VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

POROVNÁVÁNÍ RETINÁLNÍCH OBRÁZKŮ S PATOLOGICKÝMI NÁLEZY

COMPARISON OF RETINAL IMAGES WITH PATHOLOGICAL FINDINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE **BIANCA PALACKOVÁ**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **Prof. Ing., Dipl.-Ing. MARTIN DRAHANSKÝ, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2019

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů (UITS) Akademický rok 2018/2019

Zadání bakalářské práce

Studentka: **Palacková Bianca**
Program: Informační technologie
Název: **Porovnávání retinálních obrázků s patologickými nálezy**
Comparison of Retinal Images with Pathological Findings
Kategorie: Zpracování obrazu

Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se sítnice lidského oka a na sítnici se vyskytujících onemocnění. Seznamte se s knihovnou OpenCV a dostupnou databází sítnic oka s projevy onemocnění.
2. Navrhněte algoritmus pro porovnávání dvou retinálních obrazů, přičemž předmětem zájmu je porovnání zejména patologických nálezů (pozice, množství, plocha apod.).
3. Algoritmus z předchozího bodu implementujte a otestujte na dostupných datech.
4. Shrňte dosažené výsledky, tyto diskutujte a nastiňte možná rozšíření.

Literatura:

- Scanlon P.H., Wilkinson C.P., Aldington S.J., Matthews D.R. *A Practical Manual of Diabetic Retinopathy Management*. Wiley-Blackwell, 2009, s. 230, ISBN 978-1-405-17035-2.
- Ryan S.J. *Retina*. 4th Ed., Elsevier Mosby, 2006, s. 2731, ISBN 0323025986.
- OpenCV library - http://opencv.org/

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

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

Vedoucí práce: **Drahanský Martin, prof. Ing., Dipl.-Ing., Ph.D.**
Konzultant: Mňuk Tomáš, MUDr., FNUSA
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2018
Datum odevzdání: 15. května 2019
Datum schválení: 1. listopadu 2018

Abstrakt

Cieľom tejto bakalárskej práce je navrhnúť a implementovať software pre porovnávanie dvoch retinálnych obrázkov, pričom predmetom porovnávania sú patologické nálezy na sietnici. Najčastejšie ochorenia postihujúce sietnicu ľudského oka sú diabetická retinopatia a vekom podmienená makulárna degenerácia. Pri porovnávaní obrázkov a detekcií prejavov týchto chorôb je dôležité najprv správne detekovať základné časti sietnice ako je slepá a žltá škvrna. Testovanie lokalizácie slepej a žltej škvrny prebehlo na 570 obrázkoch. Algoritmus dosiahol v oboch prípadoch úspešnosť nad 90%. Schopnosť algoritmu lokalizovať ochorenia bola testovaná na 120 obrázkoch, ktoré boli ručne opravené 3 oftalmológmi. Automatické porovnanie snímok môže pomôcť pri určení progresu ochorenia.

Abstract

The goal of this thesis is to design and implement software for comparison of retinal images with pathological findings. The most common diseases affecting the retina are diabetic retinopathy and age related macular degeneration. Detection of main components such as optic disc and fovea, need to be detected for proper comparison and detection of diseases. 570 images was used for evaluation of detection of these main components. In both cases, algorithm achieved success over 90%. 120 images were analysed by 3 ophthalmologists for evaluation of ability to locate pathological findings. Automatic comparison of retinal images can be useful for determination of disease progression.

Klíčová slova

sietnica oka, choroby oka, diabetická retinopatia, spracovanie obrazu, OpenCV, C++

Keywords

eye retina, eye diseases, diabetic retinopathy, image processing, OpenCV, C++

Citace

PALACKOVÁ, Bianca. *Porovnávání retinálních obrázků s patologickými nálezy.* Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martin Drahanský, Ph.D.

Porovnávání retinálních obrázků s patologickými nálezy

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením pana Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martina Drahanského, Ph.D. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

.....
Bianca Palacková
15. května 2019

Poděkování

Ďakujem Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martinovi Drahanskému, Ph.D za jeho odborné rady, ochotu a sprostredkované materiály, ktoré mi poskytol pri tvorbe tejto práce. Ďalej by som sa chcela poďakovať MUDr. Tomášovi Mňukovi, doc. MUDr. Karolíně Skorkovskej, Ph.D. a MUDr. Veronike Matuškovej, Ph.D. za spoluprácu pri vyhodnotení funkčnosti programu.

Obsah

1 Úvod **2**

2 Súčasný stav **4**
2.1 Ľudské oko . . . 4
2.1.1 Anatómia ľudského oka . . . 4
2.1.2 Sietnica . . . 5
2.1.3 Vyšetrenie očného pozadia . . . 7
2.2 Ochorenia sietnice . . . 8
2.2.1 Diabetická retinopatia . . . 8
2.2.2 Vekom podmienená makulárna degenerácia . . . 13
2.2.3 Ďalšie ochorenia sietnice . . . 14
2.3 Spracovanie obrazu . . . 16
2.3.1 Morfologické operácie . . . 16
2.3.2 Prahovanie . . . 17
2.3.3 Gaussove rozmazanie . . . 18
2.3.4 Algoritmus region growing . . . 18
2.3.5 Morfologická rekonštrukcia dilatáciou . . . 19
2.3.6 Ekvalizácia histogramu . . . 20

3 Návrh a realizácia riešenia **21**
3.1 Predspracovanie . . . 21
3.2 Lokalizácia optického disku . . . 22
3.3 Lokalizácia fovey . . . 23
3.4 Segmentácia krvného riečiska . . . 24
3.5 Lokalizácia ochorení . . . 25
3.5.1 Exudáty . . . 25
3.5.2 Hemoragie a mikroaneuryzmy . . . 27
3.6 Porovnanie snímkov . . . 32
3.7 Implementácia . . . 33

4 Testovanie a dosiahnuté výsledky **34**
4.1 Použité databázy . . . 34
4.2 Úspešnosť lokalizácie optického disku a fovey . . . 34
4.3 Úspešnosť detekcie ochorení . . . 35

5 Záver **37**

Literatura **38**

A Obsah CD **41**

Kapitola 1

Úvod

Zrak je považovaný za najdôležitejší zmyslový orgán. Človek ním príma približne 80 % informácií zo svojho okolia. Zrakovým orgánom je oko, ktoré reaguje na svetlo a umožňuje človeku orientovať sa v priestore, vnímať tvary a farby. Oko je komplexný orgán, ktorý je postihovaný mnohými ochoreniami a aj menšie poškodenia zraku dokážu ovplyvniť kvalitu života jedinca. Včasná diagnostika a liečba dokážu očných ochorení zmierniť poškodenia a predchádzať úplnej strate zraku.

Ľudské oko je len nástrojom videnia, to čo človek vidí pomocou očí zachytáva sietnica a zrakovými nervami prenáša tento obraz do mozgovej kôry. Mozog tieto signály spracuje a interpretuje. Sietnica je preto jedným z najdôležitejších a najcitlivejších častí oka. V podobe tenkej vrstvičky pokrýva zadnú vnútornú stenu oka a obsahuje svetlocitlivé bunky – tyčinky a čapíky. Ochorenia sietnice môžu viesť až ku strate zraku a preto je dôležité ich nepodceňovať. Medzi základné prvky, ktoré je možné pozorovať na snímku sietnice ľudského oka sú slepá a žltá škvrna a krvné cievy. Žltá škvrna je miestom najostrejšieho videnia a má najväčšiu hustotu čapíkov. Naopak slepá škvrna je miesto, vstupu zrakového nervu do oka a neobsahuje žiadne svetlocitlivé bunky

Najčastejšími ochoreniami postihujúcimi sietnicu sú diabetická retinopatia a vekom podmienená makulárna degenerácia. Prejavy týchto ochorení je možné sledovať na snímkach sietnice v podobe tmavých či naopak svetlých bodiek až škvŕn. Diabetická retinopatia je dôsledkom cukrovky. Nadmerné množstvo glukózy v krvi poškodzuje a upcháva cievy sietnice, čo pramení až ku vznikom intraretinálnych hemoragií. Každý diabetik by mal byť pravidelne kontrolovaný, pretože u diabetickej retinopatie pacient necíti žiadne príznaky ani bolesť a ku odhaleniu ochorenia môže dôjsť až keď ohrozuje náš zrak. Vekom podmienená makulárna degenerácia je spojovaná s pokročilejším vekom a dochádza pri nej k porušeniu žltej škvrny. Prvými príznakmi tohto ochorenia sú rozostreté alebo zvlnené miesta v zornom poli alebo taktiež šedavé škvrny. Ochorenie nie je možné vyliečiť, ale pri včasnej detekcii je možné ho zastaviť a predísť tak strate zraku. Ochorenia je možné pomocou fundus kamery zdokumentovať v podobe fotografií. Uložené snímky uľahčujú lekárom kontrolovať progres ochorenia a urýchľujú odhalenie zhoršenia stavu pacienta. Okrem pribúdania nálezov je možné na snímkach pozorovať aj migráciu alebo samovoľné vstrebanie. Príkladom sú mikroaneuryzmy, ktoré môžu spontánne miznúť pri kontrolovaní a ustálení glukózy v krvi pacienta.

Cieľom tejto práce je vyvinúť postup automatického porovnávania retinálnych obrázkov, pričom porovnávať sa budú patologické nálezy, a to konkrétne ich počet a plocha. V súčasnosti existujú rôzne metódy, ktoré digitálnym spracovaním obrazu monitorujú prejavy ochorení na sietnici. Tieto metódy využívajú napríklad algoritmy na rozpoznávanie obrazcov,

úpravu sýtosti farieb, prahovanie, rozmazanie obrazu a iné.

Ciele tejto práce sú:

- Popísať stavbu ľudského oka a základných ochorení vyskytujúcich sa na sietnici.
- Navrhnúť a implementovať algoritmus pre automatického porovnávania snímok sietnice.
- Program vhodným spôsobom otestovať a zhrnúť dosiahnuté výsledky.

Práca je členená do piatich kapitol, pričom kapitola 2 zhrňuje teoretické znalosti týkajúce sa anatómie oka, ochorení sietnice a spracovania obrazu v počítačovej grafike. V 3. kapitole je uvedená realizácia navrhnutého riešenia a v kapitole 4 sú zhodnotené prevedené experimenty.

Kapitola 2

Súčasný stav

2.1 Ľudské oko

Ľudské oko je zložitý zmyslový orgán, ktorý umožňuje vnímanie svetla, farieb a sprostredkuje vnímanie najväčšieho množstva informácií o okolitom prostredí. Vlnová dĺžka žiarenia, ktorú vnímame ako viditeľné svetlo je 380–780 nm. Zrakový orgán je umiestnený v očnici a je tvorený očnou buľva (*bulbus oculi*) a prídavnými očnými orgánmi (*organu oculi accessoria*). Očná buľva má približne guľovitý tvar o priemere asi 23 mm. Oko je inervované 4 hlavovými nervami, z ktorých II. hlavový nerv je zodpovedný za prenos zrakovej informácie a ďalšie 3 hlavové nervy inervujú okohybné svaly.

2.1.1 Anatómia ľudského oka

Základné časti oka a ich funkcie sú [34]:

- **Očné bielko** (*sclera*) je tuhá väzivová blana, ktorá je ochranným obalom pre vnútorné časti očnej buľvy. Na bielko sa upínajú okohybné svaly a na jeho stene sú otvory pre cievy a nervy. Hrúbka skléry kolísa medzi 0,3 a 1,5 mm. Očné bielko je prakticky bezcievnaté a preto má bielu farbu. Odtieň bielej farby sa s vekom mení. U malých detí obsahuje väčšie množstvo vody a elastických vlákien, preto je čiastočne priehľadné a presvitajúca cievnatka ho zafarbuje do modra. V dospelosti je porcelánovo biele a v starobe je nažltlé vplyvom ukladajúceho sa pigmentu. Na spodnej strane bielka je otvor do ktorého je vsadený skosený okraj rohovky.

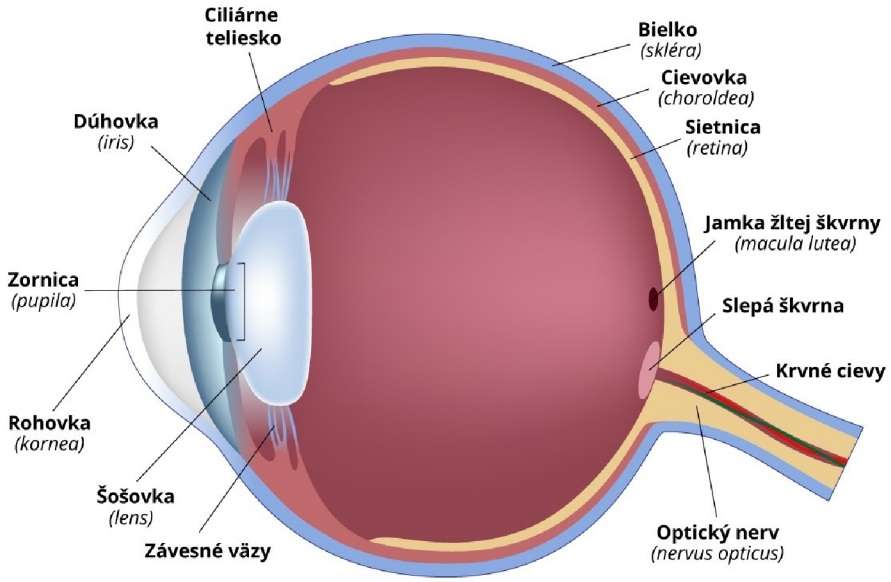
- **Rohovka** (*cornea*) je priehľadné a číre tkanivo s lesklým povrchom prekrývajúce prednú časť očnej buľvy. Prenikajú cez ňu svetelné lúče, ktoré vyvolajú zrakový vnem.

- **Cievnatka** (*choroidea*) má podobu tenkej (0,2–0,4 mm) čiernohnedej blany, ktorá je bohatá na cievy. Od bielka je oddelená tenkou vrstvou väziva. Je bohato pigmentovaná a pohlcuje svetelné lúče a zabraňuje ich odrazom vo vnútri oka. Z cievnatky sú vyživované pigmentové bunky sietnice, čapíky a tyčinky. Vzadu je v cievnatke otvor, ktorým vstupujú vlákna zrakového nervu, sietnicová tepna a žila. Predný okraj cievnatky prechádza plynule do riasnatého telesa.

- **Riasnaté teleso** (*corpus ciliare*) má tvar zriaseného prstenca, ktorý je priložený na vnútornú stranu bielka. Na reze má tvar trojuholníku. Z vnútornej plochy telesa vystupujú riasy, ktoré vylučujú komorový mok do zadnej komory očnej. Zadný okraj

riasnatého telesa sa stenčuje a prechádza do cievnatky, smerom dopredu sa riasnaté teleso zhrubšuje a spojuje sa s dúhovkou.

