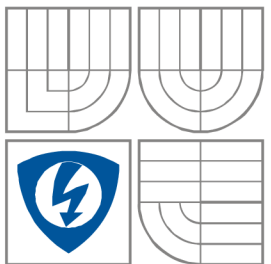


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

SEGMENTACE VÝZNAMNÝCH OBJEKTŮ V BAREVNÝCH OFTALMOLOGICKÝCH OBRAZECH

SEGMENTATION IN THE COLOR FUNDUS IMAGES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Miloš Malínský

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Radim KOLÁŘ, Ph.D.

BRNO, 2008

Vysoké učení technické v Brně

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Akademický rok 2007/08



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

magisterského studijního programu
Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika

studijního oboru

Biomedicínské a ekologické inženýrství

pro studenta jménem

Malínský Miloš

na téma

**Segmentace významných objektů v barevných
oftalmologických obrazech**

Zadání a zásady pro vypracování:

Prostudujete vlastnosti oftalmologických obrazů sítnice (především barevné snímky sítnice). Zaměřte se na segmentaci slepé skvrny a žluté skvrny, případně dalších objektů dle pokynů vedoucího. K segmentaci využijte charakteristické vlastnosti těchto objektů (morfologie, barva, textura) a metody pro zpracování obrazů (přizpůsobená filtrace, aktivní kontury).

Doporučená literatura:

- [1] Sinthanayothin, Ch., Boyce, J.F., Cook, H.L., Williamson, T.H. Automated localisation of the optic disc, fovea, and retinal blood vessels from digital colour fundus images, British Journal of Ophthalmology 1999; 902-910
- [2] Gonzales, R. Digital Image Processing, 1987

Termín zadání práce: 30.10.2007

Termín odevzdání práce: 30.5.2008

Vedoucí práce: **Ing. Radim Kolář, Ph.D.**

Vedoucí ústavu a předseda OR: **Prof. Ing. Jiří Jan, CSc**

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Miloš Malínský
Bytem: Židněves 32, 294 06
Narozen/a (datum a místo): 22. června 1983 v Hradci Králové

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Jiří Jan, CSc, předseda rady oboru Biomedicínké a ekologické
inženýrství
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Segmentace významných objektů v barevných
oftalmologických obrazech

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Radim Kolář, Ph.D.

Ústav: Ústav biomedicínského inženýrství

Datum obhajoby VŠKP: 9.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Optický disk a žlutá skvrna patří mezi hlavní prvky sítnice. Jejich detekce a rozměření sehrává významnou roli v diagnostice očních onemocnění.

Tato práce popisuje metody detekce optického disku a žluté skvrny v barevných oftalmologických obrazech. Jedná se o nalezení středu žluté skvrny a optického disku, u kterého je dále detekována vnější hranice. Existuje řada metod pro segmentaci těchto prvků z retinálních obrazů. Všeobecně přijatá detekční metoda však není známa z důvodu existence různých technik pořizování dat s rozlišnými charakteristikami. Diplomová práce popisuje veškerý proces detekce, od předzpracování přes segmentaci k závěrnému zpracování. Prezentované metody jsou založeny na kombinaci korelačních technik, Houghovy transformace, aktivních kontur a morfologických operací. Výsledné kontury optického disku jsou zpracovány a kvantitativně vyhodnoceny pomocí porovnání s konturou označenou zkušeným oftalmologem. Diplomová práce obsahuje množství obrázků, které mají usnadnit pochopení aplikované detekce.

Klíčová slova:

Optický disk, žlutá skvrna, segmentace, prahování, filtrace, lokální zvýšení kontrastu, Houghova transformace, aktivní kontury.

Abstract

Optic nerve head and macula are important structures in fundus images. Detection and measurement plays crucial role in several diagnosis methods of optic disease.

This work is focused on the detection of the central point of macula and optic nerve head, where the inner border is detected too. There are many methods for extracting this structure in retinal images. Due to the unique properties of each acquisition technique, a single generally acknowledged detection algorithm does not exist. The whole detection process is described from preprocessing through segmentation towards postprocessing. Presented methods are based on the combination of correlation techniques, Hough transform, active contours and morphological operations. The detected contours of the optic nerve head are evaluated and quantitatively compared with the contour drawn by experienced ophthalmologist. The master thesis contains quantity of images that help to describe detection methods.

Keywords:

Optic nerve head, macula, segmentation, thresholding, filters, enhancement, Hough transformation, active contour.

Bibliografická citace

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.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Segmentace významných objektů v barevných oftalmologických obrazech jsem vypracoval 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 autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom 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 30. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Radimu Kolářovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Obsah:

1	Úvod	11
1.1	<i>Základní možnosti využití zpracování obrazu</i>	11
2	Digitální reprezentace obrazu	12
2.1	<i>Popis barev v obraze</i>	12
2.1.1	Binární obraz	12
2.1.2	Šedotónový obraz	12
2.1.3	RGB obraz	12
3	Formáty digitálních obrázků	13
3.1	<i>JPEG (Joint Photographic Experts Group)</i>	13
3.2	<i>BMP (Windows Bitmap)</i>	13
4	Fundus kamera	14
4.1	<i>Konstrukce fundus kamery</i>	14
4.2	<i>Canon CF-60 UVi</i>	14
5	Sítlice	16
5.1	<i>Slepá skvrna</i>	16
5.2	<i>Žlutá skvrna</i>	16
5.3	<i>Ostatní objekty</i>	16
6	Segmentace	17
6.1	<i>Segmentační metody</i>	17
7	Aritmetické a logické operátory	18
8	Filtrace	19
8.1	<i>Gaussův filtr</i>	19
8.2	<i>Mediánový filtr</i>	19
9	Předzpracování	20
9.1	<i>Transformace RGB na šedotónový obrázek</i>	20
9.2	<i>Lokální zvýšení kontrastu (enhancement)</i>	21
9.2.1	Pseudo-kód programu LZK	22
9.2.2	Problémy programu a jejich řešení	23
10	Detekce optického disku	24
10.1	<i>Střední rozptyl</i>	24
10.1.1	Pseudo-kód programu střední rozptyl	24
10.2	<i>Lokalizace OD konvolucí s maskou</i>	25
10.2.1	Pseudo-kód programu detekce slepé skvrny	25
10.2.2	Problémy programu a jejich řešení	25

10.2.3	Konvoluce v diskrétním obraze	26
11	Detekce žluté skvrny	27
11.1	<i>Globální prahování</i>	27
11.2	<i>Detekce pomocí korelační matice</i>	27
11.2.1	Vytvoření šablony	27
11.2.2	Program vytvoření šablony	28
11.2.3	Matice korelačních koeficientů	29
11.2.4	Program pro detekci žluté skvrny	29
11.2.5	Výsledné obrázky detekce	30
12	Houghova transformace	31
12.1	<i>Houghova transformace pro kružnici</i>	31
12.2	<i>Detekce hran pro Houghovu transformaci</i>	31
12.2.1	Nastavení Cannyho detektoru	32
12.2.2	Problémy programu a jejich řešení	32
12.3	<i>Výsledky Houghovy transformace</i>	32
12.3.1	Pseudo-kód programu Houghovy transformace	33
13	Aktivní kontury	34
13.1	<i>Interní energetická funkce</i>	34
13.2	<i>Gradient</i>	35
13.3	<i>Funkce GVF</i>	36
13.4	<i>Morfologické operace</i>	38
13.4.1	Binární erose	38
13.4.2	Binární dilatace	38
13.5	<i>První externí síla</i>	38
13.5.1	Programové řešení	40
13.6	<i>Druhá externí síla</i>	40
13.6.1	Otsu algoritmus (Metoda optimálního prahu)	40
13.6.2	Pomocné obrazy	41
13.6.2.1	Algoritmus 1 (Obraz A)	42
13.6.2.2	Algoritmus 2 (Obraz B)	42
13.6.3	Výsledný obraz	42
13.7	<i>Algoritmus aktivních kontur</i>	43
13.7.1.	Specifikace a nadeklarování bodů počáteční kontury	43
13.7.2	Vývoj algoritmu	43
13.7.3	Vývojový diagram AK	45
13.8	<i>Výsledky detekce OD</i>	45
14	Hodnocení algoritmu	48

15	Uživatelské prostředí.....	53
15.1	<i>Switched Board Programming</i>	53
15.2	<i>Prostředí programu</i>	53
16	Závěr	55
	Použitá literatura.....	56
	Seznam zkratk	57

Seznam obrázků:

Obr.1. Základní části fundus kamery	14
Obr.2. Zobrazení Gaussovy funkce ve 3D prostoru	19
Obr.3. Princip mediánového filtru s maskou 3 x 3	19
Obr.4. RGB obrázek a jeho složky	21
Obr.5. Šedotónový obrázek	21
Obr.6. Závislost lokálního zvýšení kontrastu na velikosti masky M.....	22
Obr.7. Obrázky závislosti obrazu středního rozptylu na velikosti masky	24
Obr.8. Výsledné obrázky detekce slepé skvrny	25
Obr.9. Vytvoření šablony pro nalezení ŽS	28
Obr.10. Obrázek aproximace řezu zprůměrované ŽS.....	28
Obr.11. Výsledné obrázky detekce žluté skvrny	30
Obr.12. Proces Houghovy transformace.....	31
Obr.13. Výstup Cannyho detektoru	32
Obr.14. Obrázky Houghovy transformace.....	33
Obr.15. Absolutní hodnota součtu složek gradientu.....	35
Obr.16. Vlastnosti funkce GVF	37
Obr.17. Externí síla $G(u,v)$	37
Obr.18. Výsledná kontura při použití $G(u,v)$ funkce	37
Obr.19. Morfologické operace.....	38
Obr.20. Ilustrace výpočtu první externí síly	39
Obr.21. Obrázky první externí síly	40
Obr.22. Obrázek LZK s Otsu prahovací hodnotou.....	41
Obr.23. Obrázek A pro druhou externí sílu	42
Obr.24. Algoritmus 2 pro druhou externí sílu	42
Obr.25. Výsledný obraz druhé externí síly	43
Obr.26. Vývoj algoritmu aktivních kontur	44
Obr.27. Vývojový diagram aktivní kontury.....	45
Obr.28. Ukázky výsledné kontury	46
Obr.29. Výsledná kontura po interpolaci splajn křivkou.....	47
Obr.30. Schématická ukázka levého a pravého oka, výpočet chyby vzdálenosti bodů..	48
Obr.31. Histogram velikosti chyb kontury	49
Obr.32. Velikost chyby levého oka v závislosti na úhlu	49
Obr.33. Velikost chyby pravého oka v závislosti na úhlu	50
Obr.34. Odlišnost kontury lékaře od kontury nalezené programem.....	52
Obr.35. Vývojové schéma algoritmu	53
Obr.36. Prostředí programu	54

1 Úvod

Pro detekci základních morfologických objektů v oftalmologických obrazech je nutná základní znalost anatomie oka a jejich součástí. Do hlavních komponentů sítnice zahrnujeme slepou skvrnu, žlutou skvrnu, oční cévy a nervy.

Segmentace optického disku (OD) a žluté skvrny v barevných oftalmologických obrazech sehraává významnou roli v diagnostice onemocnění glaukomu, např. ve spojení s konfokálním laserovým skenovacím oftalmoskopem typu HRT (Heidelberg Retina Tomograph) vede ke zlepšení přesnosti segmentace OD v HRT obrazech [1].

Tato práce se zaměřuje na detekci žluté skvrny a centrálního bodu OD s následným nalezením vnitřní hranice OD využitím metody aktivních kontur. Barevné fundus obrázky, prezentované v této práci, jsou dvojího druhu. V první části práce, kde jde o nalezení místa OD a žluté skvrny, jsou použity obrázky získané pomocí oftalmoskopu Canon CF-60Udi s digitální kamerou Canon D20. Jedná se o RGB snímky o velikosti 3504 x 2336 pixelů s širokým zorným polem (60°). V druhé části, kde je věnována pozornost aktivním konturám, se používají snímky s detekovaným OD o velikosti 384 x 384 pixelů. Tyto snímky jsou pořízeny ve spolupráci s univerzitou v Erlangenu pomocí fundus kamery Kowa NonMyd.

1.1 Základní možnosti využití zpracování obrazu

Základní možnost, jak využít automatizované zpracování oftalmologických obrazů, je při vyšetření glaukomu nebo centrálního nervového systému. Důležité kritérium u těchto vyšetření hraje tvar a plocha OD.

2 Digitální reprezentace obrazu

Důležitým krokem při získávání vhodného obrazu pro zpracování v počítačích je převod spojitého analogového signálu na signál digitální – digitalizace.

Digitální obraz je ekvivalentem spojité obrazové funkce $f(x,y)$, kde x a y jsou souřadnice jednotlivých bodů v prostoru. Je získán pomocí vzorkování obrazu do matice $M \times N$ bodů a kvantováním do K úrovní.

Amplituda bodů dvojrozměrné funkce je nazývána jas. Nejmenším elementem v obraze je pixel. Digitální obrázek je tedy diskrétní pole pixelů, kde intenzita každého pixelu je reprezentována číslem [2].

2.1 Popis barev v obraze

Barva – barevnost – obrazu je důležitým nositelem informace. Pro určení přesného odstínu barvy jsou vytvořeny barevné modely. Ty se liší podle použitých složek.

2.1.1 Binární obraz

Binární obraz je tvořen pouze kombinacemi 1 a 0. Tyto prvky potom představují binární pole.

2.1.2 Šedotónový obraz

Tento model obrazu je určen pro některé aplikace, kde postačuje obraz v šedé škále. Je definován v rozmezí bílá – stupně šedi – černá. Většinou se využívá 256 odstínů, tedy 8 bitů hloubky.

2.1.3 RGB obraz

Tento popis barev je využíván v zobrazovacích zařízeních, kdy jeden viditelný bod (pixel) je tvořen pomocí tří barevných složek Red, Green, Blue (červená, zelená a modrá). Jejich sloučením vzniká jediná barva.

Tento model je aditivní – tedy pro hodnoty 0,0,0 je výsledná barva černá. Se zvyšující se hodnotou se barvy „přidávají“, až po maximální hodnotu 1,1,1, kdy je výsledná barva bílá. Pokud jsou hodnoty jednotlivých složek stejné, jedná se o odstín šedi.

V počítačové grafice se většinou uvažuje rozsah hodnot v celých číslech v rozmezí 0 – 255. V této souvislosti se hovoří i o „hloubce barev“, která udává právě číselné rozmezí pro jednotlivé složky.

3 Formáty digitálních obrázků

3.1 JPEG (*Joint Photographic Experts Group*)

Formát JPEG je určen především pro zobrazování fotografií a obrázků, které obsahují značné množství barev a jejich odstínů.

Formát podporuje čtyřicetibitovou grafiku. Obrázek tedy může obsahovat až 16 777 216 barev. JPEG ukládá všechny informace o jednotlivých barvách v takzvaných RGB složkách, kdy každá barva je vyjádřena jako trojkombinace tří základních barev - červené (Red), zelené (Green) a modré (Blue). Zastoupení každé barvy můžeme vyjádřit číslem 0 až 255, což je 8 bitů. Barvy jsou tři, tedy celkem potřebujeme 24 bitů pro vyjádření libovolné ze 16 milionů možných barev.

Využívá kompresi, která je ztrátová. Pokud se uloží nějaký obrázek v souboru typu JPEG, znova se otevře a zase uloží, kvalita nového obrázku se podle zvoleného stupně komprese sníží, dojde ke ztrátě zobrazovaných dat.

Soubory ve formátu JPEG mívají příponu .jpg (někdy se můžeme setkat i s příponou .jpeg) [2].

3.2 BMP (*Windows Bitmap*)

Výhodou tohoto formátu je jeho extrémní jednoduchost, dobrá dokumentovanost, a že jeho volné použití není znemožněno patentovou ochranou. Díky tomu jej dokáže snadno číst i zapisovat většina grafických editorů v mnoha různých operačních systémech.

Obrázky BMP jsou ukládány po jednotlivých pixelech. Podle toho, kolik bitů je použito pro reprezentaci každého pixelu, je možno rozlišit různé množství barev (tzv. barevná hloubka): 2 barvy (1 bit na pixel), 16 (4 bity), 256 (8 bitů), 65 536 (16 bitů), nebo 16,7 milionů barev (24 bitů). Osmibitové obrázky mohou místo barev používat šedou škálu (256 odstínů šedi).

Soubory ve formátu BMP většinou nepoužívají žádnou kompresi. Z tohoto důvodu jsou obvykle BMP soubory mnohem větší, než obrázky stejného rozměru uložené ve formátech, které kompresi používají [3].

4 Fundus kamera

Jedná se o zařízení, jež slouží k vyšetření očního pozadí. Jeho účel se nejvíce uplatňuje u podpory diagnostiky glaukomu, diabetes, degenerace sítnice a makulární degradaci.

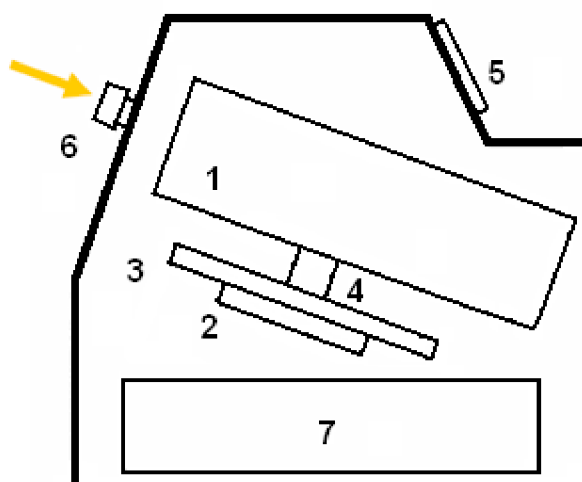
V podstatě je to retinální kamera, jejíž systém umožňuje korigovat i vysoké hodnoty ametropie. Přístroj je vybaven zdrojem bílého světla, kterým lze osvětlit sítnici a CCD prvkem, pomocí kterého je obraz sítnice zaznamenán (Obr.1).

