tab. 3: Nalezené souřadnice OD a optimální parametry modelu

Obrázek	X _{od}	Y _{od}	a	C1	C2
image_0246.jpg	530.000000	213.103448	-0.020000	56.875125	-0.001000
image_0262.jpg	202.931034	196.551724	-0.008571	0.001000	-56.875125
image_0866.jpg	546.551724	206.896552	-0.002857	60.937562	-8.125875
image_0873.jpg	196.724138	208.965517	-0.017143	0.001000	-56.875125
image_0878.jpg	552.758621	200.689655	-0.017143	8.125875	-0.001000
image_0888.jpg	159.482759	182.068966	-0.002857	0.001000	-12.188313
image_0964.jpg	565.172414	215.172414	-0.014286	60.937562	-0.001000
image_0980.jpg	173.965517	192.413793	-0.017143	0.001000	-60.937562
image_1012.jpg	561.034483	235.862069	-0.008571	56.875125	-0.001000
image_1028.jpg	178.103448	223.448276	-0.014286	0.001000	-65.000000
image_1154.jpg	577.586207	196.551724	-0.020000	65.000000	-0.001000
image_1165.jpg	205.000000	213.103448	-0.020000	0.001000	-56.875125
image_1204.jpg	542.413793	211.034483	-0.014286	56.875125	-0.001000
image_1213.jpg	186.379310	184.137931	-0.014286	0.001000	-24.375625
image_1365.jpg	590.000000	184.137931	-0.002857	0.001000	-0.001000

8.2 Diskuze výsledků

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. Nicméně vzhledem k tomu, že metoda prozatím není plně automatická a je potřeba zásah uživatele, mohou se výsledky kvůli individuálně zvoleným bodům cév měnit. K lokalizaci OD byly použity směrové mapy cévního řečiště získané pomocí segmentace cév pomocí přizpůsobené filtrace. Jak je vidět, tato metoda však není pro použití ideální, neboť neobsahuje informace o šířce cév, která by mohla napomoci k automatizaci algoritmu. V dalším rozšíření postupu by proto bylo vhodné najít lepší metodu pro zpracování cévních směrů. Navíc některé hodnoty cévních směrů nebyly ideálně určeny, což mohlo také (pokud uživatel klikne zrovna do tohoto bodu) ovlivnit správné určení OD. Proto by metoda pro segmentaci cév mohla sledovat hledaný směr v určité oblasti, a hodnoty, které by převažovaly, by nahradily hodnotu, která je určená chybně. Řešením nutnosti výběru bodů náležících cévnímu řečišti by mohla být metoda simulovaného žíhání, navržená v [22]. Metoda byla také testována a to na celém souboru cévních směrů. Vzhledem k tomu, že k cévním směrům zatím nejsou známy šířky cév, nelze jednotlivé cévní směry váhovat a tak algoritmus prozatím nevyhodnocuje pozici OD správně. Proto byla taky zvolena metoda ručního výběru cév. V rámci rozšíření práce s parabolickým modelem je nutné aplikovat vhodnější metodu segmentace cévního řečiště nebo stávající metodu rozšířit o měření šířky jednotlivých cévních struktur.

9 ZÁVĚR

Výsledkem této práce je rešerše vybraných metod pro lokalizaci optického disku na snímcích sítnice. První kapitola se zabývá teoretickým medicínským pozadím 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. 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 byly použity snímky z databáze zmíněné v kapitole 3. Databáze obsahuje tři soubory obrazů. Jedním je soubor zdravých obrazů bez jakéhokoliv patologického nálezu na sítnici. Druhý soubor obsahuje snímky s diabetickým onemocněním sítnice (diabetická retinopatie). Třetí skupina sestává z obrazů pacientů se zeleným zákalem (glaukomem) v pokročilém stádiu.

Vlastní rešerše metod zmiňuje významné metody, které již byly pro lokalizaci OD použity.

Podrobněji popsána metoda geometrického modelu v kapitole 5 je založená na předběžném odhadu hlavního směru retinálních cév. Vzhledem k předpokladu, že cévy vychází z optického disku a jejich směr je téměř parabolický ve všech snímcích, je možné vytvořit parametrický model, kde jsou dva z jeho parametrů určujícími souřadnicemi centra OD (vrchol parabol). Zároveň však potřebujeme znát princip odhalení cévní struktury na sítnici. K tomu jsme použili metodu segmentace cévního řečiště (kap. 6). Tato metoda je založena na principu přizpůsobené filtrace a jejím výsledkem je kompletní struktura cév, která však byla shledána pro tento model nevyhovující, neboť neobsahuje informace o šířce cév. K návrhu detektoru pozice OD bylo využito programové prostředí MATLAB.

Dle teorie popsané v kapitole 5 byl navržen parabolický model trajektorie cévních struktur, díky němuž můžeme detekovat pozici optického disku na snímcích sítnice. Vstupem modelu jsou potenciální souřadnice polohy OD, odhadnuté na základě anatomických znalostí a znalostí snímků sítnice a souřadnice popisující pozici bodů náležejících vybrané cévě. Pro urychlení výpočtu je oblast vyhledávání omezena na okno 61×61 pixelů okolo automatického odhadu OD. Spolu s vybranými body z nejsilnějších cév v obraze je model vložen do minimalizační funkce RSS, která počítá

rozdíl mezi ručně definovanými pozicemi cév a hodnotami modelu. Minimum je poté lokalizováno jako OD.

V současnosti není metoda plně automatická. Prozatím je potřeba zásahu uživatele pro výběr cév, díky kterému je poté vypočtena přibližná poloha OD. Nicméně programový kód je modulární, přehledně okomentován a je připraven k případnému budoucímu rozšíření. Důležitým předpokladem pro fungování metody je nalezení optimálního vysegmentování cévního řečiště a k tomu dostupné směrové mapy. Aby byla metoda detekce OD použitelná pro jakýkoliv snímek, bude potřeba v budoucnu sjednotit a zautomatizovat segmentaci cév a výpočet souřadnic dle modelu.

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.lfl.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.; Kouznetsova, 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] S 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 Bildverarbeitung für 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]

SEZNAM ZKRATEK

OD – optický disk

SA – simulated annealing – simulované žhání

PCA – principal component analysis - analýza hlavních komponent