- **Dúhovka** (*iris*) má tvar kruhového terčíka s centrálnym otvorom nazývaným zrenica. Predná plocha dúhovky je podľa množstva pigmentu individuálne zafarbená a podmieňuje „farbu očí“. Zrenička má schopnosť zužovať sa a rozširovať podľa intenzity svetla. Zabezpečujú to 2 svaly: zvierač a rozširovač zrenice. Zvierač svojou kontrakciou zúži zrenicu na priemer asi 2 mm a tým obmedzí množstvo svetla, ktoré preniká do oka. Pri kontrakcií rozširovača sa zrenica rozšíri na asi 7 mm.
- **Šošovka** (*lens*) svojou pružnosťou dokáže meniť tvar a optickú mohutnosť. Tým oko zaostruje na predmety v rôznych vzdialenostiach – akomodácia oka. Šošovka je upevnená na jemných závesných vláknach, ktoré vybiehajú od vnútorného obvodu riasnatého telesa. Sval riasnatého telesa ťahom za vlákna šošovky mení jej zakrivenie.
- **Sklovec** (*corpus vitreum*) vypĺňuje 2/3 očnej buľvy za šošovkou. Je priehľadný a má huspeninovú konzistenciu.
- **Sietnica** (*retina*) je pre túto prácu najdôležitejšia časť a je jej venovaná podkapitola 2.1.2.



Obrázek 2.1: Anatómia ľudského oka. [33]

2.1.2 Sietnica

Sietnica je tenká priehľadná vrstva hrubá asi 0,5 mm, ktorá vystiela vnútornú stranu očnej buľvy až k okraju dúhovky. Svojou vonkajšou plochou prilieha k cievnatke a k jej vnútornej ploche prilieha sklovec. Vonkajšia vrstva sietnice spolu s pigmentovou vrstvou cievnatky vytvárajú „čiernu komoru“, ktorá pohlcuje svetelné lúče. Sietnica je preto svetlo-citlivá oblasť, ktorá obsahuje milióny buniek naskladaných husto vedľa seba. Tieto bunky sú rozdelené do 3 základných skupín: zmyslové bunky (fotoreceptory), neuróny a gliové bunky. Neuróny

zbierajú informácie z fotoreceptorov a odvádzajú ich zrakovým nervom z oka do mozgu. Gliové bunky (Müllerove bunky) sú podporné bunky, ktoré vyživujú nervové elementy sietnice. Zmyslové bunky sa v sietnici vyskytujú v dvoch podobách, a to v podobe čapíkov a tyčiniek. [10]

Tyčinky a čapíky

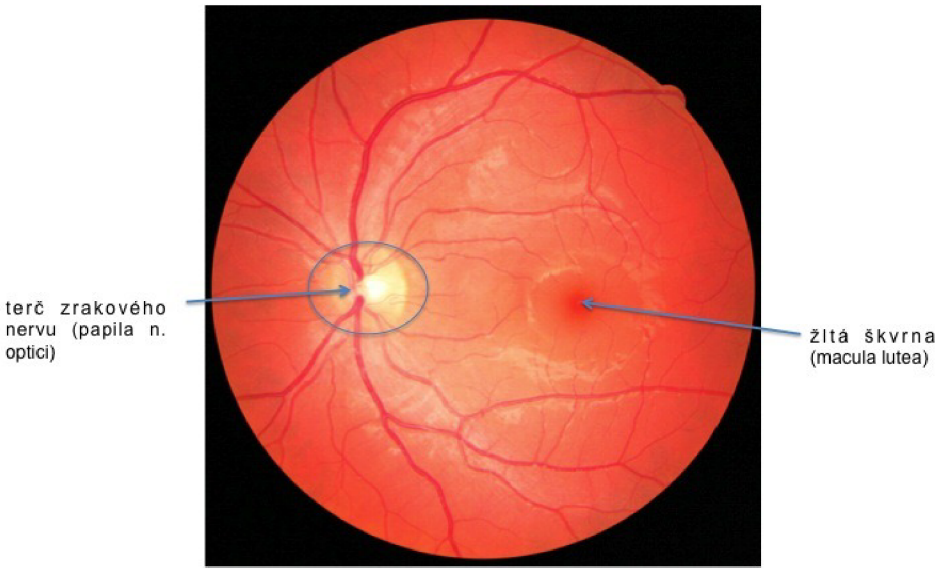
Tyčinky registrujú množstvo dopadajúceho svetla a slúžia na videnie za šera. Umožňujú len neostré a bezfarebné videnie. Predstavujú až 95% zmyslových buniek sietnice, ich celkový počet je približne 100 miliónov. Čapíky zase slúžia na videnie cez deň a umožňujú vnímať farby. Je ich približne 7 miliónov. Obsahujú zrakové pigmenty, ktoré sa pôsobením dopadajúceho svetla chemicky menia. Človek má tri druhy čapíkov, a to červené, zelené a modré, pričom každý druh je najviac citlivý na svetlo inej vlnovej dĺžky – 561, 530 a 430 nm. Na normálne farebné videnie je potrebná funkcia všetkých troch druhov čapíkov. [27]

Žltá škvrna

Žltá škvrna (*macula lutea*) je útvar kruhového až eliptického tvaru o priemere asi 3 mm. V jej strede sa nachádza priehlbina, ktorá sa nazýva fovea (*fovea centralis*). Makula je miestom najostrejšieho videnia, nachádza sa v strede zorného poľa a premieta sa do nej centrálny lúč. Je tu najväčšia hustota čapíkov, okrem čapíkov žltá škvrna prakticky neobsahuje iné bunky. Smerom od žltej škvrny pribúda počet tyčiniek a sietnica nadobúda väčšiu hrúbku.

Slepá škvrna

Slepá škvrna, optický disk alebo aj terč zrakového nervu označujú miesto na sietnici, ktoré neobsahuje žiadne zmyslové bunky. Slepá škvrna je miesto vstupu zrakového nervu (II. nerv hlavový) a je vzdialená asi 5 mm od žltej škvrny. Obsahuje približne 1,2 milióna nervových vlákien, ktoré prenášajú vizuálne impulzy zo sietnice do mozgu [10]. Slepá škvrna sa volá slepá preto, že ak sem dopadne obraz predmetu, tak ho nevidíme. K dôkazu slepej škvrny



Obrázek 2.2: Snímok sietnice ľavého oka. [23]

slúžia tzv. Mariottove obrázky. Medzeru v zornom poli človek nevníma zo zvyku, naša predstavivosť toto miesto mimovoľne zaplňuje. Okrem toho obidve slepé škvrny v očiach odpovedajú rôznym miestam zorného poľa každého oka, preto ak sa pozeráme obidvoma očami, žiadne medzera v ich spoločnom zornom poli nie je.

2.1.3 Vyšetrenie očného pozadia

Vyšetrenie očného pozadia patrí medzi základné oftalmologické vyšetrenia. Pri tomto vyšetrení je lekár schopný prehliadnuť si zadnú časť oka a skontrolovať tým stav sietnice, makulu, zrakový nerv a cievy. Vyšetrením je možné odhaliť napríklad zmeny na sietnici spôsobené cukrovkou alebo vysokým krvným tlakom, vekom podmienenú makulárnu degeneráciu, odlúpenie sietnice a ďalšie. Princípom vyšetrenia je osvetlenie vnútra oka dostatočne intenzívnym svetlom.

Základné prístroje pre vyšetrenie očného pozadia sú [16]:

- **Priamy oftalmoskop** je ručné prenosné zariadenie umožňujúce jednoduché vyšetrenie sietnice. Svetelný zdroj je umiestnený tesne pod okienkom určeným pre pozorovanie sietnice v hornej časti prístroja. Obraz sietnice je sledovaný jedným okom priamo z krátkej vzdialenosti (cca 2 cm) a je zväčšení úmerne optickej mohutnosti oka. Oblasť sietnice, ktorú je možné pri danom sklone oftalmoskopu pozorovať je približne 2 mm. Vyšetrenie rôznych oblastí sietnice sa dosiahne zmenou náklonu oftalmoskopu, prípadne zmenou pohľadového smeru vyšetrovaného oka. Priama oftalmoskopia prináša možnosť detailného vyšetrenia, na druhú stranu je málo prehľadná.

- **Nepriamy oftalmoskop** umožňuje vyšetrenie z väčšej vzdialenosti (cca 50 cm) za použitia vyšetrovacej šošovky. Vyšetrujúci ju drží pred okom vo vzdialenosti odpovedajúcej jej ohniskovej vzdialenosti. Touto šošovkou osvetľuje a pozoruje obraz sietnice. Zdroj svetla je väčšinou umiestnený na čelenke. Obraz sietnice sa cez vyšetrovaciu šošovku zobrazí ako reálny a prevrátený. Vyšetrujúci musí byť preto schopný obraz akomodovať. Výsledný obraz je menej zväčšený než pri priamej oftalmoskopii, zobrazená je však väčšia časť sietnice a vyšetrenie je tým prehľadnejšie.

- **Štrbinová** lampa je v oftalmológii najvyužívanejším a najuniverzálnejším zariadením. Skladá sa z dvoch základných častí – zväčšovacej a osvetľovacej sústavy. Obidve sú umiestnené na spoločnej základni voľne pohyblivej všetkými horizontálnymi smermi. V osvetľovacej sústave je zabudovaná štrbinová clona, ktorou je možné vytvoriť osvetlenie v tvare prúžku, ktorého šírku, výšku a rotáciu je možné meniť. Štrbinová lampa slúži k vyšetreniu predovšetkým predného segmentu oka, pri použití doplnkových zariadení taktiež k vyšetreniu zadných častí oka, komorového uhlu či meraniu vnútroočného tlaku.

- **Funduskamera** je založená na podobnom zobrazovacom princípe ako nepriama oftalmoskopia a umožňuje zaznamenať obraz sietnice vo forme digitálneho obrazu. Jej hlavnou výhodou oproti klasickému oftalmoskopu je, že snímky je možné ukladať a následne porovnávať. Funduskamera sa skladá z mikroskopu na ktorý je pripevnená kamera s CCD čipom. Mikroskop na ktorom je kamera, je sústavou šošoviek a zrkadiel umožňujúci zameriavať lúče na očné pozadie. Vo výsledku sa získa priama a niekoľkokrát zväčšená fotografia očného pozadia. Zväčšenie sa odvíja od viacerých faktorov, najbežnejšie je však 2,5 násobné, kedy prístroj zobrazuje zorné pole o rozsahu 30–50°.

(a) Rôzne typy priameho oftalmoskopu.

(b) Nepriamy oftalmoskop.

(c) Štrbinová lampa

(d) Fundus kamera.

Obrázek 2.3: Vyšetrovacie prístroje. [16]

2.2 Ochorenia sietnice

2.2.1 Diabetická retinopatia

Významná časť diabetickej populácie je skôr alebo neskôr ohrozená diabetickou retinopatiou (DR) a jej komplikáciami. Počet postihnutých ľudí DR sa zvyšuje s dobou trvania diabetu. V dôsledku hyperglykémie dochádza ku zmenám v štruktúre a funkcii cievnych stien kapilár . Zo štrukturálnych zmien je najprv možné pozorovať zhrubnutie kapilárnej bazálnej membrány a pokles počtu pericytov. Pericyty sú bunky, ktoré obklopujú endotelové bunky sietnicových kapilár. V zdravej sietnici sa nachádza 1 pericyt na jednu endotelovú bunku. U diabetikov je možné pozorovať odumieranie a pokles počtu pericytov. Ich absencia vedie k oslabeniu kapilárnej steny, ktorá podlieha dilatácii, teda sa rozširuje. Dôsledok je vznik mikroaneuryziem. Porušená cievna stena vedie k narušeniu hematoretinálnej bariéry, čo sa prejavuje edémom a akumuláciou lipidov a proteínov. Ak dôjde k úplnému porušeniu steny mikroaneuryziem, vznikajú intraretinálne hemoragie.

Diabetes mellitus

Diabetes mellitus, často nazývaný len diabetes, je metabolická porucha spôsobená neschopnosťou organizmu správne hospodáriť s cukrom (glukózou). To sa prejavuje zvýšenou hladinou cukru v krvi (glykémiou). Príčinou vzniku cukrovky je nedostatok inzulínu, látky, ktorú tvorí slinivka brušná. Existujú 2 hlavné typy diabetu [3]:

- **Diabetes 1. typu**, ktorý je spôsobený absolútnym nedostatkom inzulínu. Pri tomto type sú bunky pankreasu produkujúce inzulín čiastočne alebo úplne zničené. Ak pankreas produkuje veľmi málo inzulínu alebo ho neprodukuje vôbec, bunky v tele „hladujú“, pretože nedokážu naviazať cukor z krvi. Preto je potrebné inzulín aplikovať podkožne, odkiaľ sa vstrebáva do krvi. Diabetes 1. typu sa zvyčajne vyskytuje u mladších osôb alebo detí. Neexistuje spôsob ako by sa dali inzulín produkujúce bunky oživiť, preto je po celý život diabetika potrebná liečba diétou a inzulínom.

- **Diabetes 2. typu** je charakteristický relatívnym nedostatkom inzulínu. V tejto forme bunky pankreasu tvoria inzulín, ale svalové a tukové bunky sú len čiastočne schopné ho využiť. Často sa tento typ považuje za miernejší než diabetes 1. typu. Osoby u ktorých tento typ diabetu vzniká sú dospelí. V niektorých prípadoch diéta, dostatok pohybu a zníženie hmotnosti postačujú aby sa glykémia znížila takmer na normálnu hladinu.

Epidemiológia

U diabetu 1. typu nebýva diabetická retinopatia vyvinutá v dobe stanovenia diagnózy cukrovky. Vzácne je zistená skôr než po piatich rokoch trvania diabetu. Výskyt tohto ochorenia narastá v postpubertálnom veku a po päťročnom trvaní diabetu má retinopatiu 17% diabetikov 1. typu. Po 15 rokoch je to už 98 % a po 20 rokoch 99 % diabetikov 1.typu.

U diabetikov 2. typu je diabetická retinopatia často prítomná už v dobe zistenia cukrovky. Po piatich rokoch diabetu sa retinopatia prejaví u 25 až 40 % diabetikov. Po 15 ročnom trvaní diabetu sa tieto čísla zvyšujú na 58 až 85 %.

DR a jej komplikácie sú častou príčinou ťažkého postihnutia zrakových funkcií. Toto ochorenie je vo vekovej skupine 20-65 rokov hlavnou príčinou praktickej slepoty. Paradoxom je, že riziko slepoty ako dôsledok DR je 15 krát vyššie po zavedení inzulínovej terapie. Liečba totiž nedokáže zabrániť mikrovaskulárnej angiopatii, ktorá je podkladom DR.