Tento přístroj se dnes vyrábí většinou v digitální formě, v které plně nahrazuje oftalmoskop.

4.1 Konstrukce fundus kamery

Celkové zařízení se skládá z následujících částí:

1. Zobrazovací jednotka
2. Poziční jednotka
3. Poziční jednotka
4. Poziční jednotka
5. Operační panel pro lékaře
6. Objektiv
7. PC



Obr.1. Základní části fundus kamery

4.2 Canon CF-60 UVi

Jedná se o hojně rozšířenou širokoúhlou fundus kameru, která nabízí uživateli tři typy fotografií: barevné fotografie, fluorescenční angiografii, a ICG (Indocyanine Green) angiografii. Angiografie je vyšetření, které umožňuje lékaři zobrazit oční cévy.

Vlastnosti fundus kamery

- Vysoká kvalita zobrazení při 60°, 40° a 30°
- Precizní zaměření a práce s nastavováním vzdálenosti
- Automatická expozice u 35mm barevné fotografie
- Automatické ovládání funkcí natáčení s 35mm filmovou kamerou
- Automatické nastavování filtru u zobrazení tepen
- Měření – tisknutí dat
- Červená fotografie
- Vhodná pro oči s malou čočkou

Specifikace fundus kamery

Úhlové pole	60°, 40°, 30°
Zvětšování obrázku u 35mm filmu	1.7 x (60°), 2.5 x (40°), 3.4 x (30°)
Zvětšování obrázku u poznámek	8.5 x (60°), 12 x (40°), 17 x (30°)
Aktuální rozměry obrázku	ø29mm x 22mm u 35mm filmu ø75mm x 57mm u Polaroid filmu
Minimální průměr čočky	ø4mm
Pracovní vzdálenost	45mm
Rozsah dioptrií pro vyšetření	
Bez kompenzační čočky	-10 to +12D
Se zápornou kompenzační čočkou	-6 to -27D
S kladnou kompenzační čočkou	+9 to +32D
Základní pohyby	
Vertikální	38mm
Dopředu – dozadu	70mm
Vpravo – vlevo	120mm
Pohyby tváře	65mm
Rozměry	320mm x 560mm x 565mm
Váha	kolem 26kg

5 Sítnice

Sítnice je vlastním orgánem zraku. Je to tenká vrstva, která zevnitř pokrývá oční stěnu. Funguje jako film ve fotoaparátu. Zachycuje obraz a zrakovým nervem jej posílá do zrakových center v mozku. Smyslovými buňkami sítnice jsou tyčinky a čípky.

Sítnice má plochu několik cm^2 . Její centrální část, nejdůležitější pro ostré vidění detailů, pro čtení, řízení auta, rozeznávání obličejů apod., se jmenuje **žlutá skvrna (ŽS)**. Onemocnění ŽS vede ke ztrátě ostrého vidění detailů. Periferní sítnice slouží k perifernímu vidění. Zásobením sítnice kyslíkem poskytují sítnicové tepny a žíly. Jejich poruchy (uzávěry nebo krvácení) vedou k závažným poruchám zraku [4].

5.1 Slepá skvrna

Místo, v němž zrakový nerv opouští sítnici se nazývá slepá skvrna. Je to místo na sítnici, které neobsahuje tyčinky ani čípky.

Slepá skvrna se v obraze očního pozadí jeví jako nažloutlá oblast. Obsazuje přibližně jednu sedminu z celkového obrázku sítnice.

5.2 Žlutá skvrna

Žlutá skvrna (fovea) je místo na sítnici o průměru cca 0,2-0,5 mm. Nachází se na ose oka a je to místo nejostřejšího vidění, kterým ostříme - neboli je to "AF bod oka". Na 1 mm^2 tam připadá asi 150 000 čípků (odpovídá rozlišení asi 10 000 dpi!) a nejsou tam skoro žádné tyčinky. ŽS slouží k ostrému a barevnému dennímu vidění a vysoké rozlišení podporuje i fakt, že každý čípek ve žluté skvrně má svůj vlastní optický nerv (vlákno).

5.3 Ostatní objekty

Cca 1,2 miliónů nervových vláken se střetává v hlavě zrakového nervu. Krátkým, okrouhlým, síťovým otvorem v sítnici vystupují ve svazcích a spojují se do zrakového nervu. Zrakový nerv probíhá 25 až 40 milimetrů v oční dutině a 10 až 15 milimetrů v lebce před tím, než se oba zrakové nervy spojí a zkříží, aby potom spolu vyústili do mozku.

6 Segmentace

Jedním z nejtěžších kroků zpracování obrazu je segmentace obrazu. Jedná se o analýzu obrazu vedoucí k nalezení objektů v obraze. Za objekty se zde považují části obrazu, které jsou bodem zájmu v dalším průběhu zpracování. Cílem segmentace je tedy rozdělení obrazu do částí odpovídající předmětům či oblastem reálného světa. Výsledkem segmentace by měl být soubor oblastí, které odpovídají objektům ve vstupním obraze. Jedná se pak o tzv. kompletní segmentaci. Pokud ale oblasti neodpovídají přesně objektům, tak tuto segmentaci nazýváme částečnou. Kompletní segmentace obecně využívá vyšší úroveň zpracování, které je založeno na znalostech řešeného problému. Částečná segmentace je založena na principu homogenity obrazových vlastností (např. jas, barva) uvnitř segmentu [5].

6.1 Segmentační metody

- **segmentace podle homogenity oblastí**
 - segmentace podle skalárního parametru (např. jasu)
 - segmentace podle vektorového parametru (barvy, textury, multimodální složky)
- **regionově orientovaná segmentace**
 - narůstání oblastí
 - spojování oblastí
 - dělení a spojování oblastí
- **segmentace metodou rozvodí**
- **hranově orientovaná segmentace**
 - založená na upravené hranové reprezentaci
 - prostřednictvím Houghovy transformace
 - metoda sledování kontury
- **pružné a aktivní kontury – optimalizační přístupy**
 - parametrické pružné kontury
 - geometrické pružné kontury
 - aktivní kontury založené na apriorních znalostech
- **ostatní přístupy**
 - prohledávání grafu
 - vyhledávání obrazců (objektů)

7 Aritmetické a logické operátory

Logické operátory jsou funkce, které pro konečný počet vstupních parametrů vrací logické hodnoty. Lze je aplikovat na binární obrazy v případě, že bílá označuje logickou 1 a černá logickou 0. Mezi základní logické operátory patří AND, OR, NAND, NOR, XOR a XNOR.

Aritmetické operátory mohou být definovány jako logické operátory (Tab.1). Operátor zde reprezentuje operaci součet, rozdíl, násobení a dělení.

Tab.1. Přehled logických stavů uvedených operátorů

$f(x,y)$	$m(x,y)$	$g(x,y)$					
		AND	OR	NAND	NOR	XOR	XNOR
0	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0	1

8 Filtrace

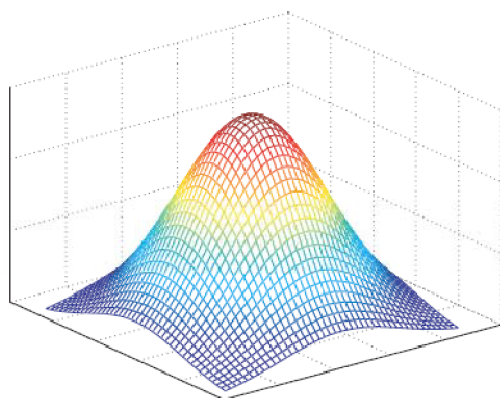
K redukci šumu v obraze se používají prostorové filtry [5]. Jedná se většinou o masku charakterizující přenosovou charakteristiku filtru. Výstupní obraz je dán konvolucí vstupního obrazu s maskou. Dva nejužívanější filtry jsou Gaussův filtr a mediánový filtr.

8.1 Gaussův filtr

Dvoudimensionální filtr (Obr.2) je definován pomocí vzorce:

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

kde σ definuje směrodatnou odchylku filtru.



Obr.2. Zobrazení Gaussovy funkce ve 3D prostoru

8.2 Mediánový filtr

Mediánové filtry jsou nelineární filtry založené na teorii seřazovacích statistik. Jejich výhodou je robustnost a stabilita. Používají se především při filtraci impulzního šumu u jednorozměrných signálů a obrazů.

Nejdůležitější vlastností těchto nelineárních filtrů je schopnost potlačovat šum, který není gaussovský, což bývá nejčastěji impulzní šum.

Jedná se o lokální operátor s parametrem definujícím velikost tohoto okolí. Funkce mediánového filtru je vidět na obrázku 3.

67	52	165
252	55	61
25	58	49

→ 25 49 52 55 **58** 61 67 165 252 → 58

Obr.3. Princip mediánového filtru s maskou 3 x 3

9 Předzpracování

Po úspěšném získání obrazu a jeho digitalizaci je k dispozici digitální obraz pozorované scény. Obraz však může být zkreslen díky způsobu snímání nebo nevhodným podmínkám jeho reprezentace. Pokud je znám charakter zkreslení, je možné tuto chybu opravit pomocí korekcí, které jsou jednou z metod předzpracování obrazu. Existuje však velké množství dalších metod, které usnadňují další analýzu obsahu obrazu, identifikaci objektů nebo jen zvýrazňují důležité rysy obrazu pro snazší pozorování člověkem.

Základní rozdělení metod předzpracování obrazu:

- Jasové transformace
- Geometrické transformace
- Filtrace a ostření

Zde jsou zmíněny jen základní způsoby předzpracování obrazu.

9.1 Transformace RGB na šedotónový obrázek

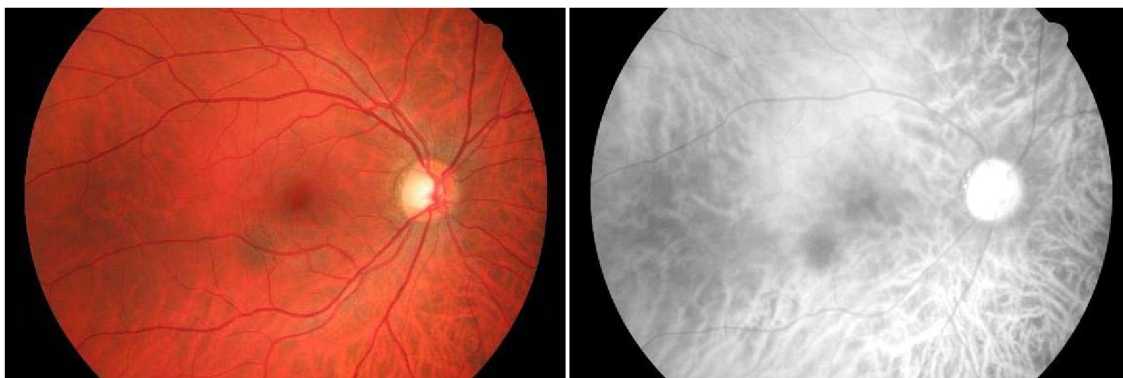
Jedná se o transformaci vektorového vyjádření obrazového elementu na vyjádření skalární (šedotónová stupnice). Výpočet jednoho pixelu je dán podle vzorce (2).

$$g(i, j) = \frac{1}{3}(f_R(i, j) + f_G(i, j) + f_B(i, j)) \quad (2)$$

Ve zvláštních nebo znalostních případech jde rovnice změnit podle vzorce (3), kde N jsou jednotlivé složky pixelu.

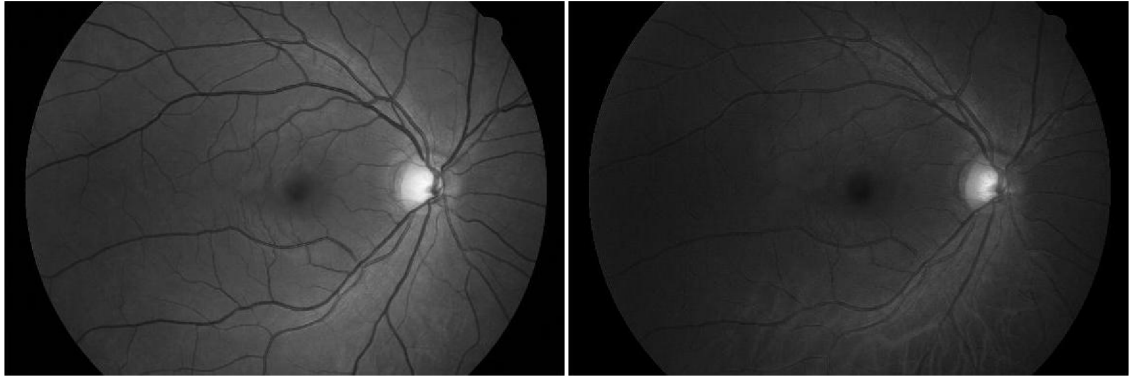
$$g(i, j) = \frac{1}{N} \sum_1^N f_N(i, j) \quad (3)$$

Na obrázku 4a je uveden vstupní RGB obrázek. Obrázky 4b až 4d popisují jednotlivé složky RGB obrázku. Obrázek v šedotónové relaci vypočítaný podle vzorce (2) je zobrazen na obrázku 5.



(a) RGB obrázek

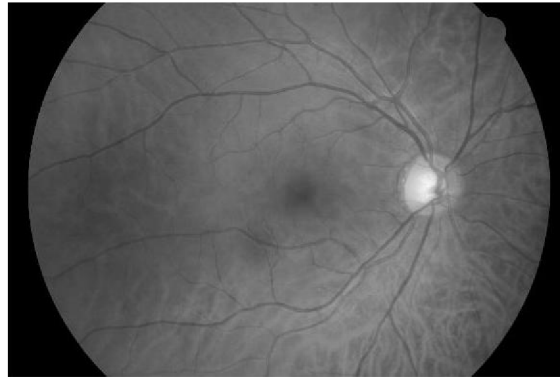
(b) R-složka obrázku



(c) G-složka obrázku

(d) B-složka obrázku

Obr. 4. RGB obrázek a jeho složky



Obr. 5. Šedotónový obrázek

9.2 Lokální zvýšení kontrastu (enhancement)

Cílem předzpracování je zmenšit jasovou variabilitu obrazu, způsobenou rozdílnými optickými vlastnostmi oka. Každý obrázek v databázi obsahuje tři jasové složky: červenou, zelenou a modrou. Jednotlivé složky jsou kvantovány do 256 úrovní.

Kontrast jasové složky je zvýšen pomocí lokální adaptivní transformace [6]. Uvažujeme submatici $W(i,j)$ o rozměrech $M \times M$ pixelů se středem v pixelu (i,j) . Vypočteme střední hodnotu a směrodatnou odchylku intenzity v submatici $W(i,j)$ jako $\langle f \rangle_w$ a σ_w podle vzorce (4) a (5). Předpokládáme, že f_{max} a f_{min} jsou hodnoty maximální a minimální intenzity v submatici.

$$\langle f \rangle_{W(i,j)} = \frac{1}{M^2} \sum_{(k,l) \in W(i,j)} f(k,l) \quad (4)$$

$$\sigma_w^2(f) = \frac{1}{M^2} \sum_{(k,l) \in W(i,j)} (f(k,l) - \langle f \rangle_w)^2 \quad (5)$$

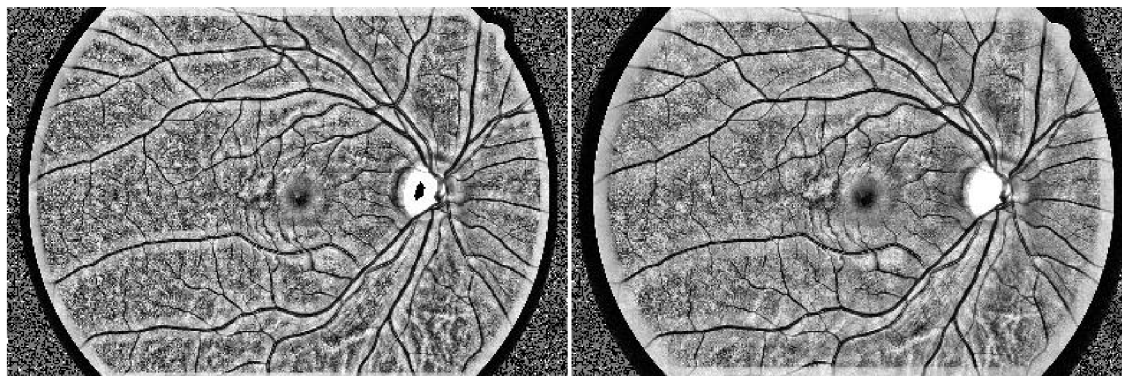
Adaptivní lokální operátor pro zvýšení kontrastu je definován podle rovnice (6),

$$g(i,j) = 255 \cdot \frac{[\psi_w(f) - \psi_w(f_{min})]}{[\psi_w(f_{max}) - \psi_w(f_{min})]} \quad (6)$$

kde funkce sigmoidy je definována rovnicí (7).

$$\psi_w(f) = \left[1 + \exp\left(\frac{\langle f \rangle_w - f}{\sigma_w}\right) \right]^{-1} \quad (7)$$

Po aplikaci tohoto lokálního operátoru je vidět, že tmavší místa jsou zesvětleny a obrázek obsahuje více detailů. Nežádoucím faktorem této transformace je zvýšení šumu v obraze. Tento jev lze do jisté míry redukovat použitím Gaussovského filtru. Výsledný kontrast obrazu je také závislý na použité masce submatice W . Na obrázcích 6 jsou vidět rozdíly v použití různých velikostí masky. K vytvoření obrazu lokálního zvýšení kontrastu (LZK) je použit obraz součtu složky G a B vstupního RGB obrázku.



a) $M = 13$ pixelů

b) $M = 21$ pixelů



c) $M = 53$ pixelů

d) $M = 77$ pixelů

Obr.6. Závislost lokálního zvýšení kontrastu na velikosti masky M

9.2.1 Pseudo-kód programu LZK

```

in = načti obrázek;
for i = 1..sloupce
  for j = 1..řádky
    hodnota = hodnota obrazu na pozici (i,j);
    maska = výběr okolí kolem aktuální polohy(i-N:i+N,j-N:j+N);
    průměr = spočítej průměr z okolí;
    směr_odch = spočítej směrodatnou odchylku z okolí;
    maximum = najdi maximum z okolí;
    fimax = spočítej funkci pro maximální hodnotu z okolí
              1/(1+exp((průměr - maximum)/směr_odch));
    minimum = najdi minimální hodnotu z okolí;
    fimin = spočítej funkci pro minimální hodnotu z okolí;
              1/(1+exp((průměr - minimum)/směr_odch));
    fi = spočítej funkci pro hodnotu (i,j);
              1/(1+exp((průměr - hodnota)/směr_odch));
    LZK = výpočet funkce LZK dle ((fi-fimin)/(fimax-fimin));
  end
end
end

```

9.2.2 Problémy programu a jejich řešení

Jedním ze základních problémů při vytváření funkce lokálního zvýšení kontrastu je čas jeho výpočtu. Ten je závislý na velikosti použité masky. Při použití nevhodnější masky [91x91 pixelů], je doba potřebná k výpočtu kolem 30 minut. Při masce menší je hodnota času zpracování kolem 15 minut.