U diabetu 1. typu je po 10 rokoch trvania choroby prakticky slepých len 0,1%, po 20 rokoch toto číslo stúpa na 1,5-3 % a po 30 ročnom trvaní je to až 12 % pacientov. U diabetu 2. typu je prakticky slepých 2 % pacientov po 10 rokoch, po 20 ročnom trvaní sa to zvyšuje až na 6 %. [35]

Rizikové faktory

Rizikové faktory, ktoré ovplyvňujú vznik alebo priebeh diabetickej retinopatie sú [28]:

- **Zvýšený cukor v krvi**, teda cukrovka, je hlavným faktorom, ktorý vplýva na vznik DR. S pribúdajúcim vekom trvania diabetu, sa narastá poškodenie sietnice. Bolo dokázané, že úpravou a sledovaním hladiny cukru v krvi je možné spomaliť progres tohto ochorenia.

- **Zvýšený krvný tlak** alebo hypertenzia je rizikovým faktorom, ktorý podmieňuje aj vznik retinopatie nezávislej od diabetu. Kontrola krvného tlaku znižuje riziko vzniku DR a spomaľuje jej ďalší vývoj.

- **Sérové lipidy** spája viacero štúdií so vznikom tvrdých exudátov.
- Niekoľko štúdií udáva ako ďalší rizikový faktor **fajčenie**, a to hlavne u diabetu 1. typu. U diabetu 2. typu sú však dôkazy kontroverzné.
- **Vek** v istej miere taktiež ovplyvňuje progres ochorenia.
- **Genetické faktory** ako rasa a rodinné gény sú ďalšími rizikovými faktormi. Boli zistené rozdiely vo výskyte DR u hispánskych američanov, afro-američanov a američanov európskeho pôvodu.

Prejavy na sietnici

Mikroaneuryzmy

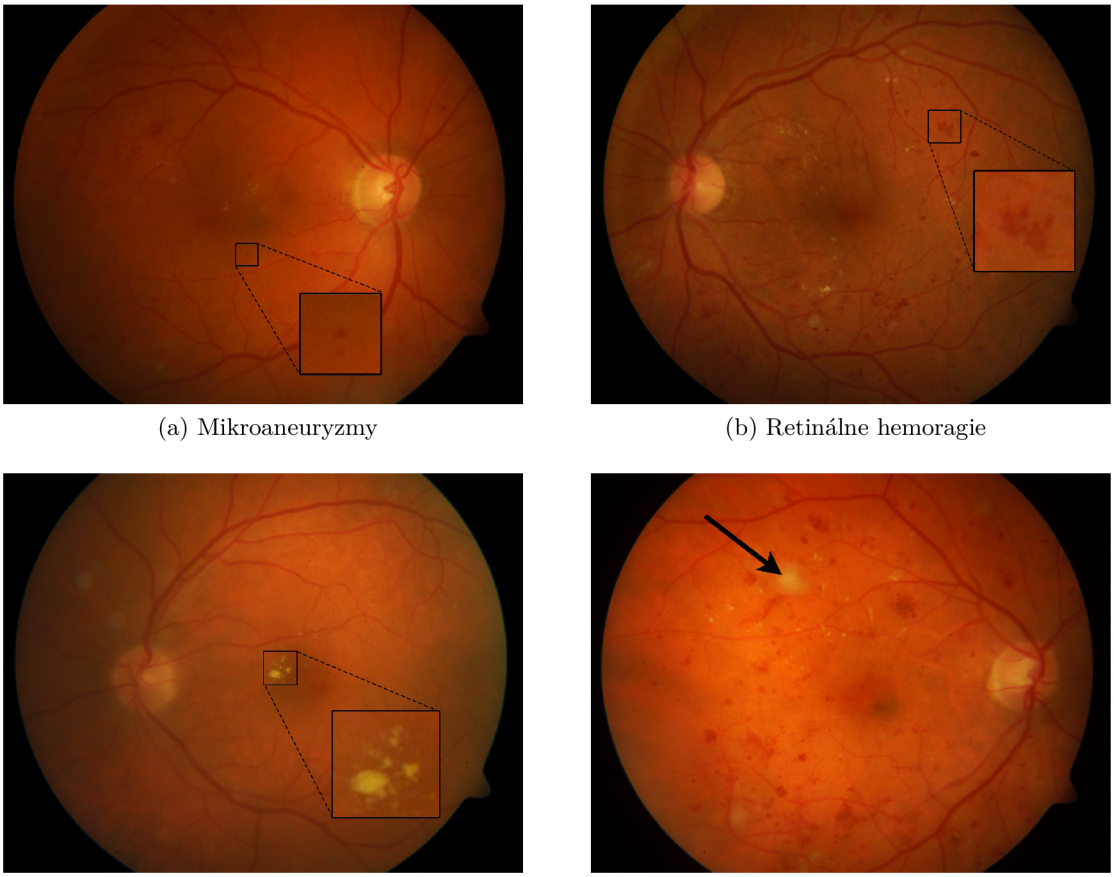
Mikroaneuryzmy (obrázok 2.4a) sú výdutia v stene cievy, ktorá je vplyvom dlhodobej glykémie poškodená a zoslabená. Vznikajú v dôsledku odumierania pericytov, ktorých absencia vedie k oslabeniu kapilárnej steny. Ich veľkosť sa pohybuje od 12 µm do 100 µm. Javia sa ako červené bodky a nie je možné ich rozlíšiť od drobných bodkovaných hemoragií. Narozdiel od hemoragií by mali mať ostro ohraničené okraje. Rozlíšenie je možné pomocou fluorescenčnej angiografie (FAG), pri ktorej sa mikroaneuryzmy narozdiel od bodkovaných hemoragií plnia farbivom. Pri FAG je možné zachytiť omnoho viac mikroaneuryziem ako pri oftalmologickom vyšetrení. [35, 32]

Retinálne hemoragie

Retinálne hemoragie (RH) (obrázok 2.4b) vznikajú pri porušení steny mikroaneuryziem alebo kapilár. RH sa delia na hemoragie bodkované, plamienkové a škvrnité. Bodkované RH sú malé červené bodky, uložené v stredných vrstvách sietnice. Často tvoria spolu s mikroaneuryzmami zhluky. Najčastejšie sa nachádzajú v temporálnej oblasti makuly alebo temporálne od makuly. Plamienkové hemoragie sú väčšie a sú uložené vo vrstve nervových vlákien. U diabetickej retinopatie sú menej časté a môžu upozorňovať na hypertenziu. Škvrnité hemoragie ležia v stredných vrstvách sietnice, sú väčšie a sú známkou rozsiahlejších oblastí neperfúzie. [35]

Exudáty

Exudáty sa rozdelujú na tvrdé a mäkké. Exudáty nie sú charakteristické len pre DR, ale objavujú sa aj pri iných chorobách. **Tvrdé exudáty** (obrázok 2.4c) sú ložiská bielkovín a lipidov, ktoré vznikajú presakovaním krvnej plazmy z kapilár a mikroaneuryziem. Bodkované tvrdé exudáty sa javia ako jasno žlté bodky, ktoré vytvárajú rôzne zhluky s tendenciou k migrovaniu. Chumáčové tvrdé exudáty majú tvar hrudiek alebo chumáčov a sú uložené prevažne povrchovo. Plakoidné tvrdé exudáty sa vyskytujú v oblasti fovey, kde sú doprevádzané výrazným poklesom zrakovej ostrosti. Tvrdé exudáty sa môžu spontánne absorbovať. **Mäkké exudáty** (obrázok 2.4d) alebo aj vatové ložiská vznikajú v dôsledku infarktov vo vrstve nervových vláken. Z týchto porušených nervových vláken sa vylieva šedá axoplazma. Mäkké exudáty majú vzhľad šedobielych chumáčov vaty a nachádzajú sa hlavne v zadnom póle oka. Staršie vatové ložiská bývajú často obklopené mikroaneuryzmami. [35, 32]



(a) Mikroaneuryzmy

(b) Retinálne hemoragie

(c) Tvrdé exudáty

(d) Mäkké exudáty

Obrázek 2.4: Prejavy diabetickej retinopatie na sietnici. [18]

Klasifikácia

Súčasná medzinárodná klasifikácia delí DR na neproliferatívnu a proliferatívnu s ďalším konštatovaním o prítomnosti či neprítomnosti diabetickej makulopatie.

Neproliferatívna diabetická retinopatia (NPDR)

Základné znaky NPDR sú exudáty, mikroaneuryzmy a retinálne hemoragie. Podľa pokročilosti zmien sa NPDR rozdeľuje na počínajúcu (4-0-0), (čísla v zátvorkách značia počet kvadrantov, v ktorých sú prítomné klinické progresívne znaky uzáveru kapilár: hemoragie-flebopatie-intraretinálne mikrovaskulárne abnormality (IRMA),tzv. Davis-Murphyho pravidlo), stredne pokročilú (4-1-0) a pokročilú (4-2-1) [31]. K prvým príznakom NPDR patrí rozšírenie žíl, mikroaneuryzmy a bodkované hemoragie. Pri stredne pokročilej NPDR pribúdajú zhluky bodkovaných hemoragií, vatové ložiská, väčšie plamienkové a škvrnité retinálne hemoragie. U stredne pokročilej NPDR sa ešte laserová liečba nevykonáva. U pokročilej NPDR je možné pozorovať veľký počet mikroaneuryziem a hemoragií vo všetkých 4 kvadrantoch alebo korálkovitý vzhľad žíl najmenej v 2 kvadrantoch alebo IRMA najmenej v jednom kvadrante. [35]

Proliferatívna diabetická retinopatia (PDR)

PDR predstavuje pokročilejšiu formu ochorenia a jej hlavným znakom sú neovaskularizácie. Neovaskularizácie sú novovytvorené jemné cievy, ktoré vyrastajú zo sietnicových žíl. Okrem neovaskularizácie sa pokročilá PDR prejavuje taktiež komplikáciami, akými sú väčšie preretinálne a intravitreálne krvácanie, odlúpenie sietnice a neovaskularizácie na dúhovke. Podľa dynamiky ochorenia sa rozlišuje začínajúca a vysoko riziková PDR. Vysoko riziková PDR je definovaná prítomnosťou neovaskularizácií na disku zrakového nervu v rozsahu 1/4 až 1/3 papily a/alebo novotvorbou ciev kdekoľvek na sietnici postihujúcej najmenej 1/4 plochy papily, doprevádzanou krvácaním do sklovca. [31]

Diabetická makulopatia

Diabetická makulopatia je u diabetických pacientov hlavnou príčinou praktickej slepoty. Je dôsledkom presakovania zo sietnicový ciev a mikroaneuryziem. Diabetická retinopatia je charakterizovaná zhrubnutím sietnice a prítomnosťou tvrdých ložísk v makulárnej oblasti. Fovea spočiatku nie je postihnutá a k poklesu videnia dôjde až pri zasiahnutí foveolárnej oblasti.

Liečba

Základom liečby je vždy snaha o dlhodobú stabilizáciu diabetu a krvného tlaku. Z praktického hľadiska je najzávažnejším problémom včasná diagnostika diabetickej retinopatie. Je preto dôležité, aby bol postihnutý pravidelne vyšetrený oftalmológom. Systém kontrol očným lekárom je stanovený takto [38]:

- Prvé očné vyšetrenie v dobe stanovenia diagnózy diabetu.
- U pacientov bez očných komplikácií raz ročne.
- U pacientov s neproliferatívnou diabetickou retinopatiou každých 4–6 mesiace.
- U pacientov s diabetickou makulopatiou je sledovanie častejšie a riadi sa nálezom na očnom pozadí.

K liečbe sietnice postihnutej DR sa používa laser. Metóda sa nazýva fotoagulácia a jej princípom je zvýšenie teploty na sietnici až o 30°C. Laserom sa zničia novovytvorené menejcenné cievky, a tak sa zabráni ich prasknutiu a krvácaniu do sietnice a zvýši sa prísun kyslíku do sietnice. Na sietnici je následne možné pozorovať koagulačné ložisko. Takto ošetrené tkanivo sa podľa použitej intenzity zafarbí šedivo, žlto či bielo. Výsledkom je jazva, ktorá môže byť pozdejšie bohato pigmentovaná. Zákrok sa vykonáva ambulantne po predchádzajúcom lokálnom znecitlivení oka kvapkami. [32, 26]

Ďalšou možnosťou liečby DR sú tzv. antiVEGF látky a kortikosteroidy. AntiVEGF látky sú antirastové faktory, ktoré sa podávajú injekciou priamo do oka – intravitreálne podanie. Tieto látky majú za úlohu zastaviť rast neželaných novotvorených ciev, zabraňujú presakovaniu tekutiny už zo vzniknutých menejcenných cievok, čo má za následok normalizáciu hrúbky sietnice v mieste naojstrejšieho videnia. Podávajú sa raz za 4-8 týždňov. Kortikosteoridy sú hormonálne látky, ktoré znižujú opuch sietnice. V liečbe diabetického opuchu sa však využívajú menej často pre riziko komplikácii ako sú vznik alebo progresia sivého zákalu a zvýšenie vnútroočného tlaku. Pri krvácaní do sklovca a PDR sa pristupuje ku chirurgickej liečbe. Pri tomto výkone sa odstráni sklovec krvácania a ošetruje sa sietnica zvnútra oka. [26]

2.2.2 Vekom podmienená makulárna degenerácia

Vekom podmienená makulárna degenerácia (VPMD) je ochorenie makuly, ktoré postihuje osoby staršie ako 50 rokov. Prvým prejavom VPMD sú zmeny v Bruchovej membráne. Bruchova membrána spolu s cievnatkou vyživuje sietnicu a s ňou aj makulu. Následkom nedostatku živín privádzaných do makuly dochádza k jej poškodeniu a zhoršeniu centrálneho videnia. V súvislosti s trendom starnutia populácie vo vyspelom svete sa stáva stále väčším problémom. VPMD je multifaktoriálne ochorenie. Okrem veku, ktorý je hlavným rizikovým faktorom, majú vplyv na výskyt tejto choroby aj fajčenie cigariet, nesprávna výživa, obezita, diabetes mellitus, pohlavie, rasa, familiárna dedičnosť a ďalšie. Výskyt tohto ochorenia narastá vekom, medzi 65-75 rokmi má 10 % jedincov zníženú zrakovú ostrosť v dôsledku VPMD, vo vekovej kategórii nad 75 rokov je to až 30 %. Konečnou fázou ochorenia sprevádzanou praktickou slepotou trpí až 1,7 % jedincov starších 50 rokov a 18 % starších 85 rokov [22]. Základnými príznakmi tohto ochorenia sú deformácia vnímaného obrazu, výpadok zorného poľa a pokles zrakovej ostrosti.