Nejlepší řešení je zmenšit masku se současným zmenšením rozměrů obrázku. Tato operace je vytvořena prostým ponecháním N-tých vzorků obrazu v obou směrech (x,y), kvůli zachování poměru stran.

Při ponechání každého 6. vzorku se doba potřebná k výpočtu zmenší na cca 2 minuty. Vezme-li se každý 9. vzorek, bude doba výpočtu menší než 1 minuta.

10 Detekce optického disku

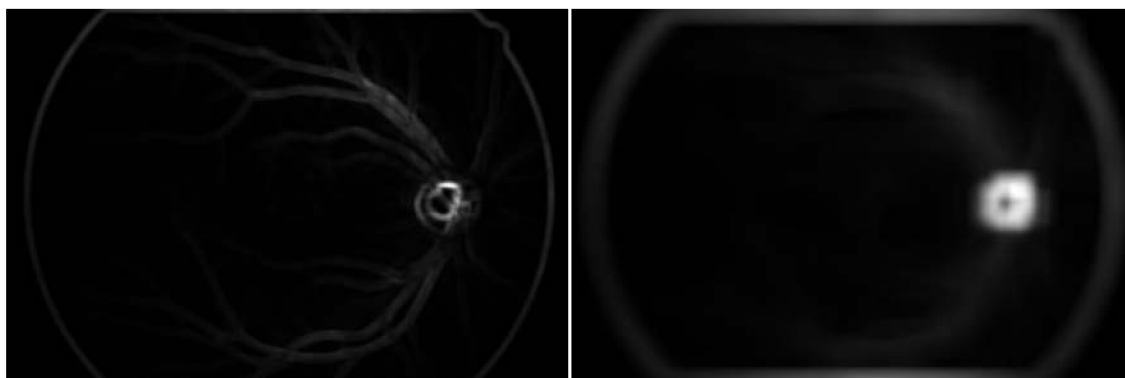
Pro detekci OD (slepá skvrna) lze použít velké množství přístupů. Využívá se skutečnosti, že slepá skvrna se v obrázku jeví jako místo s nejvyšší hodnotou jasu, která má přibližně kruhový charakter. Zabírá kolem jedné sedminy z celkové plochy obrazu a je soustředěna do prostoru s nejvyšším rozptylem jasových hodnot. To je způsobeno velkým počtem očních cév v prostoru OD.

10.1 Střední rozptyl

Tato metoda je založena na výpočtu středního rozptylu jasu v obraze. Výsledný obraz $g(i,j)$ je definován podle vzorce (8).

$$g(i,j) = \frac{1}{M^2} \sum_{(k,l) \in W(i,j)} \sigma^2(k,l) \quad (8)$$

Výstupní obraz tohoto lokálního operátoru je závislý na velikosti submatice použité pro výpočet. Na následujících obrázcích (Obr.7) jsou uvedeny příklady použití různých submatic v závislosti na výsledném obrázku.



(a) $M = 20$

(b) $M = 80$

Obr.7. Obrázky závislosti obrazu středního rozptylu na velikosti masky

10.1.1 Pseudo-kód programu středni rozptyl

in = načti obrázek;

N = velikost použité masky;

```
for i = 1..sloupce
```

```
  for j = 1..řádky
```

```
    hodnota = hodnota obrazu na pozici (i,j);
```

```
    maska = výběr okolí kolem aktuální polohy(i-N:i+N,j-N:j+N);
```

```
    rozptyl = výpočet rozptylu z okolí;
```

```
  end
```

```
end
```

```
M = definuj velikost masky 2;
```

```
for i = 1..sloupce
```

```
  for j = 1..řádky
```

```
    hodnota = hodnota obrazu rozptylu na pozici (i,j);
```



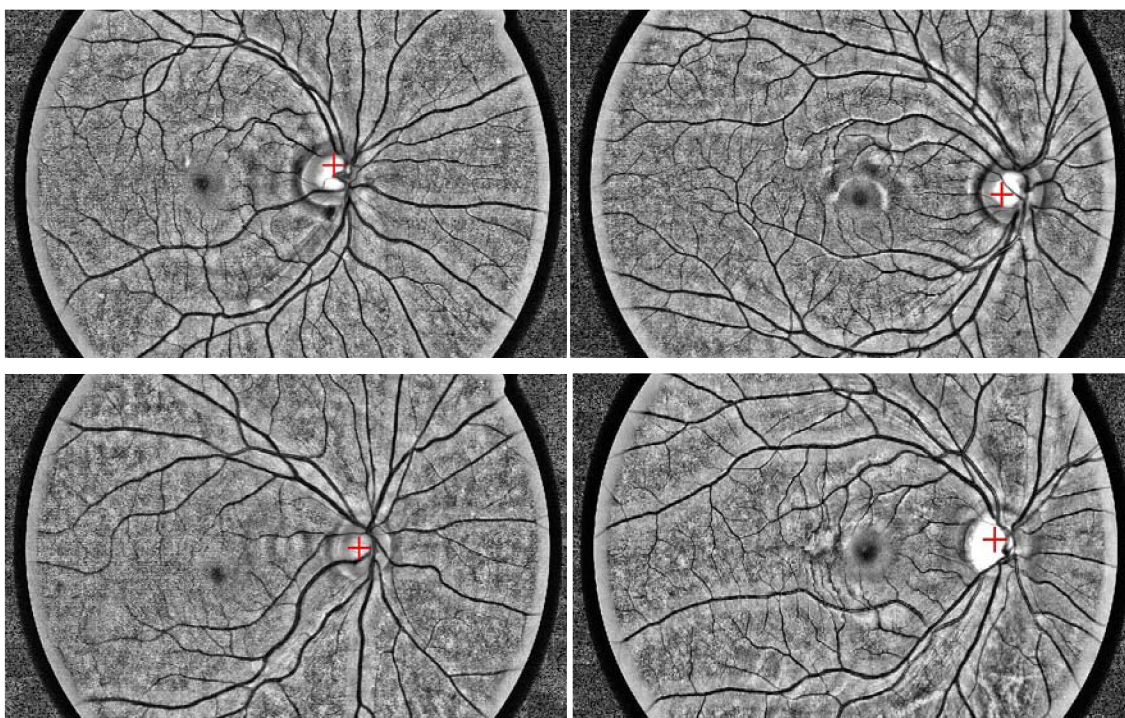
```

maska2 = výběr okolí kolem aktuální polohy (i-M:i+M,j-M:j+M);
průměr = výpočet střední hodnoty z okolí;
end
end
end

```

10.2 Lokalizace OD konvolucí s maskou

Tato metoda popisuje využití výpočtu konvoluce (kap.10.2.3) k hledání přibližného středu OD. Přibližný střed OD je nalezen v bodě maxima výstupu konvoluce obrazu LZK s maskou. Masku je navržena jako matice jedniček o velikosti 30x30 pixelů. Tato maska je zvolena z důvodu korespondence místa OD s nejjasnějším místem v obraze (Obr.8).



Obr.8. Výsledné obrázky detekce slepé skvrny

10.2.1 Pseudo-kód programu detekce slepé skvrny

in = načti obrázek;

LZK = načti obrázek lokálního zvýšení kontrastu;

pom = vytvoř matici jedniček 30 x 30;

konvoluce = proved' konvoluci obrázku LZK s pom;

x, y = najdi maximální bod výstupního obrázku konvoluce;

10.2.2 Problémy programu a jejich řešení

U tohoto algoritmu se naskytá problém s přesvětlením snímku vlivem nedokonalého nafocení. To se projevuje vysokými jasovými hodnotami na okrajích snímku. Tento problém se řeší novým nasnímáním sítnice.

10.2.3 Konvoluce v diskretním obraze

Operátor konvoluce je vlastně matematický operátor zpracovávající dvě funkce. Diskrétní konvoluce v obraze má tvar podle vzorce (9).

$$f(i, j) * h(i, j) = \sum_{m=-k}^k \sum_{n=-k}^k f(i-m, j-n) \cdot h(i, j) \quad (9)$$

V případě diskretní konvoluce lze jádro chápat jako tabulku (konvoluční masku), kterou položíme na příslušné místo obrazu. Každý pixel překrytý maskou vynásobíme koeficientem v příslušné buňce a provedeme součet všech těchto hodnot. Tím dostaneme jeden nový pixel. Posouváním masky po celém obraze dostaneme kompletní výstupní obraz.

Z důvodu nechtěné změny velikosti výstupního obrazu je nutné vstupní obrázek doplnit na okrajích nulami, v závislosti na velikosti masky.

11 Detekce žluté skvrny

Žlutá skvrna oka se na obrázku sítnice projevuje jako nejtmaší oblast. V dalším textu je nejprve vysvětlena operace prahování a následně je rozepsána metoda detekce pomocí korelačních koeficientů.

11.1 Globální prahování

Český název byl převzat z anglického Global Thresholding. Vstupem operace prahování je typicky obraz v odstínech šedi. Metoda je charakteristická tím, že do ní vstupuje jediný parametr, známý jako globální prahová hodnota. V tomto případě je každý pixel obrazu porovnáván s touto prahovou hodnotou. Pokud je intenzita bodu vyšší než prahová hodnota, je barva bodu nastavena na bílou, v opačném případě je bodu přiřazena černá barva.

Prahování je dáno předpisem:

$$f(c) = \begin{cases} A \rightarrow \text{pokud } -c < \text{prah} \\ B \rightarrow \text{pokud } -c \geq \text{prah} \end{cases} \quad (10)$$

kde c je vstupní hodnota jasu nebo barvy, $f(c)$ je výsledná hodnota, prah je prahovací hodnota, A a B jsou nové hodnoty pro vstupní hodnotu c pod a nad prahem. Hodnotu prahu lze například určit z jasového histogramu obrázku.

11.2 Detekce pomocí korelační matice

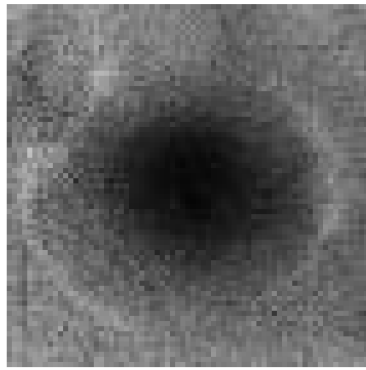
Tato metoda využívá znalosti tvaru a rozložení intenzity ŽS. Je založena na postupném srovnávání obrazu s takzvanou šablonou, což je maska s uspořádáním jasových hodnot odvozených z tvaru žluté skvrny (Obr.9b). Výsledné obrázky detekce jsou na obrázcích 11.

11.2.1 Vytvoření šablony

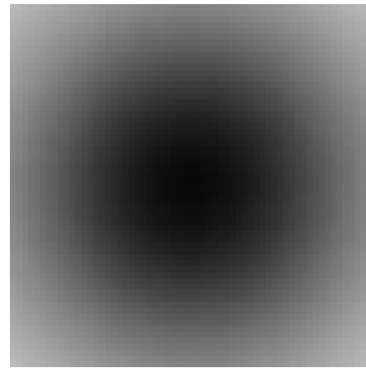
Šablona je vytvořena následujícím postupem:

- Vytvoření výřezu žluté skvrny (střed obrázku odpovídá středu skvrny)
- Zprůměrnování tří výřezů z různých vstupních obrázků (Obr.9a)
- Vytvoření vodorovného a svislého řezu ve středu obrázku
- Aproximace řezu Gaussovskou funkcí (nalezení daných parametrů) (Obr.10)
- Vytvoření 2D funkce šablony (11) (Obr.9b)

$$g(m, n) = C \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{(m^2 + n^2)}{2 \cdot \sigma^2}\right) \right) \quad (11)$$

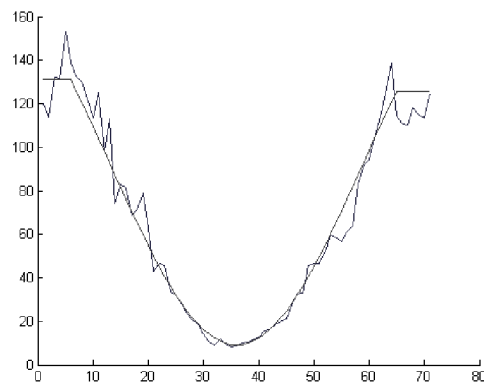


(a) Zprůměrované hodnoty ŽS



(b) Výsledná šablona

Obr.9. Vytvoření šablony pro nalezení ŽS



Obr.10. Obrázek aproximace řezu zprůměrované ŽS

11.2.2 Program vytvoření šablony

```
in1 = načti obrázek 1;
in2 = načti obrázek 2;
in3 = načti obrázek 3;
N = definuj velikost výřezu;
```

```
[x1,y1] = nalezení souřadnic středu obrázku 1;
[x2,y2] = nalezení souřadnic středu obrázku 2;
[x3,y3] = nalezení souřadnic středu obrázku 3;
```

```
výřez_in1 = definování výřezu z obrázku 1(x1-N:x1+N, y1-N:y1+N)
výřez_in2 = definování výřezu z obrázku 2(x2-N:x2+N, y2-N:y2+N)
výřez_in3 = definování výřezu z obrázku 3(x3-N:x3+N, y3-N:y3+N)
výřez_průměr = spočítej průměr ze všech výřezů;
```

Aproximace Gaussovou křivkou

```
výřez_průměr = načti obrázek průměrného výřezu;
[x,y] = nalezení souřadnic středu průměrného výřezu;
řez_vertical = definování vektoru vertikálního řezu obrázkem(:,y)
řez_horizontal = definování vektoru horizontálního řezu obrázkem(x,:)
řez_prumer = vypočítej průměrnou hodnotu řezu;
```

```
for A = hodnoty parametru A
  for ro = hodnoty parametru ro
    for C = hodnoty parametru C
```

```

    funkce = vypočítej funkci pro dané parametry;
    řez_funkce = proved' řez funkcí(x,:);
    odchylka = vypočítej odchylku řezu funkce od průměrného řezu z obr.;
end
end
end

```

```

A,ro,C = stanov hodnoty proměnných pro minimalní odchylku;
for m = souřadnice řádků
    for n = souřadnice sloupců
        šablona = vytvoř danou funkci pro hodnoty parametru A,ro,C;
    end
end
end

```

11.2.3 Matice korelačních koeficientů

Míru závislosti dvou obrazů poznáme z tzv. *korelační matice* \mathbf{R} , jejíž prvky (koeficienty lineární korelace) získáme z prvků kovarianční matice jako (12).

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(x_i, x_j)}{\sqrt{\sigma_i^2 \cdot \sigma_j^2}} \quad (12)$$

Předpokládáme, že variance σ_i^2, σ_j^2 nejsou rovny nule $\sigma_i^2 \neq 0, \sigma_j^2 \neq 0$.

Korelační matice je symetrická. Protože $\text{cov}(x_i, x_i) = \sigma_i^2$, jsou prvky na hlavní diagonále rovny jedné $\rho_{ii} = 1$. Prvky mimo diagonálu leží v intervalu $[-1,1]$. Pokud je koeficient korelace roven nule, jsou příslušné složky vektoru \bar{x} nekorelované. Nulová hodnota korelačního koeficientu je nutnou, ale nikoli postačující podmínkou pro nezávislost veličin, proto o složkách vektoru \bar{x} ani při nulové hodnotě ρ_{ij} nemůžeme říct, že jsou nezávislé (může existovat nelineární závislost). Čím více se koeficient korelace v absolutní hodnotě blíží jedničce, tím více jsou složky vektoru vzájemně korelované a lineárně závislé [7].

11.2.4 Program pro detekci žluté skvrny

```

in = načti obrázek;
šablona = načti šablonu;
N = velikost šablony;

for i = 1..sloupce
    for j = 1..řádky
        hodnota = hodnota obrazu na pozici (i,j);
        maska = výběr okolí kolem aktuální polohy(i-N:i+N,j-N:j+N);
        korelační_matice = vypočítej korelační matici koeficientů z oblasti masky;
        korelace = vypočítej součet všech hodnot v masce;
    end
end

detekce_ŽS = najdi maximální hodnotu korelační matice;

```

11.2.5 Výsledné obrázky detekce



Obr.11. Výsledné obrázky detekce žluté skvrny

12 Houghova transformace

Houghova transformace (HT) je metoda pro nalezení parametrického popisu objektů v obraze. Při implementaci je třeba znát analytický popis tvaru hledaného objektu. Proto je tato metoda používána pro detekci jednoduchých objektů v obraze, jakou jsou přímky, kružnice, elipsy, atd.. HT je používána především pro segmentaci objektů, jejichž hranice lze popsat jednoduchými křivkami. Hlavní výhodou této metody je robustnost vůči nepravidelnostem a porušení hledané křivky.

Houghova transformace je využívána k nalezení parametrů matematického modelu hledaného objektu za předpokladu známých vstupních dat (pixelů) [5].

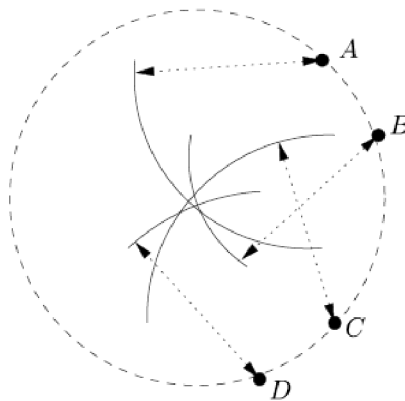
12.1 Houghova transformace pro kružnici

Kružnice v ploše je dána rovnicí (13). Jedná se o dopředné mapování, které vyjadřuje, že pro každý bod (x,y) , který leží na kružnici o středu (x_c,y_c) a poloměru r platí, že vzájemná vzdálenost bodu (x,y) a středu (x_c,y_c) je r .

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2 \quad (13)$$

Zpětné mapování oproti tomu vyjadřuje skutečnost, že pro každou kružnici, která prochází bodem (x,y) platí, že vzdálenost jejího středu od tohoto bodu je rovna jejímu poloměru.

Lze tedy navrhnout generický algoritmus, který pro každý bod F_j inkrementuje buňky (x_c, y_c, r) akumulátoru takové, že $d((x_c, y_c), F_j) = r$. Ty představují kružnice o středech vzdálených od F_j o poloměru $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$. Obrázek 12 naznačuje tento proces. Pokud kružnice obdrží dostatečné množství hlasů – např. alespoň tolik, kolik představuje jistá daná procentuální část diskrétní délky jejího obvodu – je shledána kandidátem na instanci vstupního prostoru.



Obr.12. Proces Houghovy transformace

12.2 Detekce hran pro Houghovu transformaci

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 [5].

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)
- Jednoznačnost (odezva na jednu hranu musí být jedna, nesmí docházet ke zdvojení)

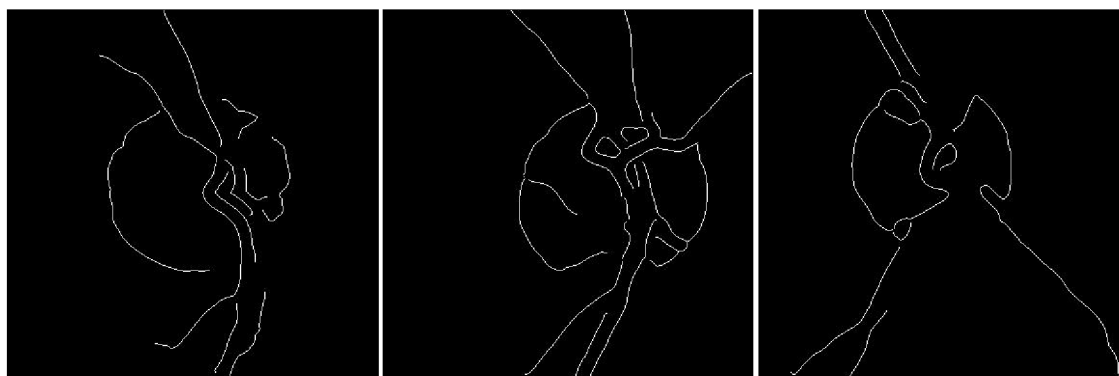
Postup pro Cannyho detekci:

- Eliminace šumu (Gaussovým filtrem)
- Určení gradientu (první derivace)
- Nalezení lokálních maxim
- Eliminace nevýznamných hran (prahování)

12.2.1 Nastavení Cannyho detektoru

Při testování parametrů Cannyho detektoru se došlo k následujícím hodnotám. Hodnota rozptylu pro Gaussovský filtr je nevhodněji nastavena na číslo 3.6 a hodnota prahu 0.475. Při těchto hodnotách Cannyho detektoru se výsledná hranová reprezentace jevila pro následné zpracování nevhodnější. Výsledná hranová reprezentace výřezu vstupního obrazu je vidět na obrázcích 13. Tyto obrázky jsou vzaty z první databáze.

Detekce hran u těchto obrázků je prováděna na R-složce vstupního RGB obrázku. Je to z důvodu nejlépe viditelného OD v obraze. U druhé databáze je program detekce hran aplikován na R+G složku obrazu. Tato neshoda je zapříčiněna rozdílnými charakteristikami skenovací jednotky.



Obr.13. Výstup Cannyho detektoru

12.2.2 Problémy programu a jejich řešení

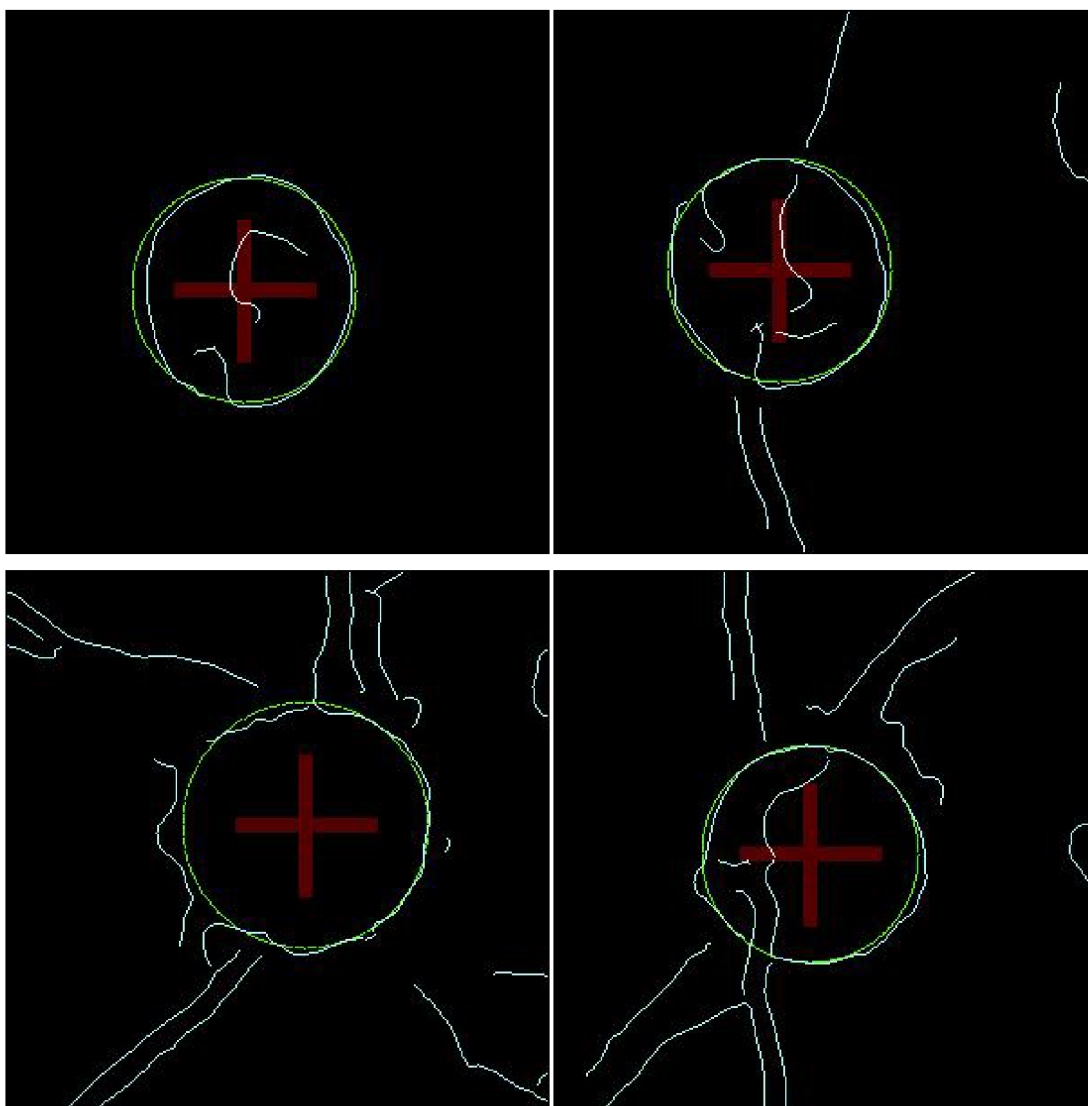
U tohoto programu nastal problém u vytváření hranové reprezentace z R-složky přesvětleného obrázku. R-složka se používá z důvodu nejlepší viditelnosti hran slepé skvrny.

Při zkoumání možností řešení tohoto problému se došlo k závěru - pokud je obrázek přesvětlen použije se k detekci hran R+G složka RGB obrázku, jako je tomu u obrázků z 2. databáze.

12.3 Výsledky Houghovy transformace

Na obrázcích 14 jsou uvedeny výsledné kružnice HT (zeleně) v obrazu hranové reprezentace. Z hlediska znalosti o možném poloměru hledané kružnice je program

nastaven tak, aby se nehledali kružnice průměru menšího 50 pixelů a většího než 110 pixelů. Tyto hodnoty jsou zvoleny v závislosti na odečtených hodnotách dostupných obrázků, u nichž poloměry dosahovali 65 – 97 pixelů.



Obr.14. Obrázky Houghovy transformace

12.3.1 Pseudo-kód programu Houghovy transformace

```
in = načtení_obrázku_hranové_reprezentace;
```

```
for = hledané_průměry_kružnic
```

```
    transformace_kružnice_do_prostoru;
```

```
    accumulator = zvednutí_hodnoty_pro_nalezený_bod;
```

```
end
```

```
y0detect = nalezení_y_souřadnice_maxima_akumulátoru;
```

```
x0detect = nalezení_x_souřadnice_maxima_akumulátoru;
```

```
vykreslení_kružnice_pro_daný_průměr;
```

13 Aktivní kontury

Aktivní kontura [8], je vlastně definovaná křivka uvnitř obrazu, která mění své vlastnosti na základě interních sil, 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. Aktivní kontury nalézají široké uplatnění v mnoha aplikacích, zahrnujících například hranovou detekci, tvarové modelování a segmentaci.

Dnes se v literatuře můžeme setkat s dvěmi základními modely aktivních kontur. Parametrické aktivní kontury a geometrické aktivní kontury.

Pro zpřesnění aproximační křivky vnější hranice OD je použita metoda parametrické aktivní kontury. Tato metoda je založena na minimalizaci energie křivky (14), která souvisí s hledanou hranicí objektu. Počáteční křivkou metody je kružnice daná body $\mathbf{v}(s) = [x(s), y(s)]$, kde $s \in [0, 1]$. Tyto hodnoty jsou určeny metodou HT (viz. kapitola 12). □

$$E_{AK} = \int_{s=0}^1 E_{INT}(\bar{\mathbf{v}}(s)) + E_{EXT}(\bar{\mathbf{v}}(s)) \cdot ds \quad (14)$$

Interní energetická funkce představuje sílu, která se snaží vnutit kontuře tvar a udržovat konstantní vzdálenost mezi body kontury. Externí energetická funkce je počítána ze vstupního obrazu jako jeho určitý charakterizující parametr. V uvedeném algoritmu jsou využity dvě externí síly. Jako první síla je zde použit výpočet odchylek směrů v obraze vytvořeného pomocí normalizované funkce gradient vector flow (GVF). Druhá externí síla představuje jakousi masku tvaru OD (viz. kapitoly dále).

13.1 Interní energetická funkce

Tato funkce představuje parametr hodnotící pružnost a rychlost vývoje kontury. Výpočet je dán podle vzorce (15). Tyto síly jsou funkcí koeficientů α a β , které představují váhy, definující závislost vývoje kontury na uvedených vlastnostech. Jejich hodnoty jsou nastaveny na $\alpha = 0.2$, $\beta = 36.6$. Čím větší je parametr α , tím větší je rozsah změn v příslušné oblasti kontury. Velikost parametru β definuje hladkost kontury. Pro větší β bude kontura hladší, tzn. bez ostrých hran.

$$E_{INT} = \alpha(s) \cdot \left| \frac{d\mathbf{v}(s)}{ds} \right|^2 + \beta(s) \cdot \left| \frac{d^2\mathbf{v}(s)}{ds^2} \right|^2 \quad (15)$$

Derivace prvního řádu je aproximována jako modul difference mezi středním prostorem bodů kontury a Eukleidovskou vzdáleností mezi současně vybraným obrazovým bodem \mathbf{v}_s a následujícím bodem kontury. Pomocí výběru vhodné hodnoty $\alpha(s)$ pro každý pixel kontury \mathbf{v}_s , to může kontrolovat prostor mezi body kontury.

První derivace, která je vypočítána pomocí rovnice (16), padá k nule, když je kontura rovnoměrně rozmístěna.

$$\left| \frac{dv(s)}{ds} \right|^2 = \left| \sum_{i=0}^{S-1} \frac{\|v_i - v_{i+1}\|}{S} - \|v_i - v_{i-1}\| \right| = \left| \sum_{i=0}^{S-1} \frac{\sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}}{S} - \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \right| \quad (16)$$

Druhá derivace může být vyjádřena jako odhad zakřivení mezi předcházejícím a dalším bodem kontury \mathbf{v}_{s+1} a \mathbf{v}_{s-1} a bodem \mathbf{v} lokálně vyšetřovaném bodu \mathbf{v}_s . V následujícím vztahu je uveden její výpočet.

$$\left| \frac{d^2v(s)}{ds} \right|^2 = (x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1})^2 + (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1})^2 \quad (17)$$

13.2 Gradient

Gradient je diferenciální operátor, jehož výsledkem je vektorové pole vyjadřující směr a velikost největší změny skalárního pole. Při formálním zápisu se používá operátor nabla ∇ .

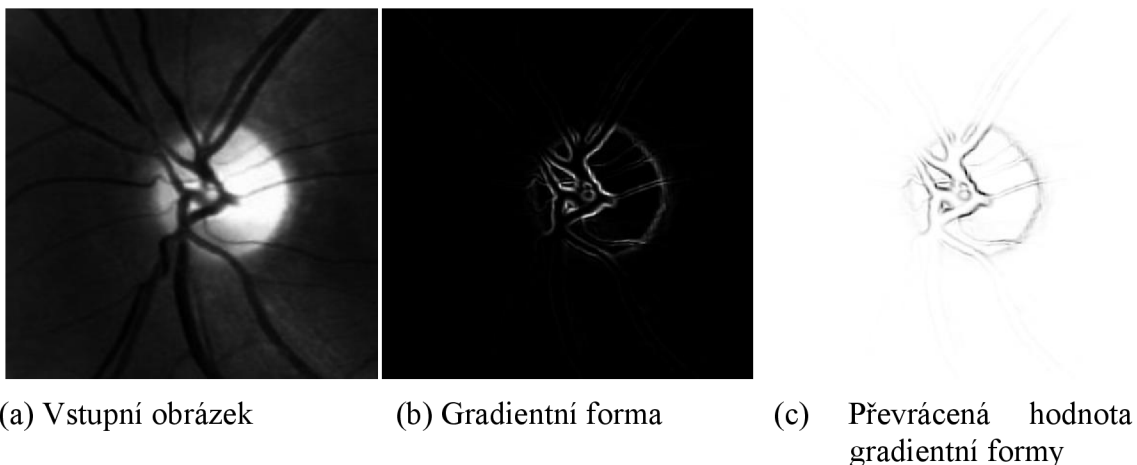
V souřadnicovém vyjádření je v daném místě gradientem vektor, jehož složky tvoří jednotlivé parciální derivace funkce, vyjadřující dané skalární pole. Pro trojrozměrné pole je gradient:

$$\nabla \phi = \text{grad} \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (18)$$

Přestože je gradient definován v kartézských souřadnicích, jde o invariantní veličinu, která nezávisí na volbě souřadné soustavy.

$$G(x, y) = \left(|f_x| + |f_y| \right)^2 \quad (19)$$

Na obrázku 15b je uvedena jasová forma prezentace gradientu jako druhé mocniny součtu absolutních hodnot jeho složek (f_x, f_y) (19). Převrácená hodnota tohoto obrazu je na obr. 15c.