Klasifikácia

VPMD sa vyskytuje v 2 formách: suchej a vlhkej. Suchá forma je menej závažná a vyznačuje sa pomalou progresiou. Objavuje sa približne u 85 % postihnutých. Vlhká forma je oveľa závažnejšia. Objavuje sa síce menej často, má však rýchlu progresiu, trvajúcu rádovo v mesiacoch a pokiaľ nie je liečená, vedie k oslepnutiu.

Suchá forma

Klinické nálezy ktoré nachádzame u suchej formy VPMD, zahrňujú drúzy, zmeny pigmentácie vo vrstve retinálneho pigmentového epitelu (RPE) a určitý stupeň atrofie.

Drúzy sú žltavé depozitá v hĺbke sietnice, v ktorých sa akumuluje patologický materiál. Väčšina drúz má podobné zloženie. Po obvode obsahujú neutrálne tuky a fosfolipidy a v centrálnej časti glykosilované rezíduá. Podľa typu rozlišujeme tvrdé a mäkké drúzy. Tvrdé drúzy majú veľkosť menšiu než 63 µm. Je možné ich pozorovať ako malé, dobre ohraničené depozitá žltej farby. Tento typ drúz je spájaný s veľmi malým rizikom prechodu k neskorším formám VPMD. Avšak výskyt viac než 8 drúz je asociovaný so zvýšením rizikom vzniku mäkkých drúz. Mäkké drúzy sú väčšie, neostro ohraničené a často splývajú. Ich veľkosť je väčšia ako 63 µm. Sú asociované s vyšším rizikom vzniku vlhkej formy VPMD. Mäkké drúzy môžu spontánne vymiznúť, čo je sprevádzané vznikom atrofie vo vrstvách retinálneho pigmentového epitelu. [19]

Atrofia predchádza konečnému štádiu – geografickej atrofii. Pozorujeme ju ako oblasť ztenšenia buniek RPE a hypopigmentáciu RPE. Zasiahnutá sietnica sa javí ružovejšia než okolité pozadie a drúzy v tejto oblasti búvajú bledšie a tvrdšie. Geografická atrofia je konečným štádiom suchej formy VPMD. Prejavuje sa ako ostro ohraničená oválna či okrúhla hypopigmentácia alebo priamo absencia RPE, ktorou presvitá cievnatka. Zpočiatku je atrofia len ľahká a lokalizovaná, postupne sa rozširuje často v podkovovitom tvare okolo foveoly, ktorú môže niekoľko rokov ponechať nedotknutú. Rozvoj atrofie taktiež súvisí s prítomnosťou drúz a hlavne s ich miznutím. [12]

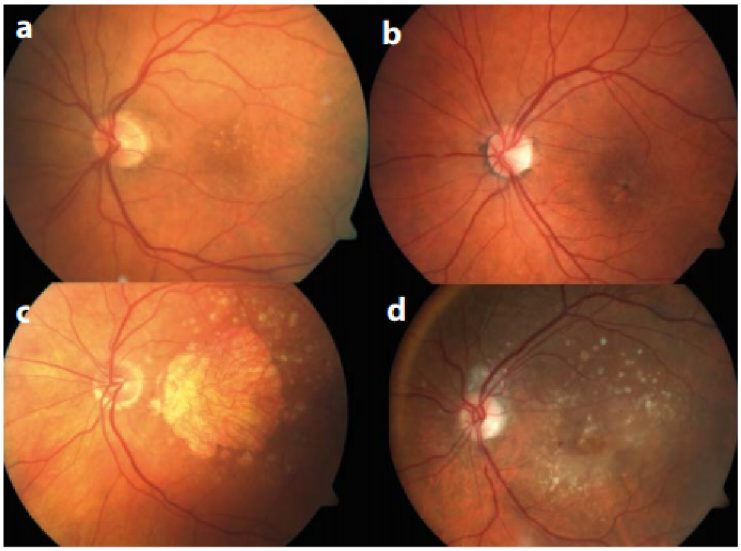
Vlhká forma

Vlhká forma je charakteristická abláciou (odlúpením) RPE, choroidálnou neovaskularizáciou (CNV) či subretinálnym krvácaním v makulárnej oblasti. Tvorba nových ciev je

obranná reakcia organizmu pred nedostatkom výživy makuly. Tieto novovytvorené cievy sú krehké a ľahko sa trhajú, čím dochádza ku krvácaniu a poškodeniu senzorických buniek v makule. Novovytvorené cievy taktiež prerážajú Bruchovu membránu, ktorou začnú presakovať tekutiny či krv. Presakovaním tekutiny trhlinou vzniká ablácia RPE. Prejavuje sa ako ostro ohraničené, kruhové či oválne vyklenutie žltavej alebo žltooranžovej farby. Disciformná jazva je posledným štádiom vlhkej formy. Má bielu alebo nažltlú farbu a môže byť pigmentovaná. Jazva môže mať aktívne neovaskulárne okraje, ktorými sa ďalej šíri do strán. Hlavnými symptómami väčšiny pacientov s vlhkou formou sú rozmazané videnie, deformácia obrazu a porucha ostrého videnia hlavne do blízka. [39]

Liečba

U suchej formy VPMD cielená liečba neexistuje. Za základný patolofyziologický proces je považovaný oxidatívny stres a terapia sa zameriava na podávanie látok, ktoré ovplyvnia jeho mechanizmus. Klinické štúdie dokázali že dlhodobý príjem antioxidantov (vitamín C, E, beta-karotén) a zinku pomáha spomaliť rozvoj VPMD. Liečba vlhkej formy má 2 základné spôsoby terapie. Prvým je fotodynamická terapia a druhým anti-VEFG liečba. Fotodynamická terapia je liečebná metóda pri ktorej sa kombinovane využíva intravenózne podanie liečebnej látky a laser.



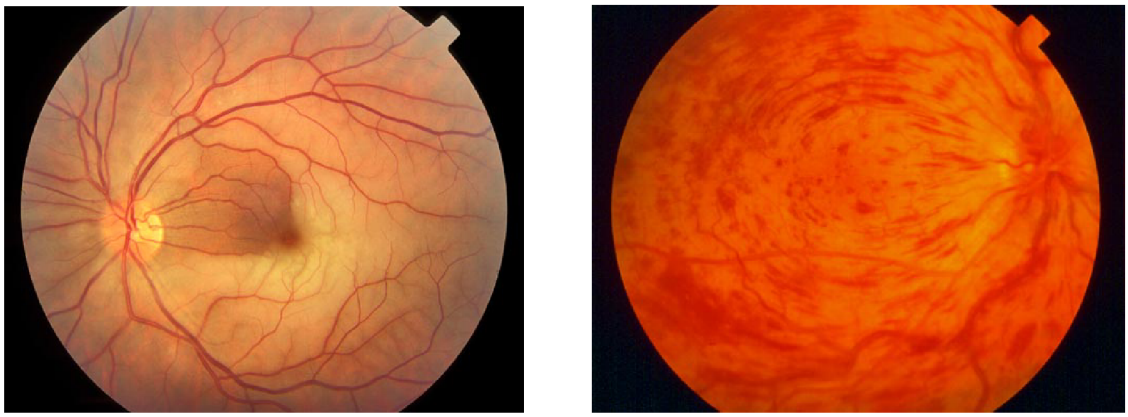
Obrázek 2.5: a) Suchá forma VPMD – drúzy, b) Suchá forma VPMD – dysgrupácia pigmentu, c) Geografická atrofia, d) Vlhká forma VPMD [39]

2.2.3 Ďalšie ochorenia sietnice

Obehové poruchy sietnice

Obehové poruchy (obrázok 2.6) sietnice sú očné ochorenia, ktoré vznikajú akútne a spôsobujú nebolestivú stratu zraku alebo časti zorného poľa. Dôvodom je zúženie alebo upchatie artérii alebo vén krvnou zrazeninou, ktorá putuje v krvnom obehu. Uzáver sietnicovej artérie sa prejavuje náhlou a ťažkou stratou zraku. Sietnica je šedobiela s čerešňovo žiariacou makulou. Ako liečba sa odporúča masáž oka a zníženie vnútroočného tlaku. Uzáver sietnicovej vény sa prejavuje rýchlym čiastočným poklesom zrakovej ostrosti. Nikdy však nedochádza

k úplnej slepote. Sietnicové vény sú široké, fialové a vinuté. V oku sa nachádzajú aj plamienkové a škvrnité hemoragie. Terč zrakového nervu je neostro ohraničený a v makule je edém. Hlavné rizikové faktory obehových porúch sietnice sú vysoký krvný tlak, hemokoagulácia, vysoký vek, cukrovka a ďalšie. [36]



(a) Uzáver sietnicovej artérie (b) Uzáver sietnicovej vény

Obrázek 2.6: Prejavy obehových porúch na sietnici. [20]

Odlúpenie sietnice

Odlúpenie sietnice (obrázok 2.7) vzniká odlúčením neuroretiny od pigmentového epitelu. Medzi tieto dva listy preniká subretinálna tekutina zo sklovca a cievnatky. Ku odlúpeniu sietnice dochádza pri úraze oka, ale býva aj komplikáciou pri iných ochoreniach ako napríklad diabetickej retinopatii. Odlúpenie sietnice sa prejavuje zábleskami svetla, tmavými pásmi alebo chumáčmi, ktoré je možné pozorovať pri pohľade na svetlý objekt. Nasleduje výpad časti zorného poľa (clona) a nakoniec pokles zrakovej ostrosti. Strata centrálnej zrakovej ostrosti signalizuje postup odlúpenia sietnice do miesta najostrejšieho videnia – makuly. Cieľom terapie odlúpenia sietnice je znovupriloženie sietnice a vytvorenie pevného spojenia medzi neuroretinou a pigmentovým epitelom. [36]

Obrázek 2.7: Odlúpenie sietnice. [25]

Obrázek 2.8: Hypertenzná retinopatia. [24]

Hypertenzná retinopatia

Hypertenzná retinopatia (obrázok 2.8) je súbor zmien na očnom pozadí, ktoré sú prejavom dlhodobo zvýšeného krvného tlaku. Vysoký krvný tlak vedie k spazmom ciev, k presakovaniu tekutiny mimo cievy a pri náhlom zvýšení krvného tlaku až ku krvácaniu. Pri hypertenznej retinopatii je možné naviac pozorovať ložiskové zmeny a to retinálne hemoragie, ischemické ložiská, lipoidné exudáty a edém makuly. Prítomný môže byť aj opuch, nedokrvenie alebo prekrvácanie. Poškodenie zraku prichádza postupne od zhoršenia zrakovej ostrosti až ku výpadku zorného poľa. Liečba predstavuje zníženie a udržiavanie hodnôt krvného tlaku.

2.3 Spracovanie obrazu

Nasledujúca kapitola popisuje základné techniky spracovania obrazu, ktoré boli využité pri implementácii.

2.3.1 Morfologické operácie

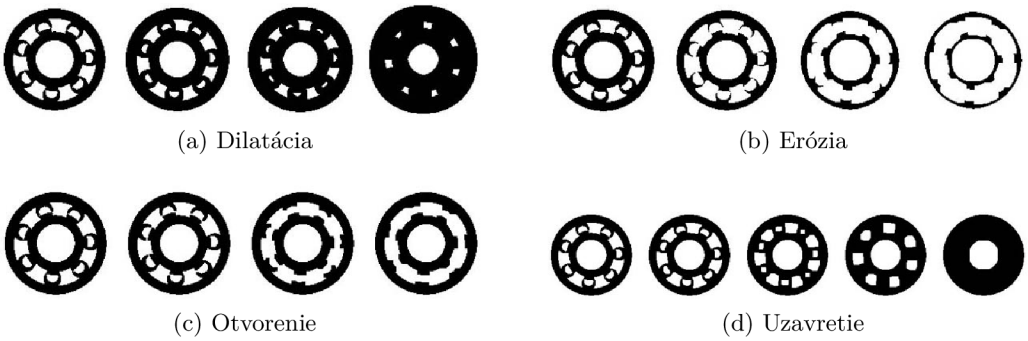
Morfologické operácie sú realizované ako relácie obrazu (bodová množina X) a menšej bodovej množiny (štrukturálny element B). Štrukturálny element B je systematicky posúvaný po X a výsledok transformácie je zapisovaný do výsledného binárneho obrazu. Medzi základné morfologické operácie patrí dilatácia a erózia, a od nich odvodené otvorenie a uzavretie.

Dilatácia

Dilatácia rozširuje objekty o jednu vrstvu na úkor pozadia. Používa sa na zaplnenie drobných dier a úzkych zálivov. Dilatácia skladá body dvoch množín na základe vektorového súčtu.

Erózia

Erózia skladá body dvoch množín na základe vektorového rozdielu. Eliminuje izolované body na pozadí, uberá hrúbku objektov a zložité objekty rozdeľuje.



(a) Dilatácia (b) Erózia

(c) Otvorenie (d) Uzavretie

Obrázek 2.9: Postupné aplikovanie morfologických operácií s konektivitou na 8 okolitých pixelov. [7]

Otvorenie

Otvorenie (rovnako aj uzavretie) využíva vzájomnú kombináciu morfologický operácii dilatácie a erózie. Využíva sa tu skutočnosť že tieto operácie nie sú navzájom inverznými operáciami. Otvorenie je erózia nasledovaná dilatáciou. Táto operácia prerušuje tenké spoje medzi objektami a zväčšuje medzery medzi nimi.

Uzavretie

Uzavretie je dilatácia nasledovaná eróziou. Spája objekty, ktoré sú blízko u seba, zaplňuje diery v objektoch a vyhladzuje ich obrysy.

2.3.2 Prahovanie

Prahovanie je najjednoduchšia metóda segmentácie obrazu, ktorá je rýchla a výpočtovo nenáročná. Na základe vopred zvolenej hodnoty prahu T (*threshold*) vyhodnocuje každý pixel obrazu. Bodom s hodnotou jasu väčšou než prah sa priradí 1, ostatným bodom sa priradí 0. Obraz s viacej úrovňami jasu sa takto prevedie na obraz s dvomi jasovými úrovňami – čiernou a bielou. Nech $f(i,j)$ je vstupný obraz a $g(i,j)$ výstupný obraz, prahovanie je potom popísané vzťahom:

$$g(i,j) = \begin{cases} 1 & pre\ f(i,j) >= T \\ 0 & pre\ f(i,j) < T \end{cases} \tag{2.1}$$

Prah je možné stanoviť rôznymi spôsobmi. Môže byť zadaný užívateľom, kedy sa skúšaním niekoľkých rôznych hodnôt hľadá hodnota, ktorá dáva najlepší výsledok alebo sa využijú metódy, ktoré sa snažia určiť prah automaticky. Tieto metódy využívajú napr. histogram, medián obrazu alebo percentuálny odhad plochy objektu, ktorý je v obraze hľadaný. Jedna hodnota prahu pre celý obraz však nebýva vhodná pre obrázky s rôznymi svetelnými podmienkami v rôznych častiach obrazu. V tomto prípade je vhodné využiť adaptívne prahovanie.

Adaptívne prahovanie rešpektuje rozdielne podmienky jasu v rôznych častiach obrazu a dáva lepšie výsledky ako globálne prahovanie. Princíp spočíva v postupnom skúmaní okolia každého bodu obrazu a prah T je určený na základe informácii z tohto okolia.

(a) Pôvodný obrázok (b) Globálne prahovanie (T=127) (c) Adaptívne prahovanie

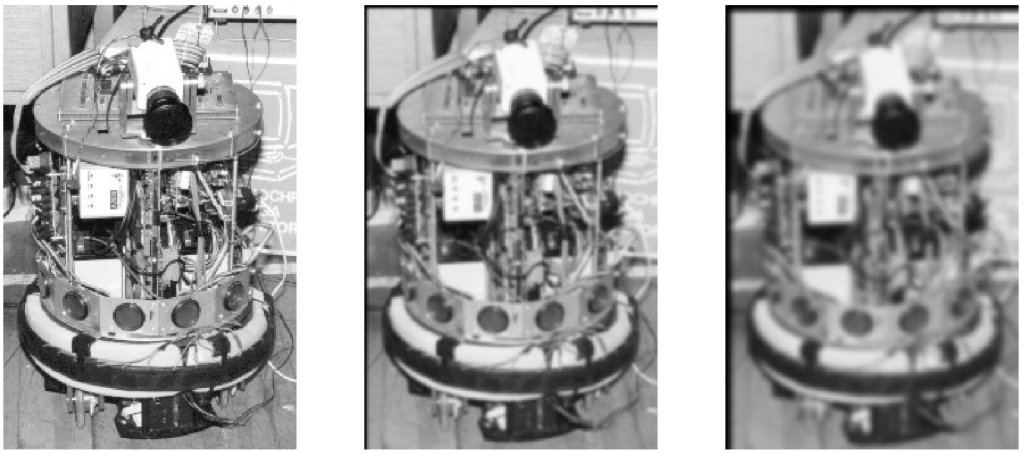
Obrázek 2.10: Prahovanie obrázku. [9]

2.3.3 Gaussove rozmazanie

Gaussove rozmazanie je jedna z metód, ktoré eliminujú šum v obraze. Je to často využívaná metóda pri predspracovaní obrázkov, ktoré sú určené na ďalšie skúmanie. Gaussove rozmazanie odstraňuje šum pomocou konvolúcie s Gaussovským konvolučným jadrom, ktorého hodnoty sa pre dvojrozmernú maticu vypočítajú z funkcie:

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{2.2}$$

kde x,y sú súradnice v obraze a σ^2 je smerodajná odchýlka, ktorá udáva strmosť Gaussovej funkcie, tj. ako rýchlo klesá s rastúcim x.



(a) Pôvodný obrázok (b) σ=1, jadro 5x5 (c) σ=2, jadro 9x9

Obrázek 2.11: Aplikovanie Gaussovho rozmazania. [13]

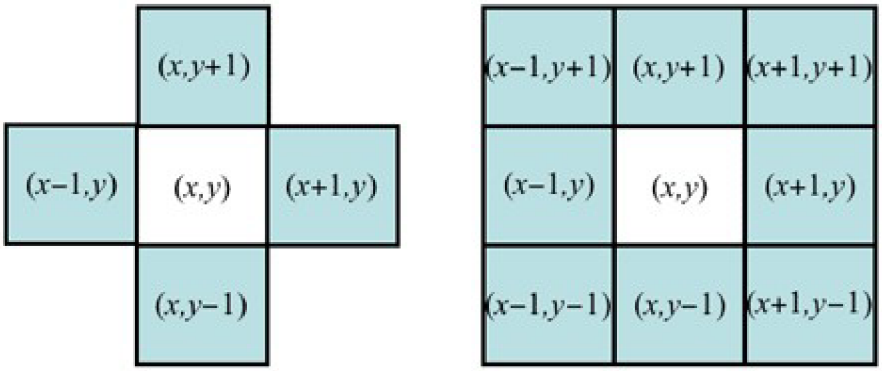
2.3.4 Algoritmus region growing

Algoritmus region growing je regiónovo orientovaná segmentačná metóda využívaná v počítačovej grafike. Ako prvé sú v obraze zvolené počiatočné body - semienka. Výber semienka je dôležitým faktorom, pretože pre rôzne semienka, dostávame rôzne výsledky. V ďalších krokoch sú skúmané okolia semienok (konektivita na 4 alebo 8 pixely obr. 2.12). Ak susedný pixel vyhovuje podmienkam, je začlenený do regiónu. Proces sa opakuje tak dlho pokiaľ už v obraze neexistujú susedné oblasti regiónu, ktoré vyhovujú kritériam. Kritériom priradenia pixelu do oblasti môže byť napríklad hodnota jasu, farba alebo grayscale hodnota. Matematicky je možné zapísať, že nový pixel je priradený do výberu ak:

$$|p_{seed} - p_{new}| < T \tag{2.3}$$

kde p_{seed} je porovnávaný parameter semienka a p_{new} je parameter nového pixelu. T je kritérium homogenity.

Nevýhodou tejto metódy je potreba určenia vhodného počiatočného semienka a kritéria homogenity. Pri nesprávnom výbere môžu byť do narastajúceho regiónu priradené aj oblasti, ktoré nie sú objektom záujmu.

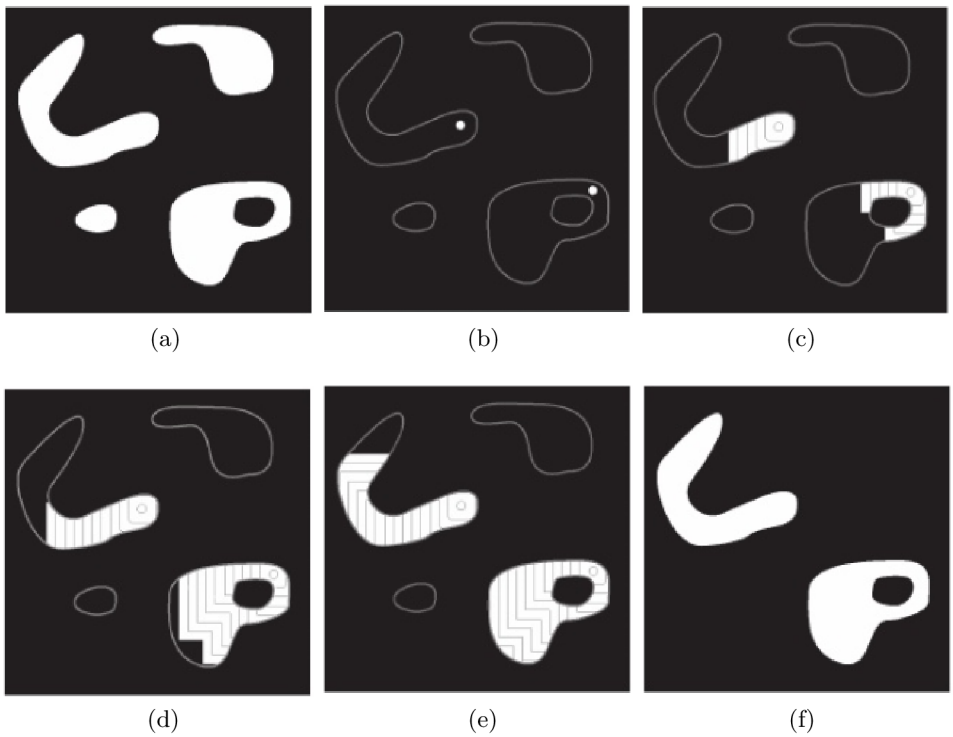


Obrázek 2.12: Konektivita na 4 a 8 okolité pixely. [2]

2.3.5 Morfologická rekonštrukcia dilatáciou

Morfologická rekonštrukcia transformuje obrázok nazývaný *marker* na základe obrázku nazývanom *mask* a štrukturálnom elemente B. Rekonštrukcia dilatáciou je založená na opakovanej geodetickej dilatácii. Najjednoduchšia geodetická dilatácia o veľkosti 1, $D_G^{(1)}(F)$ sa získa ako prienik dilatácie markeru F s elementom B a masky G [15]:

$$D_G^{(1)}(F) = (F \oplus B) \cap G \tag{2.4}$$



Obrázek 2.13: Rekonštrukcia dilatáciou: (a) Mask, (b) Marker, (c)-(e) Výsledok po 100, 200 a 300 iteráciách, (d) Finálny výsledok. [1]

Opakovaná dilatácia o veľkosti n sa vypočíta ako:

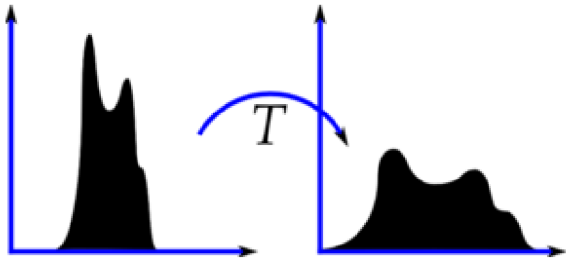
$$D_G^{(n)}(F) = D_G^{(n)}(D_G^{(n-1)}(F)) \tag{2.5}$$

Geodetická dilatácia skončí ak sa zrekonštruujú všetky objekty z G označené značkami na obrázku F. Ak sa dilatovaný obrázok prestane meniť, dosiahli sme rekonštrukcie. Rekonštrukciu dilatáciou je preto možné zapísať ako:

$$R_G^{(D)}(F) = D_G^{(k)}(F) \quad ak \quad D_G^{(k)}(F) = D_G^{(k+1)}(F) \tag{2.6}$$

2.3.6 Ekvalizácia histogramu

Ekvalizácia histogramu upravuje hodnoty jasu obrazu a snaží sa o ich rovnomerné zastúpenie. Histogram je diskrétna funkcia, ktorá predstavuje zastúpenie jednotlivých hodnôt jasu v obraze.



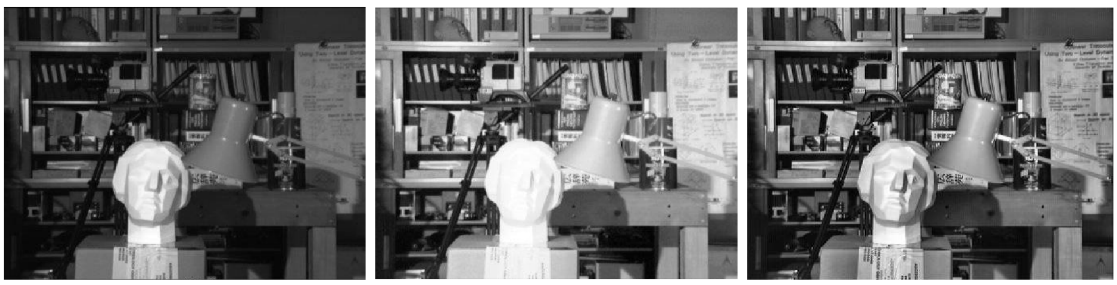
Obrázek 2.14: Histogram pred a po ekvalizácii. [8]

Adaptívna ekvalizácia histogramu (AHE)

Vychádza z globálnej ekvalizácie histogramu. V tejto metóde sa obraz rozdelí na menšie časti a úprava kontrastu prebieha na základe hodnôt v jednotlivých regiónoch. Ak však obraz obsahuje šum, AHE ho v jednotlivých regiónoch zosilí. Predísť tomu pomáha CLAHE.

Adaptívna ekvalizácia histogramu s obmedzením kontrastu (CLAHE)

CLAHE je modifikovaná metóda AHE. Má stanovený limit kontrastu. Ak nejaký blok histogramu presahuje nad stanovený limit, dané pixely sú uniformne distribuované do ostatných blokov. Na odstránenie artefaktov, ktoré vznikajú po obvode regiónov po ekvalizácii je aplikovaná bilineárna interpolácia. [8]



(a) (b) (c)

Obrázek 2.15: Ekvalizácia histogramu: (a) Pôvodný obrázok, (b) Globálna ekvalizácia, (c) CLAHE. [8]

Kapitola 3

Návrh a realizácia riešenia

V nasledujúcej kapitole bude popísaný jeden z možných postupov na detekciu ochorení a porovnanie snímkov. Ako prvé je popísané predspracovanie snímkov, ďalej sú popísané detekcie hlavných častí sietnice a to optický disk, fovea a krvné riečisko. Optický disk a fovea bude potrebná pre zostavenie súradnicového systému, krvné riečisko bude využité pri extrahovaní ochorení. Následne bude popísaná lokalizácia nálezov. Keďže algoritmus nie je schopný rozlíšiť drúzy od exudátov, ďalej sa budú obe spomínať ako exudáty.

3.1 Predspracovanie

Na začiatku je veľkosť každej snímky zmenená na výšku 600 pixelov a šírka je automaticky dopočítaná ku vstupnej snímke. Zmenšenie snímok zrýchli proces automatického spracovania.

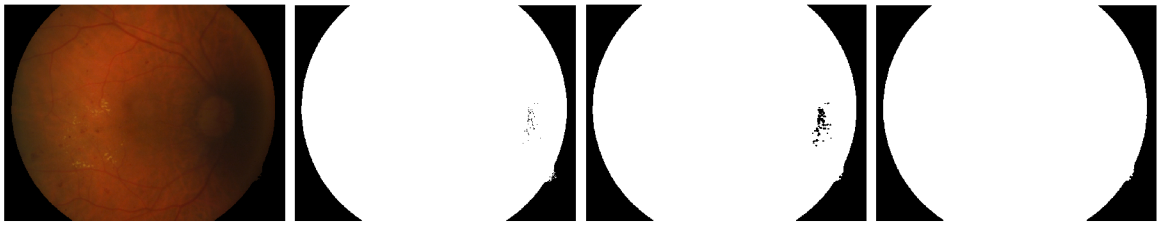
Snímka sietnice sa väčšinou skladá z dvoch častí: samotnej sietnice a tmavého pozadia, ktoré ju obkolesuje. Pre ďalšie spracovanie obrázkov je vhodné pozadie detekovať a vytvoriť masku sietnice. Na pôvodnú snímku sa položí vzniknutá maska, čím sa dosiahne, že pozadie budú tvoriť len pixely s hodnotou 0. Extrahovaním masky sa dosiahne rýchlejšie a presnejšie spracovanie snímkov v ďalších krokoch.