Obr.15. Absolutní hodnota součtu složek gradientu

Z obrázku je patrné, že tato gradientní forma (Obr.15c) nelze použít jako jedna z externích sil. V obrázku převládají hrany způsobené vysokým kontrastem OD a

očních cév. Vývoj bodů aktivní kontury by směřoval k minimální hodnotě jasů v obraze, která odpovídá pozici očních cév.

13.3 Funkce GVF

Gradient vector flow (GVF) [8] je funkce, v jejíž výsledku vznikne vektorové pole $\mathbf{v}(x,y) = [u(x,y),v(x,y)]$, definované jako minimalizace následující energetické funkce (20). Tato funkce vychází z gradientního obrazu (viz. kapitola 13.2).

$$\varepsilon = \iint \mu(u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2) + |\nabla f|^2 |v - \nabla f|^2 dx dy \quad (20)$$

Pro nalezení tohoto pole je rovnice přepsána pomocí Eulerových rovnic do numerické interpretace (21). Hodnoty f_x a f_y zde představují jednotlivé složky gradientního pole. Tyto složky jsou rovny počátečním bodům u_n a v_n výsledného GVF pole, které se dále vyvíjí na základě těchto rovnic.

$$\begin{aligned} b &= f_x^2 + f_y^2 \\ u_{n+1} &= u_n + 4\mu \nabla^2 u_n - (u_n - f_x) \cdot b \\ v_{n+1} &= v_n + 4\mu \nabla^2 v_n - (v_n - f_y) \cdot b \end{aligned} \quad (21)$$

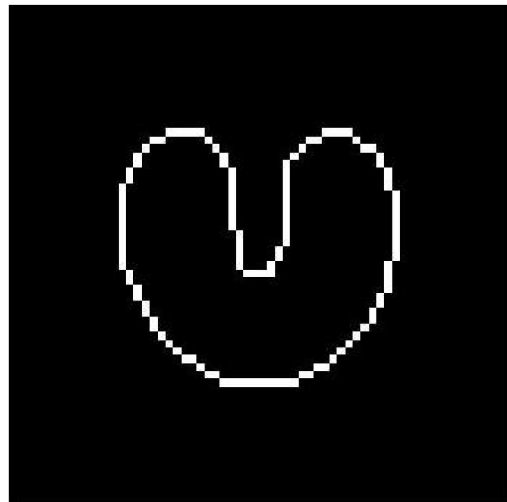
Jedná se o funkci, která hledá oblasti největších hran ve vstupním obraze a jednotlivé složky GVF obrazu směřují k těmto hranám. Parametry funkce GVF definují počet iterací n (nastaven na 60) a regulují vývoj GVF pole (koeficient μ). Tento koeficient je nastaven na 0.17.

$$\begin{aligned} mag &= \sqrt{u + v} \\ px &= u / (mag + 1 \cdot 10^{-10}) \\ py &= v / (mag + 1 \cdot 10^{-10}) \end{aligned} \quad (22)$$

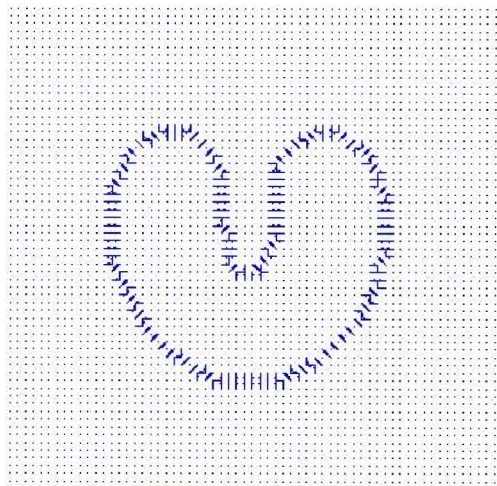
Na přiložených obrázcích (Obr.16) [8] je znázorněn rozdíl mezi obrazem gradientního pole a normalizovaného pole GVF. Normalizace pole GVF je provedena podle vzorce (22). Tato formulace zajistí stejnou velikost modulu složek GVF vektoru ve všech bodech obrazu.



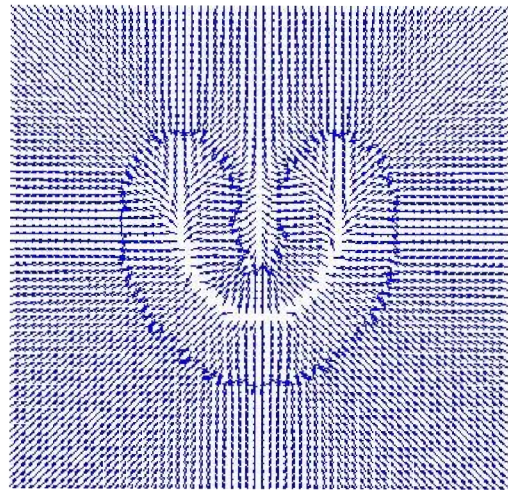
(a) Vstupní obrázek



(b) Inverzní vstupní obrázek



(c) Gradientní pole

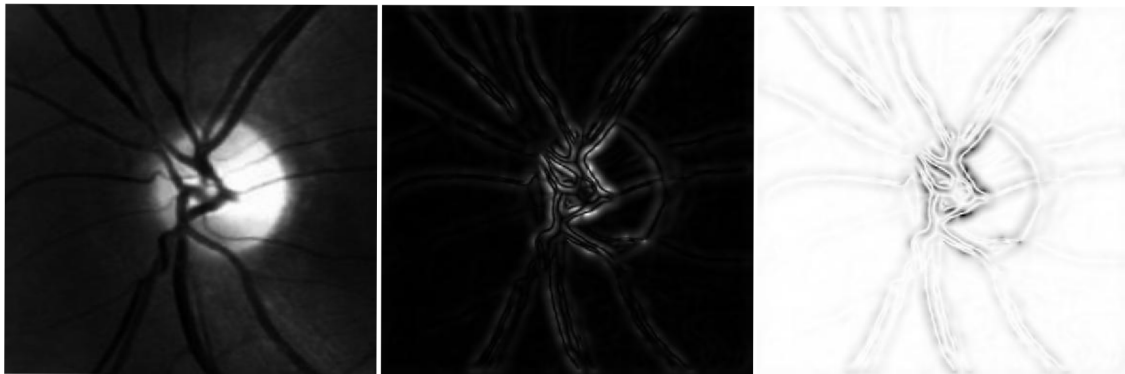


(d) Normované GVF pole

Obr.16. Vlastnosti funkce GVF

Jak je již patrné z ukázky GVF funkce, ani tato funkce nelze použít jako externí síla. Taktéž zde bude hlavní vliv vývoje aktivní kontury hrát přítomnost vysokokontrastních cév v obraze. Na následujících obrázcích (Obr.17) je vidět obraz funkce GVF vypočtená podle vzorce (23). Druhá mocnina je zde ve funkci zvýraznění kontrastu v obraze.

$$G(u, v) = (|u| + |v|)^2 \quad (23)$$



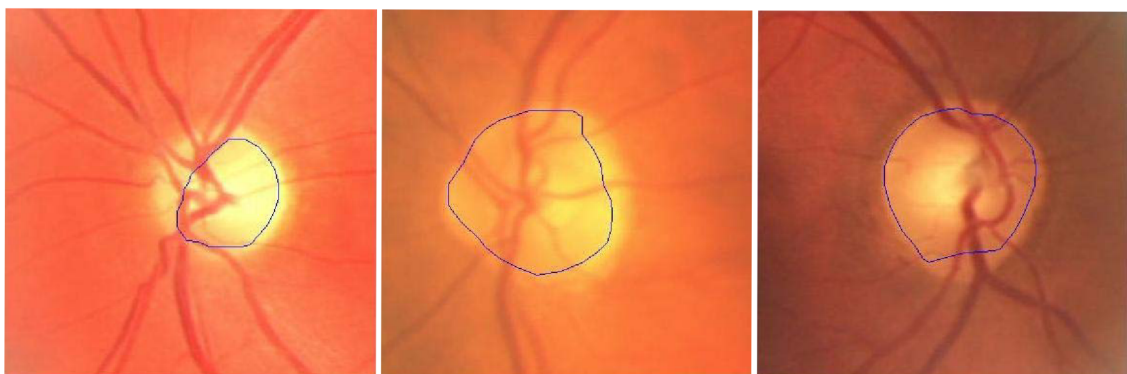
(a) Vstupní obrázek

(b) GVF forma

(c) Inverzní GVF forma

Obr.17. Externí síla $G(u, v)$

Na obrázcích 18 je znázorněna výsledná kontura po použití GVF funkce jako externí funkce aktivní kontury. Nežádoucím jevem je zde stahování kontury po cévách blíže ke středu OD.



Obr.18. Výsledná kontura při použití $G(u, v)$ funkce

13.4 Morfologické operace

Morfologické operace [4] se využívají při předzpracování a pozpracování obrazu. Dvě nezákladnější operace jsou erose a dilatace. Tyto dvě základní metody jsou stavebním článkem dalších metod, jako je například otevření a uzavření. Jedná se vlastně o nelineární operátory využívající masky. V následujících kapitolách je uveden jejich stručný popis.

Binární erose a dilatace jsou v Matlabu provedeny pomocí funkce `imerode` resp. `imdilate`. Parametry této funkce jsou: zpracováváný obraz, přírutek (úbytek) bodů a úhel, ve kterém se provádí erose (dilatace).

13.4.1 Binární erose

Tato operace je založena na porovnání určité masky (posouvající se po obraze) se vstupním obrazem. Na základě tohoto porovnání je dosazena 0 nebo 1 do středového bodu vyšetřované oblasti vstupního obrazu. Formalizovaná množinová formulace je:

$$Y = E_H(X) = \{x \mid H_x \subseteq X\} \quad (24)$$

Výsledkem této operace je např.: odstranění pruhů podél hranic objektů, odstranění výčnělků. Změny provedené pomocí této operace jsou ireverzibilní a vedou k celkovému zmenšení obrázku.

13.4.2 Binární dilatace

Operace binární dilatace je operace v principu stejná jako binární erose. Odlišnost je v použitých hodnotách masky. Formalizovaná množinová formulace je:

$$Y = D_H(X) = \{x \mid H_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (25)$$

Výsledek této operace je opačný než u erose.



(a) Originální obrázek

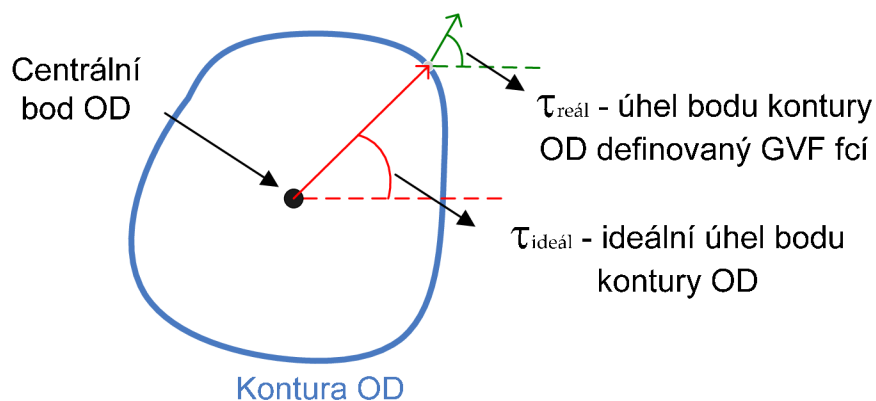
(b) Dilatace

(c) Erose

Obr.19. Morfologické operace

13.5 První externí síla

Jak už bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, tato externí síla vychází z obrázku vytvořeného funkcí GVF. Je založena na výpočtu odchylky ideálního a reálného směru normalizovaného vektoru GVF (Obr.20) (26).

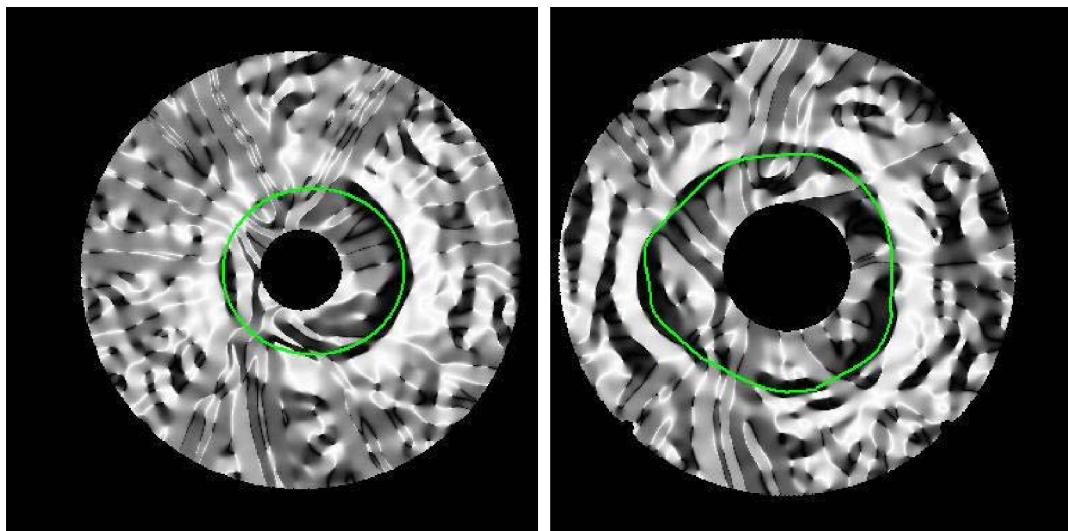


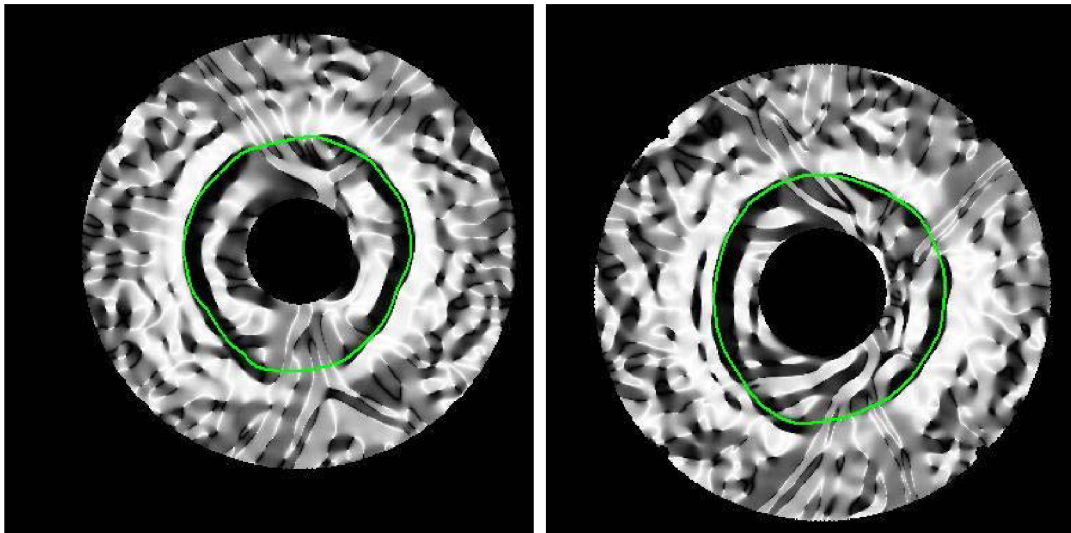
Obr.20. Ilustrace výpočtu první externí síly

Ideální směr bodu obrazu je dán výpočtem úhlu, který svírají souřadnice daného bodu s osou x . Tato osa je dána souřadnicemi středu OD vypočítaného pomocí HT. Reálný směr je dán směrem normalizovaného vektoru GVF obrazu v definovaném bodě.

$$E_{EXT}^1 = |\varepsilon - \pi|, \text{ kde } \varepsilon = |\tau_{ideal} - \tau_{real}| \quad (26)$$

Příklady takto vypočítané externí síly jsou uvedeny na obr. 21. Na těchto obrázcích jsou zeleně vyznačeny oblasti korespondující s hledanou konturou. Okolí, ve kterém se vypočítává externí síla, je vzato s ohledem na možnost odchylky vypočtené kružnice (HT) a hranice OD. Koeficient γ definující váhu této externí síly je nastaven na hodnotu 6.4.





Obr.21. Obrázky první externí síly

13.5.1 Programové řešení

In = načtení vstupního souboru;

In = vyhlazení vst. obrázku Gaussovým filtrem (7×7 pixelů, $\sigma = 3$);

Hrany = hranová reprezentace vstupního obrazu, operátor Prewitt (In);

[u,v] = výpočet koeficientů GVF funkce;

[px,py] = normalizace koeficientů u a v;

```

for i = 1...sloupce
  for j = 1..řádky
    Theta(i,j) = výpočet směru z px,py složky, arctan(py/px);
    Theta_b(i,j) = vypočet ideálního směru;
    EXT1(i,j) = abs ( | Theta(i,j) – Theta_b(i,j) | ) - pi;
  end
end
end

```

13.6 Druhá externí síla

Druhá externí síla představuje binární obraz definující oblasti, které souvisejí s hranicí OD. Tento obraz je vytvořen pomocí funkce, která se dělí na dvě části. V první části se vytvářejí pomocné obrazy. Ve druhé části je pomocí prahovacích a morfologických metod vytvořen obraz druhé externí síly. Koeficient δ definující váhu této externí síly je nastaven na hodnotu 6.