Pri segmentácií masky pozadia som vychádzala z postupu uvedenom v [37]. V tejto štúdii sa narozdiel väčšiny iných neaplikuje jednoduché prahovanie, ale využijú sa hodnoty jednotlivých RGB vrstiev a ich priemerná hodnota. Maska sa potom extrahuje ako:

$$maska(x,y) = \begin{cases} 1 & pre\ avg(R,G,B) < T_1,\ D < T_2 \\ 0 & inak \end{cases} \tag{3.1}$$

kde $D = |R-G| + |R-B| + |G-B|$ a T_1 a T_2 sú prahy, ktorých hodnoty boli empiricky stanovené na $T_1 = 42$ a $T_2 = 35$. Výsledok prahovania ukazuje obrázok 3.1b.

Pri zle osvetlených snímkach sa stáva, že maska obsahuje izolované pixely, preto prejde ešte ďalším spracovaním. Ako prvé sa aplikuje erózia, ktorá odstráni prípadné izolované pixely s hodnotou 255. Následne snímku spracuje algoritmus, ktorý postupne prechádza okrajové pixely snímky. Ak má pixel hodnotu 0, teda je čiernej farby a patrí ku pozadiu, stane sa semienkom pre FloodFill algoritmus. Všetky pixely, ktoré FloodFill postupne spracuje patria pozadiu. Extrahovanie pozadia je možné vidieť na obrázku 3.1.



(a) (b) (c) (d)

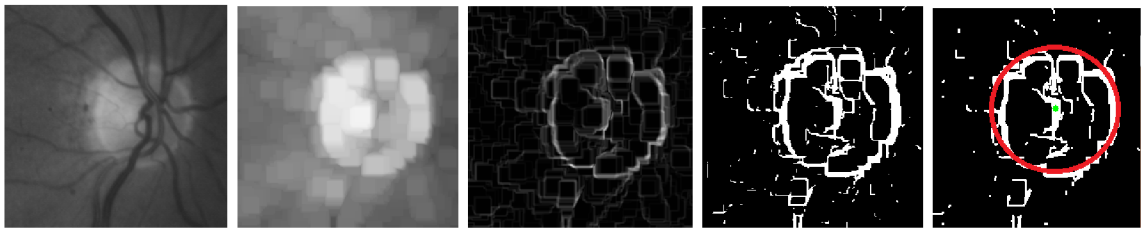
Obrázek 3.1: Extrahovanie masky pozadia pri zle osvetlenej snímke: (a) Vstupný obrázok, (b) Prahovanie, (c) Erózia, (d) Výsledná maska pozadia.

3.2 Lokalizácia optického disku

Detekcia optického disku je potrebná z dvoch dôvodov. Prvým je podobná intenzita OD a exudátov. Jeho správnou lokalizáciou bude možné túto oblasť odstrániť pri hľadaní nálezov. Druhým dôvodom je zostavenie súradnicového systému, podľa ktorého bude zaznamenávaná poloha nálezov.

Lokalizácia disku prebieha na zelenom kanály vstupného snímku. Tento kanál poskytuje najlepší kontrast prvkov a nálezov sietnice voči jej pozadiu. Následne je na obrázku zvýšený kontrast algoritmom CLAHE s clip limitom 3 a odstránený šum Gaussovým vyhladením s jadrom 3×3. V ďalších krokoch bude popísané určenie regiónu nášho záujmu (ROI), v ktorom sa bude neskôr hľadať OD. Snímka sa začne prahovať s postupne znižujúcim prahom. Znamená to, že v prvom cykle nebude na obrázku vidieť nič, v každom ďalšom cykle budú pribúdať pixely, ktoré patria najsvetlejším oblastiam. V zdravom snímku tvorí najsvetlejšiu oblasť práve OD, preto by sa na obrázku mal objaviť ako prvý. V každom cykle sú v obrázku vyhľadané kontúry. Keď najväčšia kontúra obsiahne 0,4% z celkovej plochy obrázku, našiel sa ROI.

Pri spracovaní ROI som vychádzala z postupu uvedenom v [11]. Na ROI sa ako prvé aplikuje dilatácia s veľkosťou 17×17. Dilatáciou sa odstránia cievy a zjednotí sa kruh, ktorý predstavuje OD. Na detekciu hrán sa využije Sobelov operátor (obrázok 3.2b). V ďalšom kroku sa na binarizáciu využije OTSU prahovanie. Toto prahovanie automaticky vyhľadáva hodnotu prahu podľa histogramu. Na obrázok sa ďalej aplikuje erózia, ktorá eliminuje izolované body a ztenší čiary. Z obrázku sa taktiež orežú kraje, ktoré neobsahujú pixely s hodnotou 255. Tým sa zmenší ROI a spresní následné vyhľadávanie kružnice. Kružnica sa



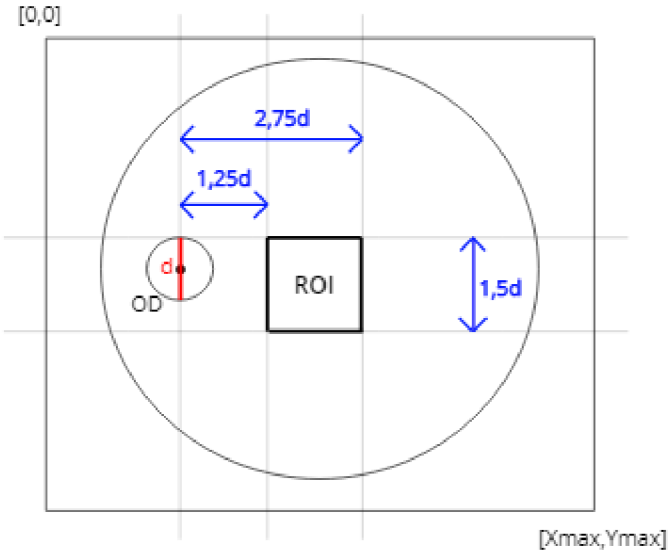
(a) (b) (c) (d) (e)

Obrázek 3.2: Lokalizácia OD: (a) ROI, (b) Dilatácia, (c) Sobelov operátor, (d) OTSU prahovanie, (e) Erózia a Houghova transformácia.

vyhľadáva pomocou Houghovej transformácie. Výsledok lokalizácie na vstupnom obrázku je možné vidieť na 3.4d.

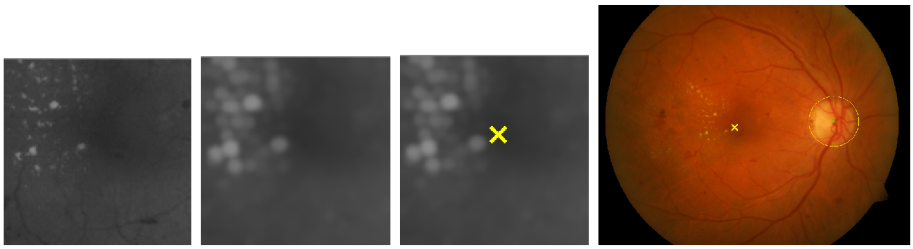
3.3 Lokalizácia fovey

Pri hľadaní fovey sa využije fakt, že sa zvyčajne nachádza v vzdialenosti $2-2,5 \cdot d$ od centra OD, pričom d je priemer OD. Podľa štúdie [21] sa až v 95% prípadoch fovea vyskytovala vo vzdialenosti $1,5-3d$ vertikálne a $0-0,6d$ horizontálne od stredu OD. Na základe týchto poznatkov som zvolila ROI vo vzdialenostiach $1,25-2,75 \cdot d$ vertikálne a $-0,5-1 \cdot d$ horizontálne (obrázok 3.3). Hodnoty som mierne pozmenila kvôli lepším výsledkom. Výsledkom tak je ROI s veľkosťou $1,5 \cdot d \times 1,5 \cdot d$.



Obrázek 3.3: Určenie ROI pre lokalizáciu fovey.

ROI je rozdelené na 3 farebné kanály a pre ďalšiu prácu je znovu zvolený zelený kanál. Ako prvá sa aplikuje dilatácia s veľkosťou 11×11. Tým sú z obrázku odstránené tenké cievky, prípadne tmavé nálezy. Obrázok sa vyhladí Gaussovým filtrom s jadrom 13×13 a tým je



(a) (b) (c) (d)

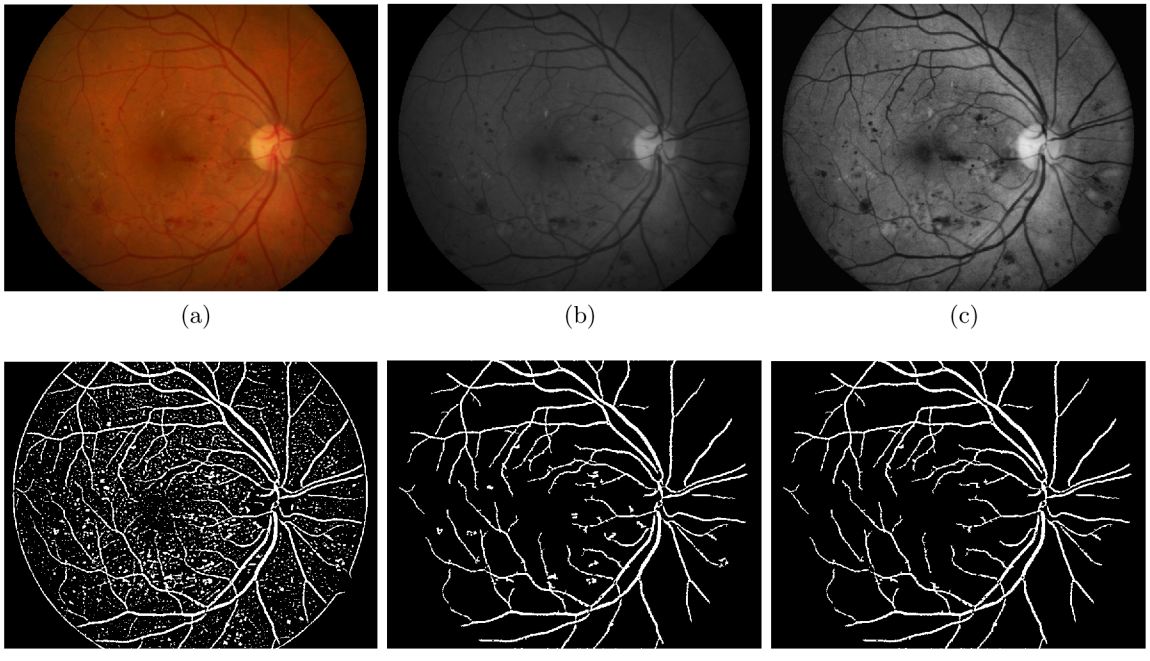
Obrázek 3.4: Lokalizácia fovey: (a) Zelený kanál ROI, (b) Dilatácia a Gaussove rozmazanie, (c) Najtmavšia oblasť, (d) Vstupná snímka s lokalizovaným OD a foveou.

predspracovaný na následné prahovanie. Postup prahovania detekcie fovey je v tomto kroku podobný ako pri vyhľadávani OD, rozdiel je v postupne sa zvyšujúcom prahu. Na obrázku sa každým cyklom zobrazujú viac kontúr tvorených tmavými pixelmi. Ak najväčšia kontúra dosiahne obsah 0,1% celého obrázku. Jej stred je prehlásený za stred fovey.

3.4 Segmentácia krvného riečiska

Pred samotnou lokalizáciou nálezov je vhodné segmentovať krvné riečisko. Keďže krvné cievy majú podobnú tmavo červenú farbu ako hemoragie a mikroaneuryzmy, pri lokalizácií nálezov sa často do výberu dostávajú aj časti ciev. Správnou lokalizáciou krvného riečiska je možné ich z výberu odstrániť a dôjsť tak k lepším výsledkom. Postup segmentácie krvných ciev je možné vidieť na obrázku 3.5.

Upravený a maskou preložený obrázok je rozdelený na 3 farebné kanály. Na ďalšiu prácu je zvolený zelený kanál, pretože poskytuje najlepší kontrast. Na obrázok je následne aplikovaný CLAHE s hodnotou 3 a Gaussove rozostrenie s jadrom s veľkosťou 3x3. Ďalším krokom je použitie adaptívneho prahovania. Prahovaním sa extrahujú krvné cievy, ale aj obrys masky sietnice, nálezy či drobné zhluky, ktoré patria pozadiu. Časti, ktoré nepatria krvnému riečisku je potrebné odfiltrovať. Ako prvý sa odstráni obrys sietnice a všetky kontúry, ktoré majú menej ako 60 pixelov (obrázok 3.5e). Väčšie kontúry sa odstránia pomocou SimpleBlobDetector-u. Detector sa nastaví tak, aby vyhľadával zhluky tvarom blížiace sa kružnici s maximálnym obsahom do 500 pixelov. Neželané zhluky často nemajú len kruhový útvar, ide hlavne o hemoragie, ktoré sa odstránia tak, že všetkým zvyšným



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Obrázek 3.5: Segmentácia krvného riečiska: (a) Vstupný obrázok, (b) Zelený kanál, (c) CLAHE a Gaussove rozostrenie, (d) Adaptívne prahovanie, (e) Odstránenie obrysu masky a drobných častí, (f) Finálna maska ciev po odstránení väčších zhlukov.