13.6.1 Otsu algoritmus (Metoda optimálního prahu)

Tato metoda je pojmenována podle Nobuyuki Otsu [9], který ji vymyslel. Vychází z relativního histogramu a je založena na statistických výpočtech. Předpokládá existenci dvou tříd C_0 a C_1 (body objektů a body pozadí) rozdělené prahem v hodnotě k , což znamená, že body patřící do třídy C_0 mají hodnotu jasu v intervalu $\langle 0, k - 1 \rangle$ a body ze třídy C_1 v intervalu $\langle k, J - 1 \rangle$. Hodnota J odpovídá počtu jasových úrovní obrazu. Potom tedy pravděpodobnost výskytu bodu ze třídy C_0 (označíme ji jako ω_0) je rovna

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{k-1} p_i = \omega(k) \quad (27)$$

a pravděpodobnosti výskytu ve třídě C_1 (označíme jako ω_1) odpovídá vztah

$$\omega_1 = \sum_{i=k}^{J-1} p_i = 1 - \omega(k) \quad (28)$$

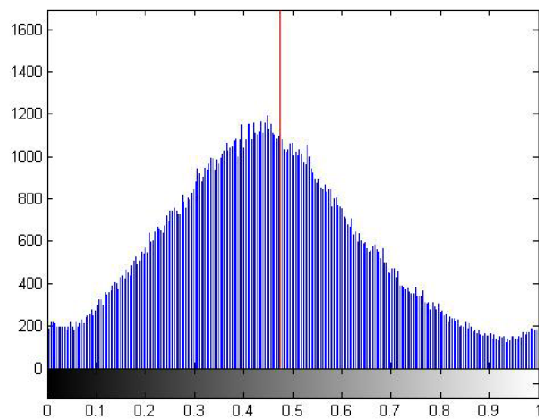
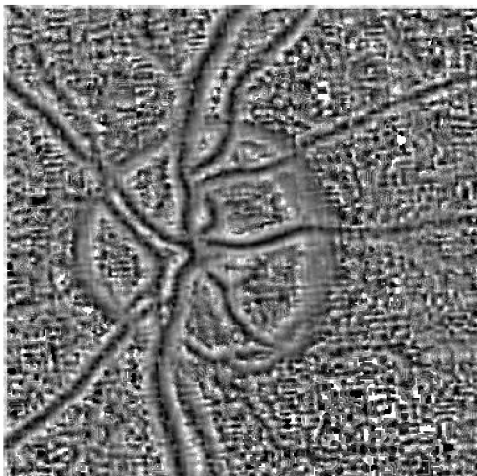
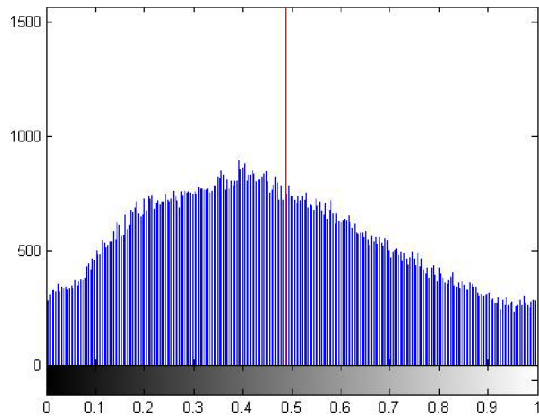
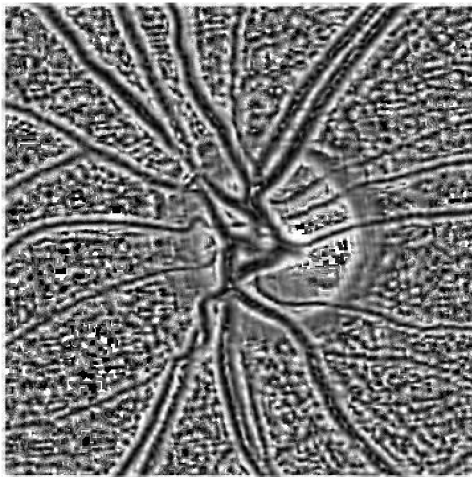
kde p_i je i -tá hodnota z relativního histogramu. Jelikož máme pouze dvě třídy, do nichž jsou všechny obrazové body rozděleny, platí vztah

$$\omega_0 + \omega_1 = 1 \quad (29)$$

Dále se zavádí takzvaná mezitřídová variance σ_B^2 , jejíž maximalizací získáme hodnotu prahu v histogramu.

$$\sigma_B^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \quad (30)$$

Hodnoty μ_0 , μ_1 vyjadřují střední hodnoty pro třídu C_0 , C_1 a hodnota μ_T vyjadřuje střední hodnotu celkovou. Hledanou prahovou hodnotu dostaneme vyhodnocením tohoto výrazu pro všechna $\langle k \in 0, J - 1 \rangle$ a nalezením takového k , pro které výraz nabude maximální hodnoty. Jedná se tedy o nalezení prahu v takovém místě histogramu, kde vzdálenost středních hodnot obou dvou tříd je maximální, a dochází tak k optimální separaci objektů a pozadí.



(a) LZK [M = 7 x 7]
prahem

(b) Histogram obr.a) s vypočteným Otsu

Obr.22. Obrázek LZK s Otsu prahovací hodnotou

13.6.2 Pomocné obrazy

K vytvoření výsledného obrazu je použita myšlenka vymaskování nežádoucích objektů z obrazu, který vznikne prahováním obrazu LZK. Tento obraz je vymaskován

pomocí funkce, která detekuje cévy v obraze. Z této úvahy je metoda rozdělena do dvou algoritmů, které jsou následně zpracovány ve výsledný obraz.

13.6.2.1 Algoritmus 1 (Obraz A)

První algoritmus popisuje vznik binárního obrazu, který vznikne prahováním obrazu LZK s oknem 54 x 54 pixelů. Takto zvolené okno je dáno kompromisem mezi náročností výpočtu a potřebnou kvalitou výsledného snímku (viz. kapitola 10). Pomocí Otsu algoritmu [9] (viz. kap. 13.6.2) se určí práh, který slouží k rozdělení jednotlivých stupňů šedi na hodnotu 0 a 1 (Obr.21).



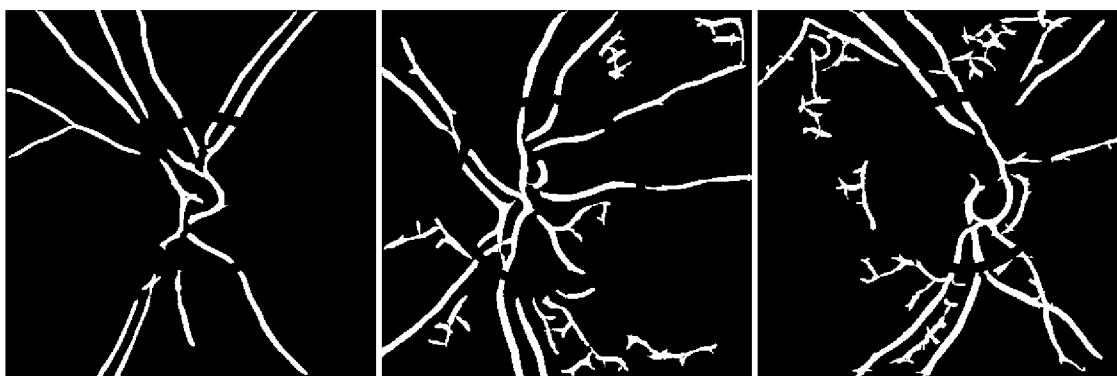
Obr.23. Obrázek A pro druhou externí sílu

13.6.2.2 Algoritmus 2 (Obraz B)

Tato část programu využívá operaci konvoluce obrazu s maskou k nalezení cév v obraze. Masky je zvolena jako průměrná aproximativní hodnota průřezu cév. Jako aproximační funkce je zde využita Gaussova funkce s koeficientem $\sigma = 7$ [10]. Velikost masky je 6 x 6 pixelů.

Ke stanovení práhu, při prahování výsledné konvoluční matice, je použit opět Otsu algoritmus. Dále jsou nulovány body ležící na kružnici definované HT spolu s body, které leží v těsné blízkosti.

Na závěr je provedena morfologická operace dilatace z důvodu odstranění nepřesností lícování cév přes sebe. Parametry dilatace jsou nastaveny na hodnoty velikost nárustu 10 a úhel 45°.



Obr.24. Algoritmus 2 pro druhou externí sílu

13.6.3 Výsledný obraz

Výsledný obraz (Obr.25) je směsicí obrazu A (Algoritmus 1) a B (Algoritmus 2). Jedná se o sečtení těchto dvou obrazů a jejich následné prahování s globálně určeným prahem 1. Jde vlastně o vymaskování oblastí cév z obrazu A.

Následně jsou na obrázku použity operace dilatace – erose, z důvodu zacelení výčnělků na křivkách a přiblížení černých oblastí ke středu OD. Tyto operace jsou zavedeny z důvodu neostré hranice OD v RGB obrázku. Parametry těchto operací jsou nastaveny na hodnoty nárůstu (resp. zúžení) 12 v úhlech 90° .



Obr.25. Výsledný obraz druhé externí síly

13.7 Algoritmus aktivních kontur

Vlastní algoritmus aktivních kontur je založen na myšlence postupného hledání takové křivky v obraze, která má nejmenší energii danou rovnicí (13).

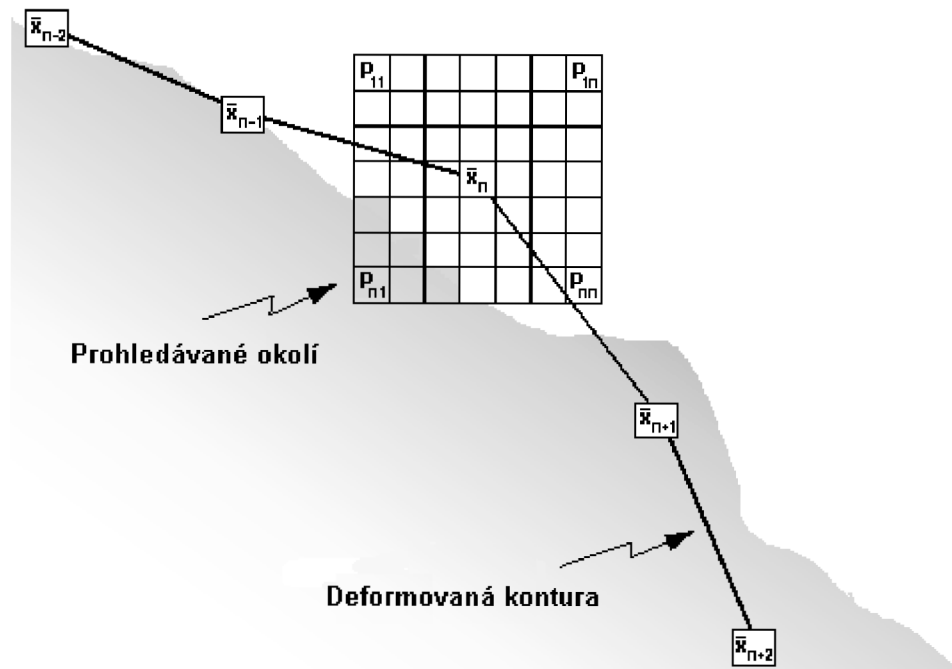
13.7.1. Specifikace a nadeklarování bodů počáteční kontury

Jedná se o několik bodů z počáteční definované kontury. V našem případě se jedná o rovnoměrně rozmístěných 27 bodů z kružnice definované pomocí HT. Tyto body mohou být načteny manuálně a nebo pomocí automatického rozdělení po kružnici. Algoritmus aktivní kontury, který rozvíjí křivku v iterativní chování pomocí lokálního okolí, hledá v okolí kontury body pro nastavení nové kontury, která bude mít menší energii E_{AK} . V každé iteraci se všechny body kontury vyvíjejí a proces se vrací k prvnímu bodu. Indexy bodů aktivní kontury jsou vypočteny jako modulo N (počet bodu AK).

Pro body aktivní kontury \mathbf{v}_s (pro všechna s náležející do skupiny 0 až N-1) se minimalizuje energetická funkce.

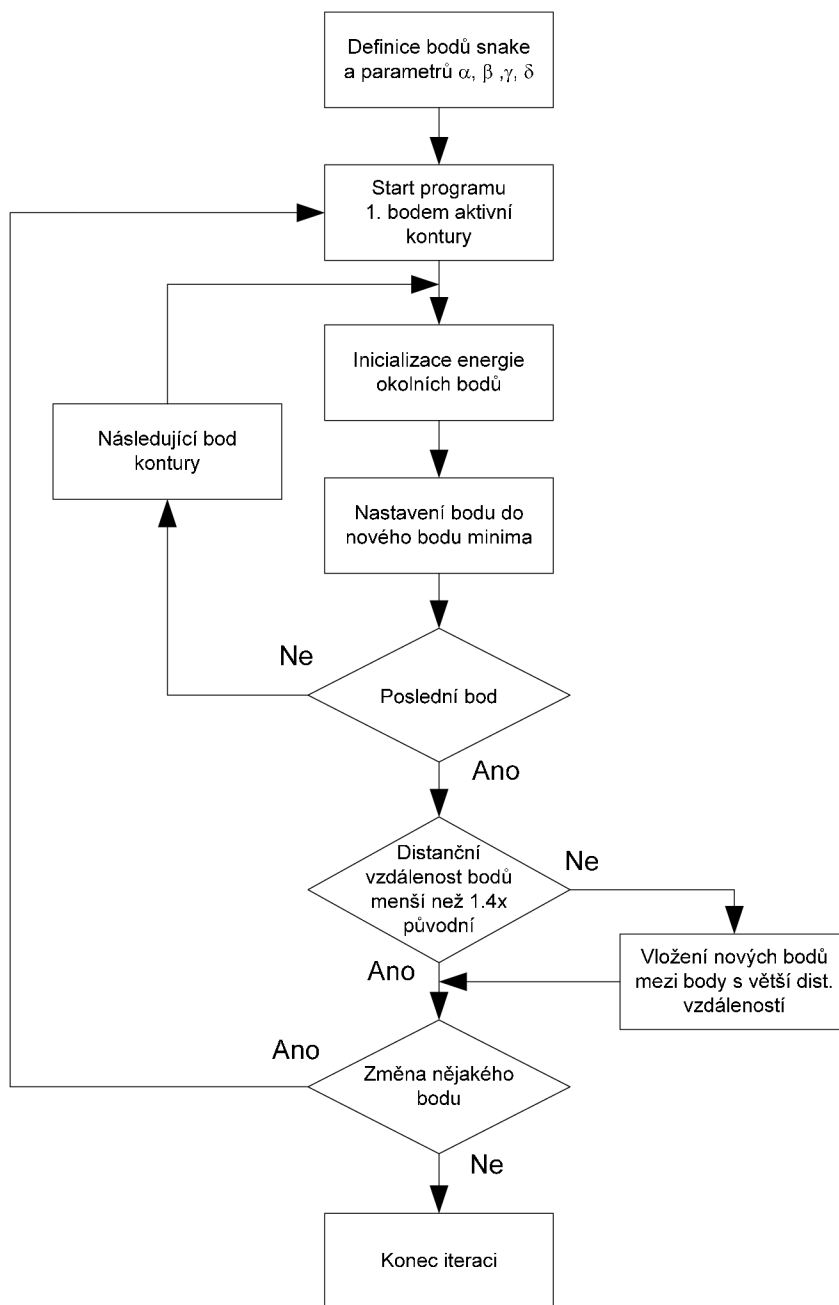
13.7.2 Vývoj algoritmu

Všechny body tvořící aktivní konturu mění svoji pozici. Možnost posunutí je závislá jak na okolí, v kterém se prohledává (body p_{11} až p_{mm}), tak na interních a externích silách (Obr.26). Tyto síly se vypočítávají v každém bodu definovaného okolí a následně se vyhodnotí jejich energetická hodnota. Bod okolí s nejnižší energetickou hodnotou se stává novým bodem aktivní kontury. Pro tento bod se vypočítá distanční vzdálenost od sousedních bodů kontury a v závislosti na porovnání se střední distanční vzdáleností všech bodů kontury se přidává další bod. Tento bod se přidává mezi body s větší distanční vzdáleností nežli je prahová. Prahová vzdálenost je nastavena na 1.4 násobek střední distanční vzdálenosti. Samotný program aktivních kontur je dán vývojovým diagramem podle obrázku 27.