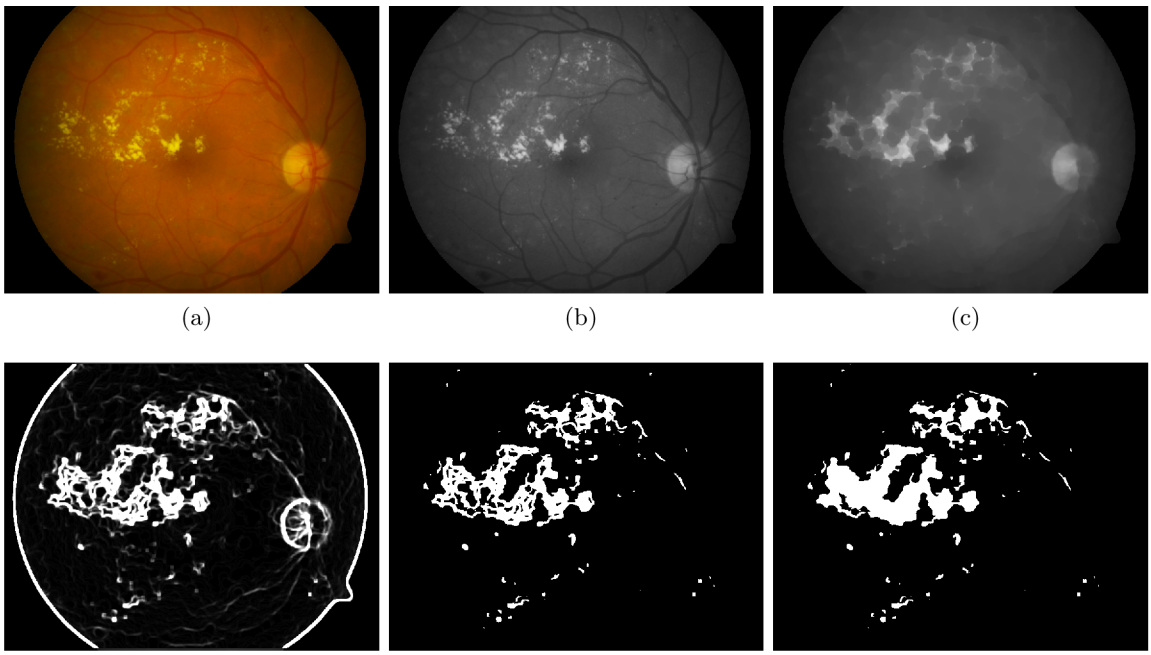
kontúram v obrázku sa opíše obdĺžnik. Ak je pomer jeho strán menej ako 2:1, jeho dlhšia strana má menej ako 100 pixelov a kontúra v obdĺžniku zapĺňa väčšinu jeho obsahu, je zhluk odstránený z výberu (obrázok 3.5f).

3.5 Lokalizácia ochorení

3.5.1 Exudáty

Exudáty sú charakteristické jasnou žltou farbou a ostrým ohraničením. Na základe týchto dvoch vlastností budú pri lokalizácii vytvorené dve kandidátske oblasti KO_1 a KO_2. Pri KO_1 som čiastočne vychádzala z postupu uvedenom v [30]. Algoritmus pracuje s intenzitou a využíva výberový rozptyl. KO_2 sú vytvorené pomocou algortimu region growing na základe ostrého ohraničenia exudátov. Pri implementovaní KO_2 som sa opierala o štúdiu [29]. Obe kandidátske oblasti sú spracovávané na zelenom kanály, ktorý poskytuje najlepší kontrast medzi ochoreniami a pozadím sietnice.

Lokalizácia na základe kontrastu



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Obrázek 3.6: Segmentácia kandidátskych oblastí na základe intenzity: (a) Vstupný obrázok, (b) Zelený kanál, (c) Uzavretie, (d) Výberový rozptyl, (e) OTSU a odstránenie masky a OD, (f) Kandidátske oblasti.

Prvá kandidátska oblasť, je vytvorená na základe jasne žltej farby exudátov. Oblasti sietnice, ktoré obsahujú exudáty sa vyznačujú vysokým kontrastom medzi jasnými ochoreniami a pozadím sietnice. Problémom sú však krvné cievy, ktoré sa na snímkach vyznačujú tmavou farbou oproti pozadiu a taktiež tak vytvárajú vysoký kontrast. Preto je prvým krokom ich odstránenie. Na snímku sa aplikuje uzavretie s jadrom s veľkosťou 17. Veľkosť jadra

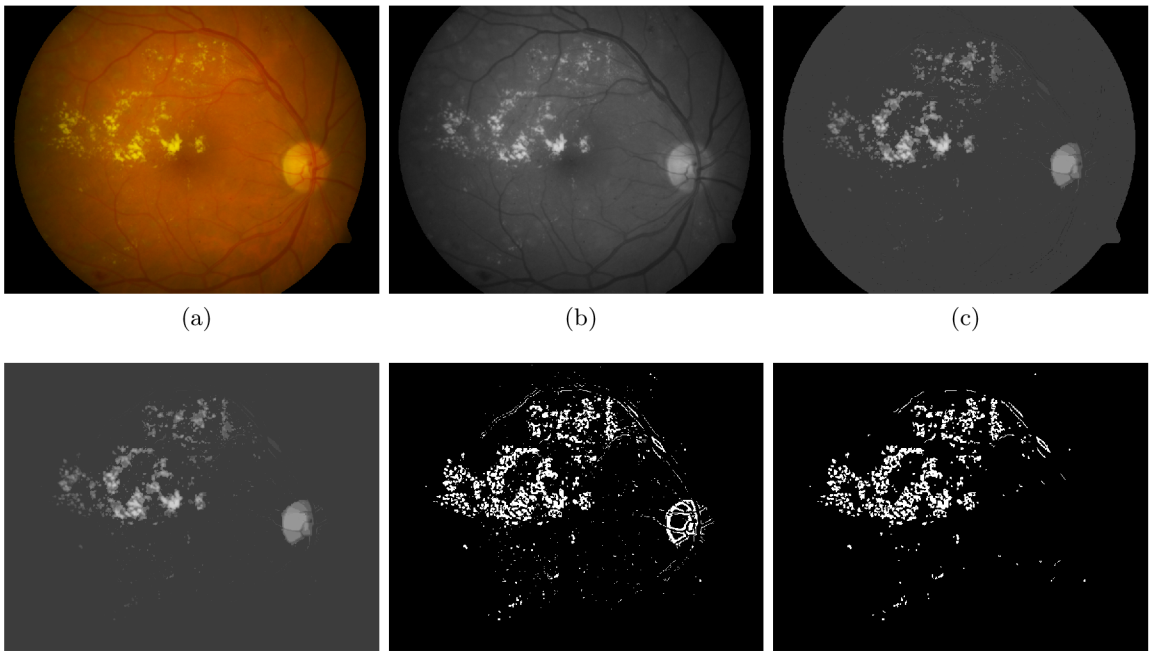
by mala byť väčšia ako maximálna šírka ciev. Na uzavretom obrázku sa pre každý pixel vypočíta výberový rozptyl. Výsledný obrázok E dostaneme podľa vzorca:

$$E(x) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i \in W(x)} \Big(E_1(i) - \mu_{E_1}(x) \Big)^2 \tag{3.2}$$

kde x sú všetky pixely v okne $W(x)$, N je počet pixelov v $W(x)$, $\mu_{E_1}(x)$ je priemerná hodnota $E_1(x)$. Veľkosť okna je stanovená na 7×7 pixelov. Výsledok je možné pozorovať na obrázku 3.6d. Na vzniknutý obrázok je aplikované OTSU prahovanie a z obrázku sa odstránia oblasti optického disku a obrys masky pozadia. Keďže kandidátnymi oblasťami by nemali byť len obrysy exudátov, posledným krokom je vyplnenie dier vzniknutých kontúr.

Lokalizácia na základe hrán

Pri hľadaní druhých kandidátskych oblastí je využitý algoritmus region growing. Algoritmus region growing sa aplikuje na zelený kanál vstupného obrázku. Konektivita algoritmu je nastavená na 4 okolité pixely a prah na hodnotu 3. Algoritmus si postupne za semienka vyberá pixely obrázku, ktoré ešte neboli zaradené do žiadnej oblasti. Po výbere semienka p sa kontrolujú jeho 4 okolité pixely. Ak je rozdiel ich hodnôt menší ako 3, nový pixel p_{new} je priradený do oblasti a stáva sa p. Tento proces sa opakuje pokiaľ všetky pixely v oblasti nemajú susedov s hodnotou rovnou a väčšou ako 3 od ich vlastnej hodnoty. Potom je vypočítaná priemerná hodnota pixelov v oblasti. Touto hodnotou sa daná oblasť vyplní. Dostaneme tak obrázok s jednotnou farbou pozadia, z ktorého vystupujú ostro ohraničené objekty (obrázok 3.7c).



(a) (b) (c)

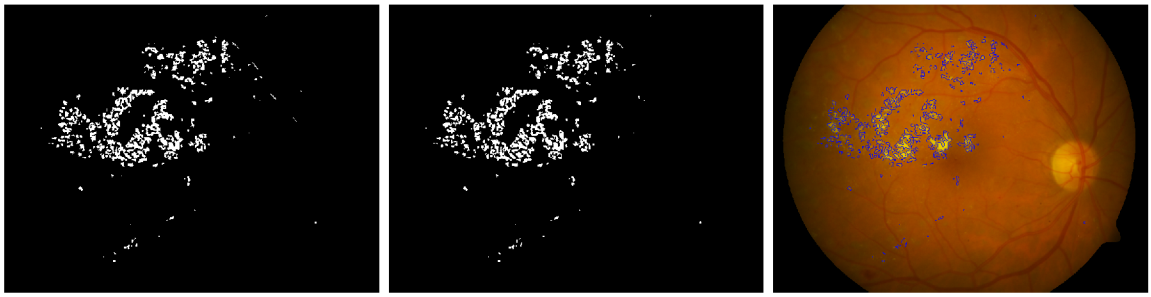
(d) (e) (f)

Obrázek 3.7: Segmentácia kandidátskych oblastí na základe ohraničenia: (a) Vstupný obrázok, (b) Zelený kanál, (c) Algoritmus region growing, (d) Odstránenie tmvých oblastí, (e) Adaptívne prahovanie, (f) Kandidátske oblasti po odstránení šumu a OD.

Keďže exudáty, ktoré sú predmetom záujmu, majú od pozadia svetlejšiu farbu, z obrázku sú odstránené všetky tmavšie objekty ako je pozadie. Za farbu pozadia je zvolená hodnota, ktorá sa v obrázku vyskytuje najčastejšie. V ďalšom kroku je na obrázok aplikované adaptívne prahovanie. Tým dostaneme binárny obrázok, ktorý však obsahuje drobný šum, keďže snímka nebola pred spracovaním kvôli region growing algoritmu nijak vyhladená. Preto sú z obrázku odstránené všetky kontúry, ktoré majú menej ako 3 pixely. Posledným krokom je odstránenie oblasti OD.

Finálna detekcia exudátov

Z kandidátskych oblastí, ktoré sú popísané v predošlých sekciách prienikom vzniknú finálne kandidátske oblasti, ktoré ešte môžu obsahovať okolie krvných ciev. Tieto oblasti, je možné pozorovať aj v hornej časti obrázku 3.7f. Správnou detekciou krvného riečiska a jeho rozšírením je možné tieto oblasti z výberu odstrániť. Keďže algoritmus na segmentáciu krvných ciev zlyhával práve v oblasti exudátov a za cievy vyberal aj oblasti medzi nimi. To viedlo k odstráneniu veľkého množstva nálezov. Preto som dilatované krvné cievy odstránila len z regiónu v okolí OD, kde sa falošné oblasti vyskytovali najčastejšie. Výsledok lokalizácie exudátov zobrazuje obrázok 3.8c.



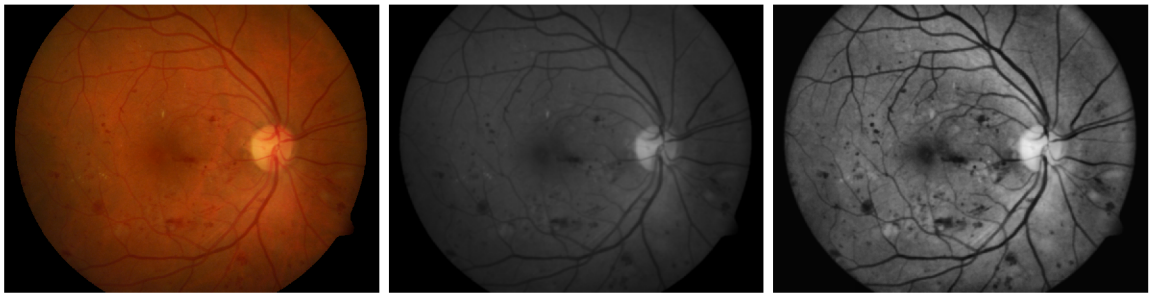
(a) (b) (c)

Obrázek 3.8: Finálna detekcia exudátov: (a) Prienik kandidátskych oblastí, (b) Odstránenie falošných exudátov z okolia ciev, (c) Exudáty.

3.5.2 Hemoragie a mikroaneuryzmy

Mikroaneuryzmy sa na snímkach prejavujú ako malé tmavo červené bodky. Hemoragie sú farbou rovnaké, líšia sa však veľkosťou a tvarom. Môžu byť niekoľko násobne väčšie a v rôznych tvaroch pripomínajúce fľaky alebo striekance. Pri implementácií som sa opierala o [14].

Zo vstupného snímku je extrahovaný zelený kanál, na ktorý sa aplikuje Gaussove rozostrenie, ktoré obrázok vyhladí a zbaví drobného šumu. Obrázok je následne upravený algoritmom CLAHE s limitom 4.



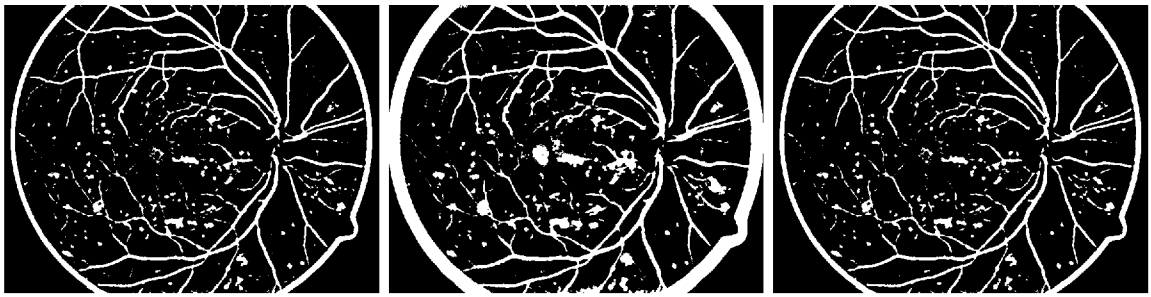
(a) (b) (c)

Obrázek 3.9: Predspracovanie snímky: (a) Vstupná snímka, (b) Zelený kanál a Gaussove rozmazanie, (c) CLAHE.

Po predspracovaní obrázku sa pre každý pixel p vyberie okolie I_p veľkosti $M \times M$, ktoré je vycentrované na p. P sa považuje tmavšie ako pozadie ak je jeho hodnota menšia ako zlomok t_G priemernej hodnoty okolia μI_p. Matematicky je možné zapísať, že pixel je tmavší ako okolie ak:

$$p < t_G \cdot \mu(I_p) \tag{3.3}$$

Hodnota t_G je nastavená na 0,85. Táto hodnota vykazovala najlepšiu úspešnosť. Algoritmus sa na obrázku prevedie vždy dva krát. Raz s veľkosťou okna $M = 20$ a druhý krát s veľkosťou $M = 50$ pixelov. Výstup algoritmu je možné vidieť na obrázkoch 3.10a a 3.10b. Obrázky sa následne stanú vstupmi pre rekonštrukciu dilatáciou. Obrázok na ktorom bolo použité okno 20×20 sa stane maskou a obrázok s oknom 50×50 bude marker. Obrázok 3.10c zobrazuje rekonštrukciu dilatáciou. Tento obrázok je možné považovať za kandidátske regióny pre hemoragie a mikroaneuryzmy. Obrázok však obsahuje veľké množstvo pixelov, ktoré ochoreniam nepatria a je potrebné odstrániť ich. Algoritmus sa v nasledujúcej časti rozdelí na detekciu hemoragií a detekciu mikroaneuryziem (algoritmus nie je schopný rozlíšiť mikroaneuryzmy a malé hemoragie, v danej časti budú detekované ochorenia do veľkosti 60 pixelov). Obe začínajú svoju prácu na obrázku po rekonštrukcií.