Obr.26. Vývoj algoritmu aktivních kontur

13.7.3 Vývojový diagram AK

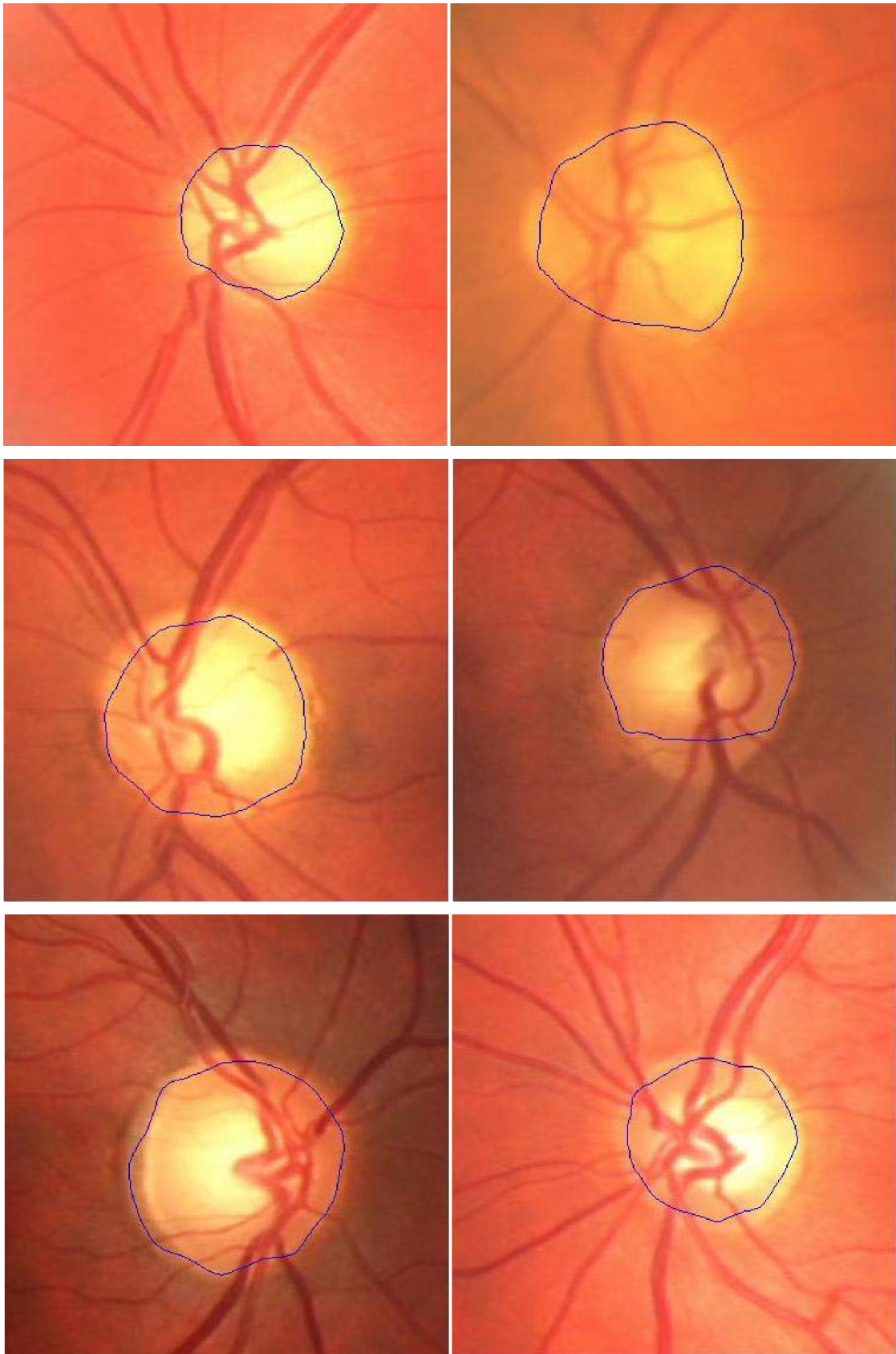


Obr.27. Vývojový diagram aktivní kontury

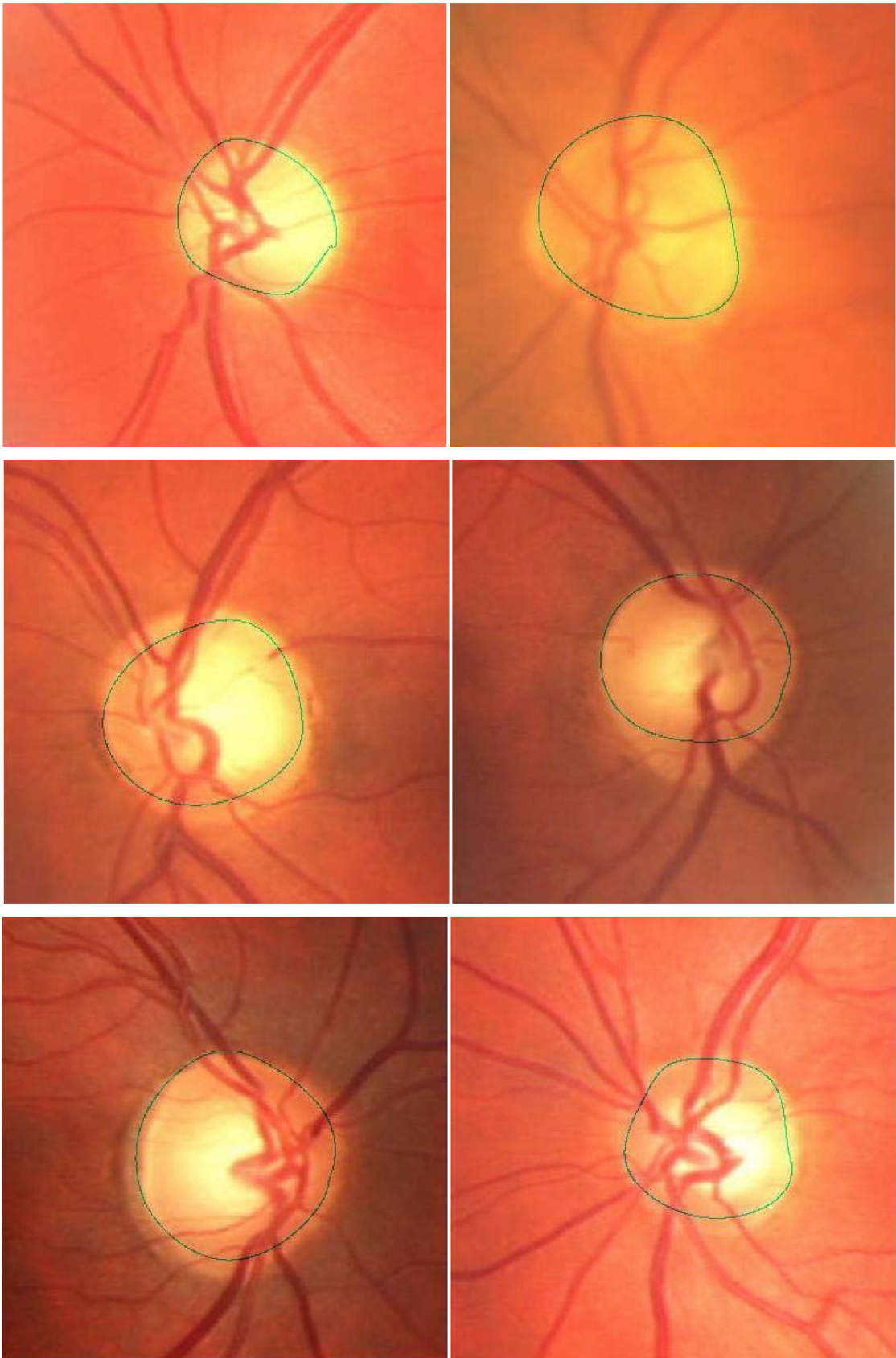
13.8 Výsledky detekce OD

Na obrázcích 28 jsou vidět křivky nalezené pomocí algoritmu aktivních kontur. Z obrázku je patrné, že křivky nejsou hladké. Je to způsobeno nedostatečně velkou vahou koeficientu β . Tento koeficient však nemůže být nastavován na příliš vysokou hodnotu z důvodu setrvávání křivky v kruhovém tvaru.

Tento problém je vyřešen pomocí výběru každého čtvrtého prvku křivky a následné interpolace bodů splajnovou křivkou. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 29.



Obr.28. Ukázky výsledné kontury



Obr.29. Výsledná kontura po interpolaci splajn křivkou

14 Hodnocení algoritmu

Po realizaci algoritmu aktivních kontur je potřeba výsledky nějak hodnotit. Tímto problémem se zabývá tato kapitola. Kritériem hodnocení je kontura označená lékařem. Vzájemná poloha detekované křivky a křivky správné je vidět na obrázku 34. Modrá křivka představuje křivku označenou lékařem, zelená křivka námi detekovanou konturu.

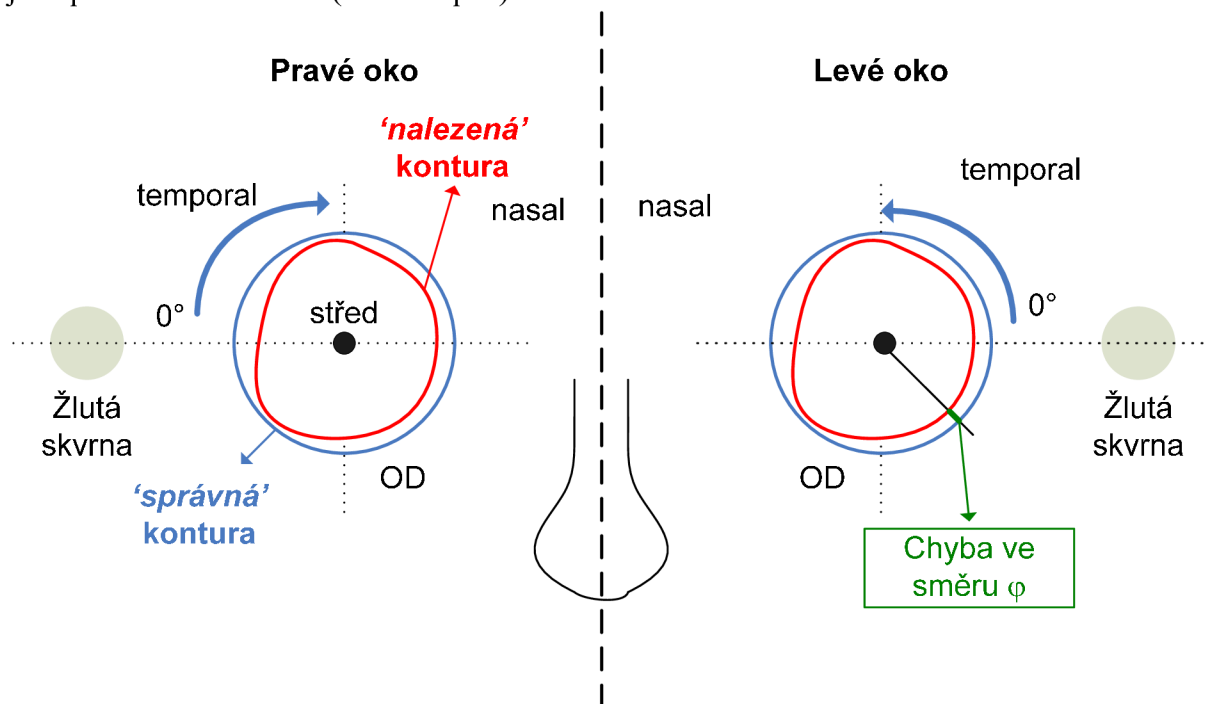
Prvním hodnotícím parametrem je chyba plochy vyjádřená v procentech. Jedná se o rozdíl plochy kontury správné a kontury detekované (nalezené) pomocí AK (30). Tato chyba vyšla $CHYBA_{plochy} = 14.15\%$.

$$CHYBA_{plochy} = 100 \cdot \frac{|S_{správná} - S_{detekovaná}|}{S_{správná}} \quad (30)$$

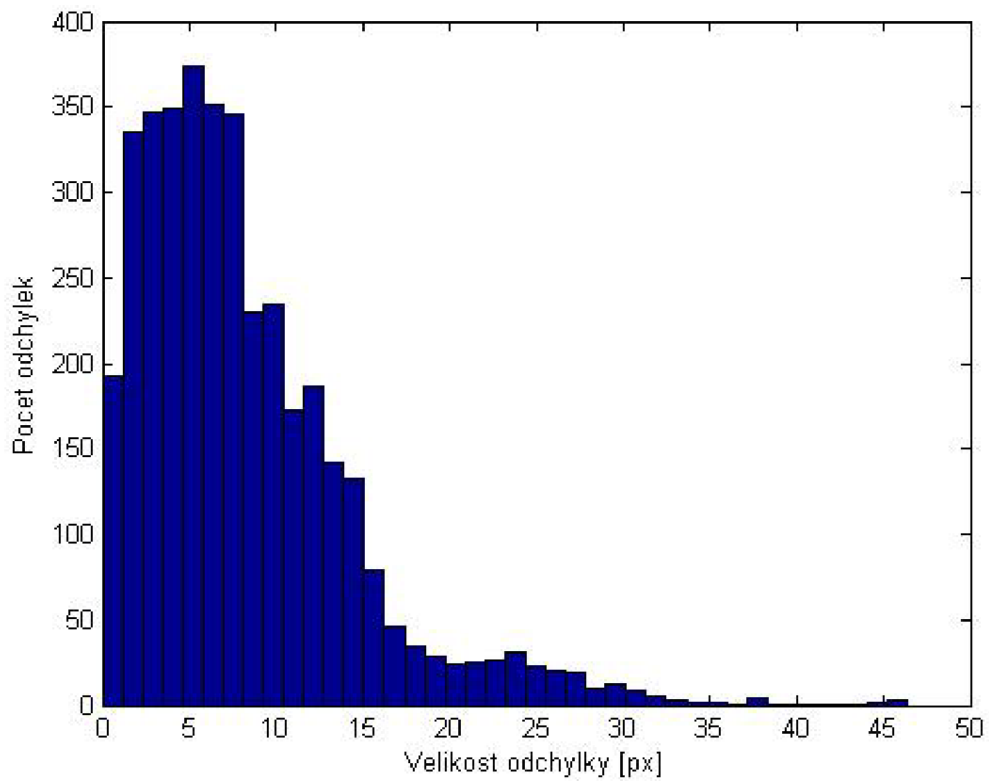
Druhým hodnotícím parametrem je střední hodnota rozdílových vzdáleností bodů x_i a y_i správné kontury a bodů x_i a y_i detekované kontury normalizovaná délkou správné kontury (31). Výpočet této chyby je názorně uveden na obrázku 30. Střední hodnota této odchylky je $CHYBA_{délky} = 2.22\%$.

$$CHYBA_{délky} = 100 \cdot \frac{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{(x_i^{správná} - x_i^{detekovaná})^2 + (y_i^{správná} - y_i^{detekovaná})^2}}{\text{Délka správné kontury}} \quad (31)$$

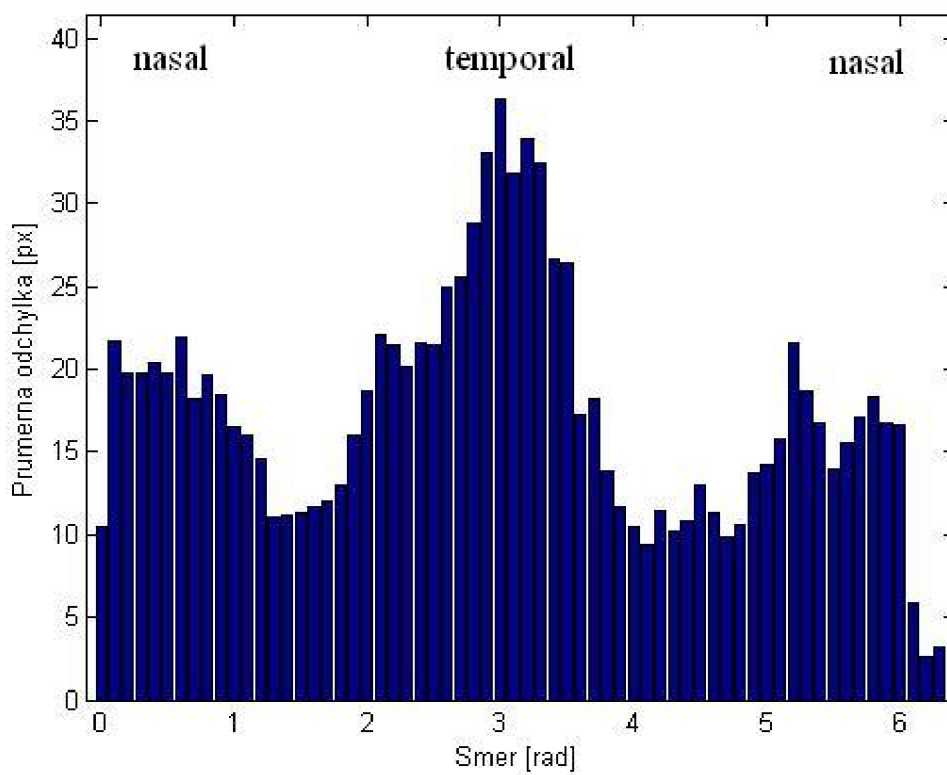
Tento algoritmus byl testovaný na 40 obrázcích. Pro každý bod výsledné kontury byla vypočítána vzdálenost od bodu kontury označené lékařem ležící na společné přímce procházející středem OD. Tyto hodnoty jsou pro všechny snímky uvedeny v histogramu (Obr.31). Dále jsou tyto odchylky uvedeny zvlášť pro pravé a levé oko v závislosti na úhlu bodu od kladné osy x (Obr.32,33). Směry hodnocení chyby jsou patrné z obrázku 30 (modrá šipka).



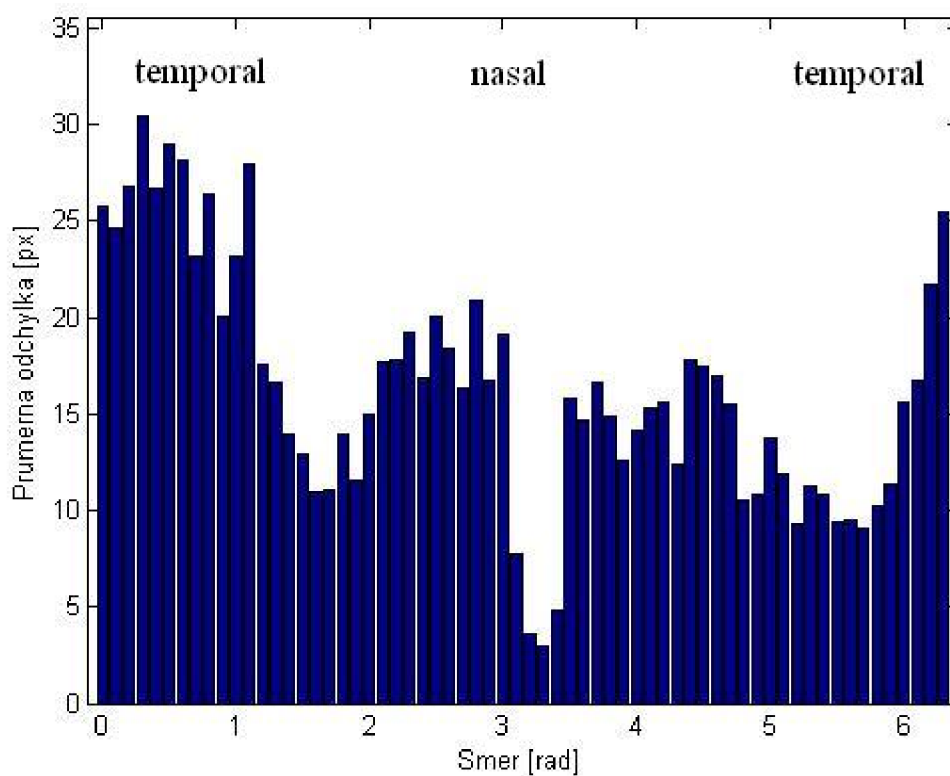
Obr.30. Schématická ukázka levého a pravého oka, výpočet chyby vzdálenosti bodů



Obr.31. Histogram velikosti chyb kontury



Obr.32. Velikost chyby levého oka v závislosti na úhlu



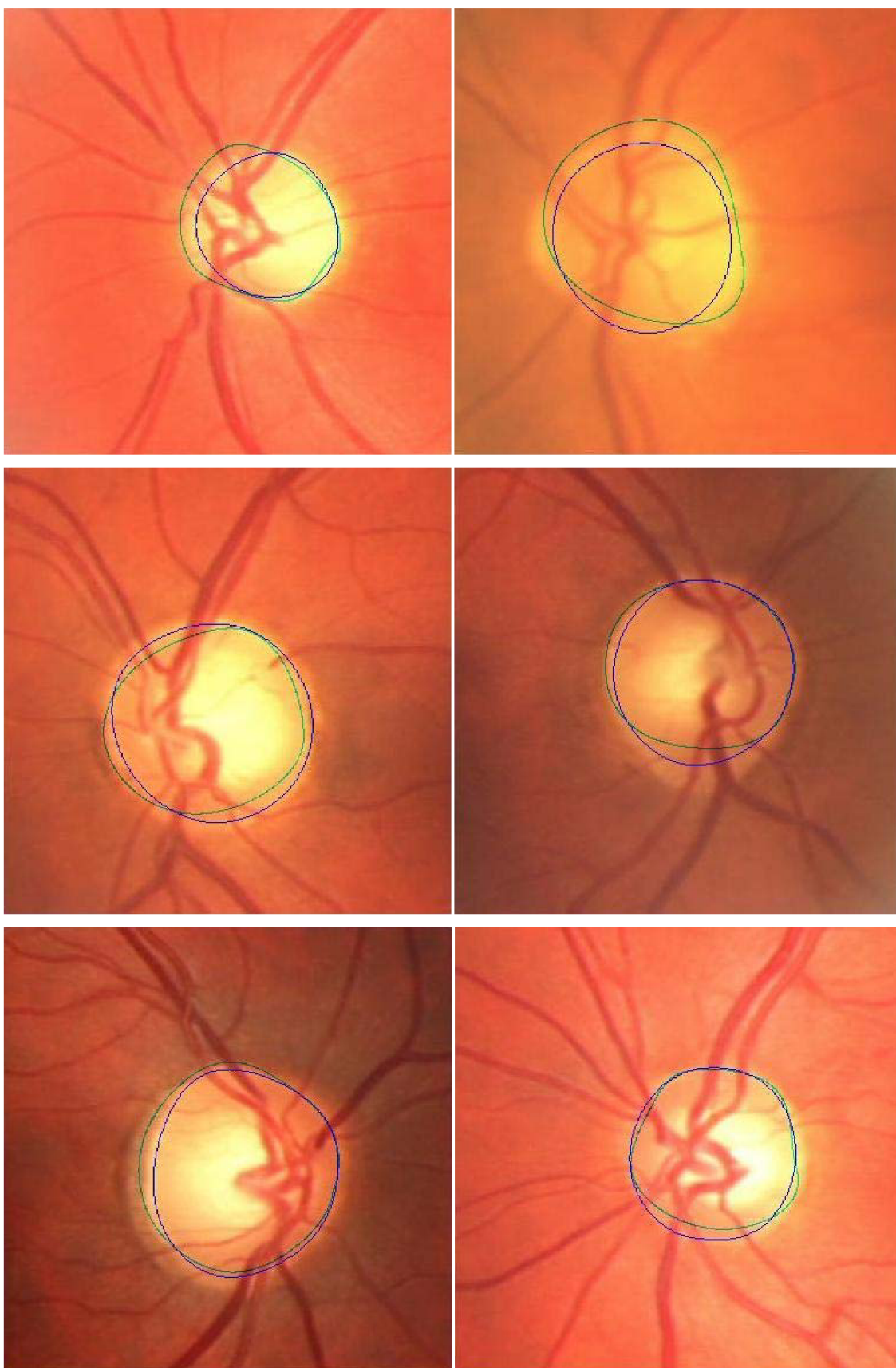
Obr.33. Velikost chyby pravého oka v závislosti na úhlu

Z uvedených histogramů (Obr.32 a 33) je vidět, že hodnoty chyb byly větší u temporální strany levého oka a u nasální strany pravého oka. Výsledné statistické hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab.2. Tabulka statistických údajů jednotlivých obrázků databáze

Pořadové číslo obrázku	Č. obrázku	HT (Houghova transformace)	Aktivní kontura	Chyba plochy [%]	Střední chyba délky [%]
1	985634r	NE			
2	981967r	ANO	ANO	6,916	1,727
3	981967l	ANO	ANO	8,540	1,640
4	971293l	NE			
5	966951r	ANO	ANO	28,657	4,023
6	966951l	ANO	ANO	5,019	2,879
7	917239l	ANO	ANO	5,875	2,881
8	898967r	ANO	ANO	3,201	1,328
9	897600r	ANO	ANO	6,019	1,614
10	897600l	ANO	ANO	3,221	1,382
11	895660r	ANO	NE		
12	895660l	ANO	ANO	28,133	2,395
13	825218l	ANO	ANO	13,864	2,160
14	824954r	ANO	ANO	11,641	1,749
15	824954l	NE			
16	789583r	ANO	NE		
17	787183l	ANO	ANO	12,281	1,562
18	771939l	ANO	ANO	7,635	2,192
19	740002r	ANO	NE		
20	740002l	ANO	ANO	2,368	1,719
21	716881r	ANO	ANO	32,612	4,017
22	716881l	ANO	ANO	40,513	3,996
23	697978r	ANO	ANO	20,238	1,893
24	697978l	ANO	ANO	20,194	2,067
25	668815r	NE			
26	667308l	ANO	ANO	3,750	1,431
27	602004r	ANO	ANO	9,354	2,426
28	527534l	ANO	ANO	12,931	2,256
29	507626r	ANO	ANO	4,192	1,610
30	507626l	ANO	ANO	15,104	1,824
31	494996l	ANO	ANO	11,352	2,382
32	460354r	ANO	NE		
33	458052r	NE			
34	458052l	ANO	ANO	6,418	1,320
35	423146r	ANO	ANO	12,668	1,914
36	423146l	ANO	ANO	2,175	1,640
37	376558l	ANO	NE		
38	351345r	ANO	ANO	65,488	4,880
39	325297r	ANO	ANO	9,992	1,593
40	325297l	NE			
Procento úspěšnosti		85	85	Střední hodnota	
Celkové procento úspěšnosti		72,5		14,1500	2,2240

Výsledky patrné z tabulky 2 poukazují na hodnocení metody z hlediska počtu správně detekovaných snímků.



Obr.34. Odlišnost kontury lékaře od kontury nalezené programem

15 Uživatelské prostředí

Na základě předchozích algoritmů je vytvořeno uživatelské prostředí pro presentaci uvedených programů a výsledků. Tento program (Obr.36) je naprogramován pomocí metody Switched Board Programming [11].

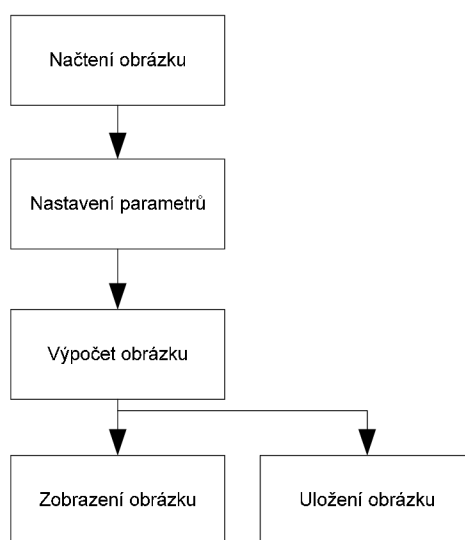
15.1 Switched Board Programming

Jedná se o metodu využívající příkazy Switch a Case. Jedná se o dvojici příkazů používající se v případě, kdy chceme větvit algoritmus podle hodnoty obsahu nějaké proměnné. Základem této metody je využití jedné vlastnosti funkce, a to možnosti volat sama sebe s různými parametry.

15.2 Prostředí programu

Celková koncepce programu je rozdělena do tří částí, kde si uživatel může vyzkoušet uvedené programy s možností nastavení vlastních parametrů. Jedná se o programy: Enhancement (lokální zvýšení kontrastu), Cannyho hranová detekce a Aktivní kontury.

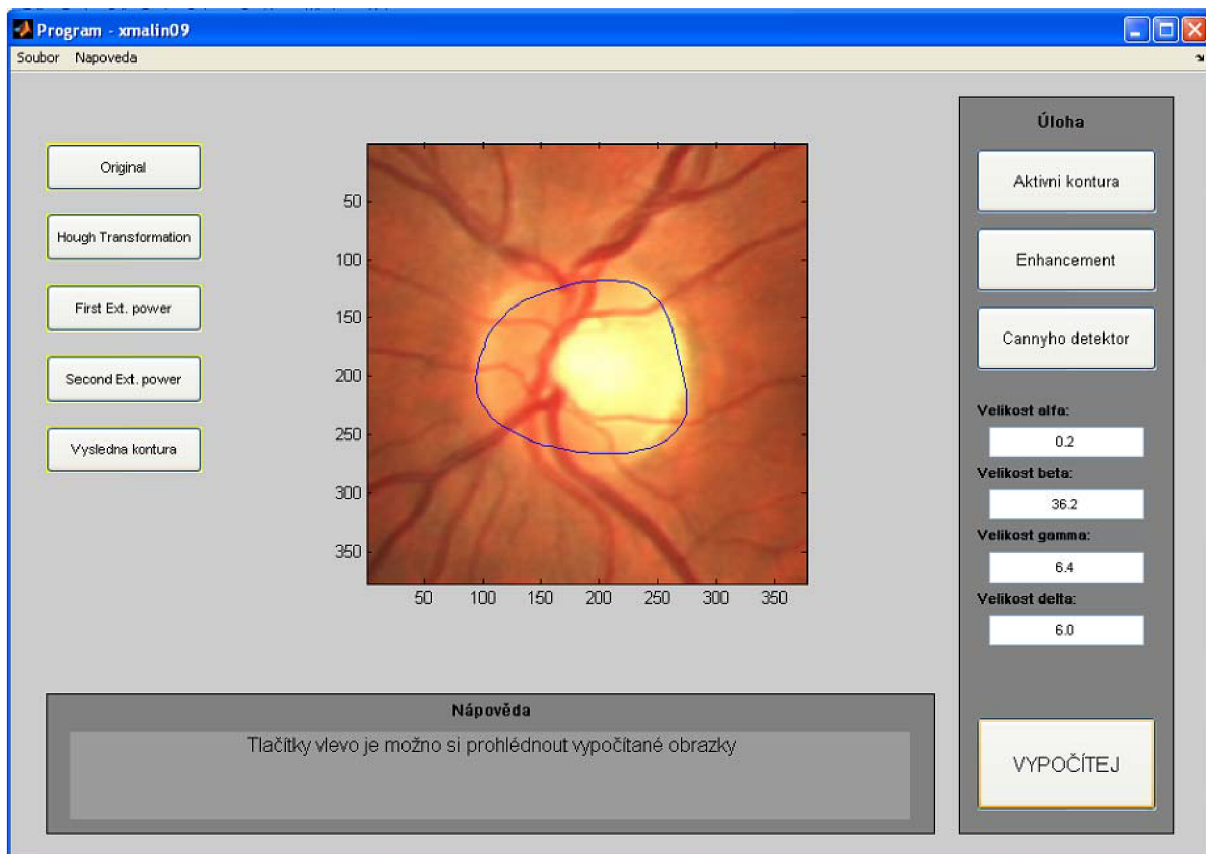
Každý z uvedených algoritmů má následující vývojové schéma (Obr.35).



Obr.35. Vývojové schéma algoritmu

Po provedení programu lze vypočítané obrázky prohlížet pomocí tlačítek vlevo. Opětovné kliknutí na jeden z algoritmů spustí vybraný program znovu.

Uvedené uživatelské prostředí obsahuje dva druhy nápovědy. První nápověda je zobrazena na hlavním panelu programu a slouží pro navádění uživatele při práci, druhá nápověda obsahuje stručné popsání uvedených metod. Tu lze nalézt v hlavní liště menu nabídky (Obr.36 nahoře).



Obr.36. Prostředí programu

16 Závěr

Tato práce se zabývá detekcí významných objektů v oftalmologických obrazech. Jedná se o detekci centrálního bodu žluté skvrny a optického disku s hledáním vnější hranice tohoto objektu. Výsledkem tohoto snažení je soubor algoritmů použitelných k automatizovanému zpracování.

Při detekci žluté skvrny je využito vlastností přizpůsobené filtrace. Masku filtru je dána aproximací žluté skvrny 2D Gaussovým filtrem. Metoda byla odzkoušena na 20ti snímcích s 95% úspěšností.

Detekce středu optického disku je provedena sloučením několika postupů. Jedná se o proces předzpracování, nalezení přibližného středu OD, vytvoření hranové reprezentace a provedení Houghovy transformace. Výstupem této detekce jsou hodnoty středu a poloměru kružnice aproximující OD. Tato metoda byla odzkoušena na 40 snímcích s 85% úspěšností. K nalezení vnější hranice OD je využita metoda aktivních kontur. Procento úspěchu této metody je 85%. Celková úspěšnost detekce OD je 72,5%.

V další části práce je uveden výpočet chyb při porovnání detekované kontury s konturou označenou zkušeným oftalmologem. Procentuelní chyba plochy vyšla 14,15%, procentuelní chyba střední vzdálenosti kontur je 2,22%.

Všechny programy pro detekci a vyznačení hranice OD byly využity pro tvorbu uživatelského prostředí uvedeného v závěru práce.

Použitá literatura

- [1] Niemann H et al. Towards automated diagnostic evaluation of retina images. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2005; 15(2):273–276.
- [2] HOLOTA, Radek, FIŘT, Jaroslav. <http://home.zcu.cz/~holota5/publ/DigZprO.pdf>
- [3] Příspěvatelé Wikipedie, *BMP* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2007, Datum poslední revize 7. 05. 2007, 11:16 UTC, [citováno 7. 05. 2007] <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=BMP&oldid=1470456>>
- [4] Příspěvatelé Wikipedie, *Oko* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2007, Datum poslední revize 22. 04. 2007, 10:36 UTC, [citováno 7. 05. 2007] <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Oko&oldid=1419313>>
- [5] Jan, J. *Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration: Concepts and Methods*, CRC Press, 2005.
- [6] Sinthanayothin, Ch, Boyce JF, Cook, HL, Williamson, TH, Automated localisation of the optic disc, fovea, and retinal blood vessels from digital colour fundus images. *Ophthalmology* 1999; 83:902-910.
- [7] Příspěvatelé Wikipedie, *Charakteristika náhodné veličiny* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2007, Datum poslední revize 5. 02. 2007, 18:15 UTC, [citováno 7. 05. 2007] <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Charakteristika_n%C3%A1hodn%C3%A9_veli%C4%8Diny&oldid=1192010>
- [8] Xu, Ch, Snake, Shapes and Gradient Vector flow. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1998; 7: 359-369.
- [9] Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979; 9(1):62-66.
- [10] Odstrčilík, J. *Segmentace cév v barevných oftalmologických obrazech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 80 s. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Jiří Jan, CSc.
- [11] Zaplatílek, K., Doňar, B. *Matlab – tvorba uživatelských aplikací*, BEN – technický literatura, Praha 2005.

Seznam zkratk

OD	-	Optický disk
ŽS	-	Žlutá skvrna
LZK	-	Lokální zvýšení kontrastu
HT	-	Houghova transformace
OA	-	Otsu algoritmus
GVF	-	Gradient vector flow