(a) (b) (c)

Obrázek 3.10: Binarizácia obrázku: (a) Veľkosť okna $M = 20$, (b) Veľkosť okna $M = 50$, (c) Rekonštrukcia dilatáciou.

Mikroaneuryzmy

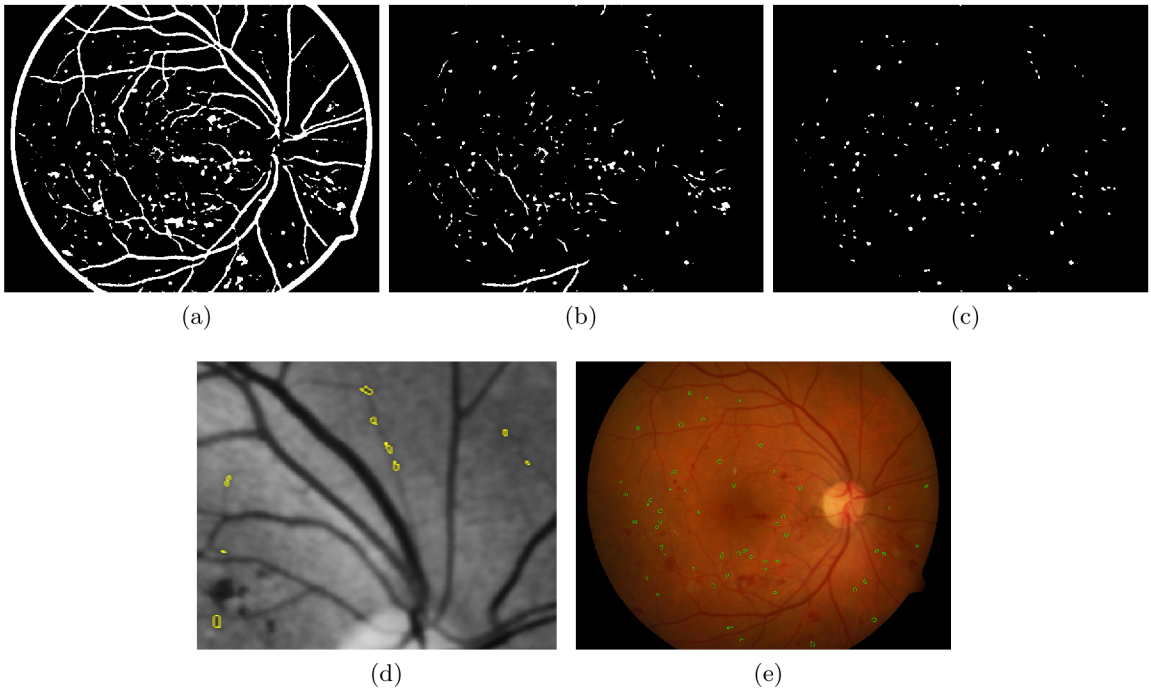
Pri extrahovaní mikroaneuryziem sa využijú ich základné vlastnosti ako cirkularita a veľkosť. Ako prvé sú z kandidátskych oblastí odstránené všetky kontúry, ktoré majú obsah viac ako 60 a menej ako 3 pixely.

Ďalší filter odstráni kontúry, ktoré nemajú kruhový tvar. V tomto kroku je pre každú kontúru vypočítaná hodnota cirkularity C podľa vzorca:

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{o^2} \tag{3.4}$$

kde o je obvod a S je obsah kontúry. Čím sa C viac blíži ku hodnote 1, tým sa útvar viac podobá kruhu. Všetky kontúry, ktoré majú C menšiu ako 0,45 sú vyradené z výberu. Výsledok zobrazuje obrázok 3.11c.

Na odstránenie ďalších falošných podozrivých oblastí je použitý algoritmus region growing. Region growing sa aplikuje na každú kontúru. Ak sa kontúra po tomto algoritme príliš zväčší, ide pravdepodobne o časť cievy alebo pozadia. Za semienko je vždy zvolený najtmavší pixel, ktorý by mal predstavovať stred ochorenia. Konektivita algoritmu je nastavená na 4 okolité pixely a prah na hodnotu 12. Rozdiel oproti region growing algortimu, ktorý bol použitý v predchádzajúcej časti u segmentovaní exudátov je, že nový pixel, ktorý sa pridáva do oblasti je stále porovnávaný so vstupným semienkom. Na obrázku 3.11d je možné vidieť časť sietnice so žltými obrysmi kontúr, ktoré algoritmus odstránil z výberu.



(a) (b) (c)

(d) (e)

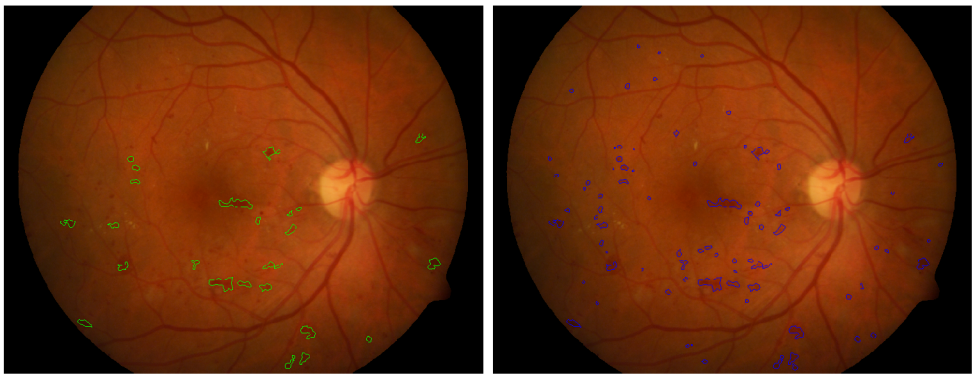
Obrázek 3.11: Detekcia mikroaneuryziem: (a) Snímka po rekonštrukcií, (b) Odstránené veľké kontúry, (c) Kontúry s $C > 0,45$, (d) Odstránené kontúry algoritmom region growing, (e) Detekované ochorenia.

Hemoragie

Extrakcia hemoragií prechádza viacerými filtrami, pretože na rozdiel od mikroaneuryziem sa nedá spoliehať na ich kruhový tvar a malú veľkosť. Filtrácia pixelov prebieha v týchto krokoch:

- Z výberu sa odstránia všetky kontúry, ktoré majú obsah menší ako 60 pixelov (zhluky do 60 pixelov boli spracované v predošlej sekcii).
- Odstráni sa kruhový obrys masky a cievy.
- Keďže algoritmus na extrakciu ciev nepracuje na 100%, niekedy sa stane, že minie tenšie cievy alebo do výberu zahrnie aj ochorenia. Ďalšími krokmi sú preto odstránenie tenkých podlhovastých zhlukov z kandidátskych oblastí, u ktorých je pravdepodobné že sú cievy. Naopak do výberu sa priradia kontúry z obrázku po rekonštrukcií, ktorých $C > 0,45$ a boli odstránené spolu s cievami.
- Využije sa algoritmus region growing podobne ako v predošlej sekcii. Ak sa obsah kontúry zväčší dvojnásobne, táto kontúra je vyradená z výberu. Konektivita algoritmu je 4 pixely a prah má hodnotu 6.
- Z podozrivých oblastí sa odstráni fovea.
- Problémom je ak sa v obrázku nachádzajú a oblasti s exudátmi. Algoritmus totiž vyhodnotí miesta medzi exudátmi, ktoré v skutočnosti patria pozadiu za nálezy. Preto sa na kontúry v týchto oblastiach znovu aplikuje algoritmus region growing, avšak s väčším prahom, a to 20.

Výsledok extrahovania hemoragií je možné vidieť na obrázku 3.12a. Keďže algoritmus nie je schopný rozlíšiť mikroaneurizmy a malé hemoragie, obe oblasti sú spojené do 1 finálneho výberu (obrázok 3.12b) a v ďalšej kapitole sa spomínajú už len ako hemoragie.



(a) (b)

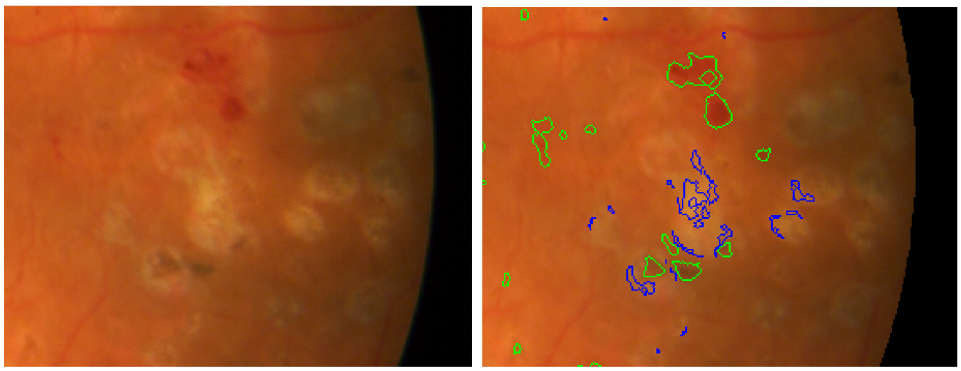
Obrázek 3.12: Detekcia hemoragií: (a) Detekované hemoragie, (b) Hemoragie a mikroaneuryzmy.

Nesprávna detekcia nálezov

Exudáty

U detekcie exudátov predstavovali najväčší problém svetlé miesta v okolí krvných ciev. Správnym extrahovaním a rozšírením krvného riečiska je možné tieto miesta odstrániť. Spolu so svetlými miestami v okolí ciev však môže byť odstránené aj exudáty, ktoré sa nachádzajú v ich okolí.

Ďalším problémom sú koagulačné ložiská, ktoré vznikajú po laserovom ošetrení sietnice. V mnohých prípadoch však nemajú natoľko ostré ohraničenie aby boli považované za exudáty. Koagulačné ložiská, ktoré boli nesprávne označené za nálezy sú zobrazené na obrázku 3.13.



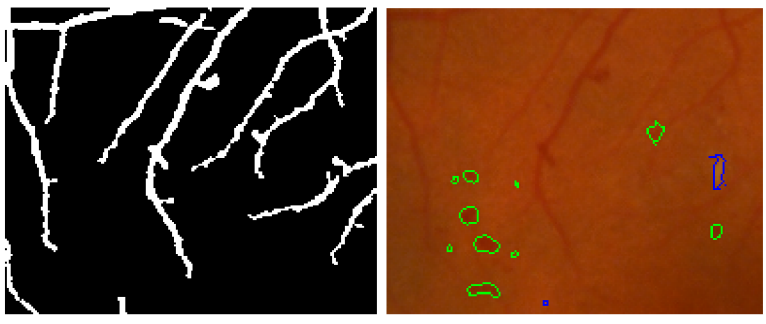
(a) (b)

Obrázek 3.13: Nesprávna detekcia na snímke s koagulačnými ložiskami: (a) Vstupná snímka, (b) Výstupná snímka (modrou sú vyznačené exudáty, zelenou hemoragie).

Hemoragie

U hemoragií dochádza k minutiu nálezu v prípade, že sa nachádza v tesnej blízkosti cievy. Algoritmus berie nález v tom prípade ako časť krvného riečiska. Túto situáciu je možné pozorovať na obrázku 3.14.

Podobne ako u exudátov, ďalším nepriaznivým javom pri extrahovaní hemoragií sú koagulačné jazvy. V tomto prípade už staršie, ktoré sa časom sfarbia do tmavo šedej farby. Jazvy ktoré boli nesprávne zvolené za hemoragie zobrazuje obrázok 3.13.



(a) (b)

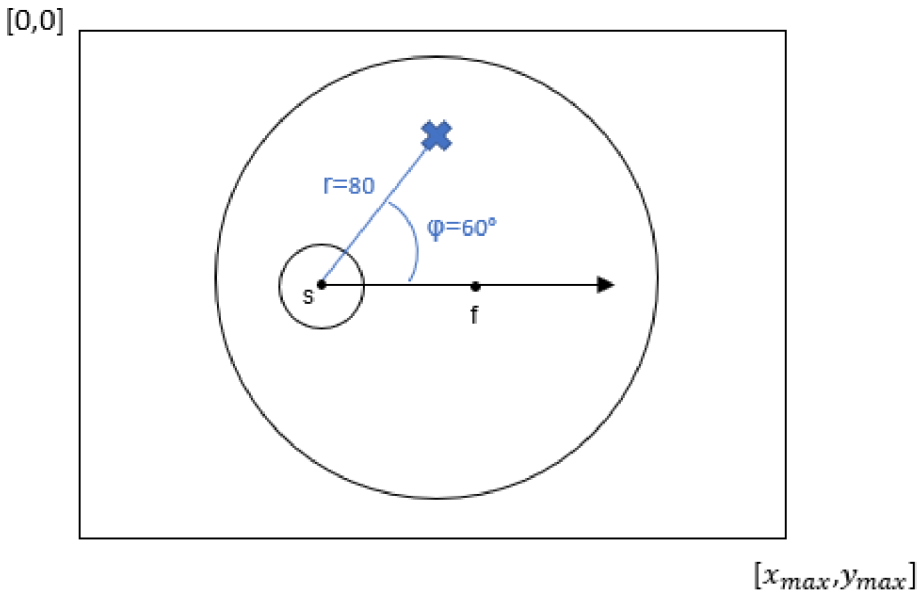
Obrázek 3.14: Minuté nálezy: (a) Krvné riečisko, (b) Snímka s vyznačenými hemoragiami.

3.6 Porovnanie snímkov

Posledným krokom je porovnanie oboch snímkov. Sietnice je potrebné správne otočiť prispôsobiť veľkosťou. Na to sú využité OD a fovea, ktoré poskytujú 2 orientačné body v snímku. Obe sietnice sa natočia tak aby priamka spájajúca stred OD a fovey bola rovnobežne s osou x. Poloha a veľkosť všetkých nálezov extrahovaných v predchádzajúcich kapitolách sa uloží do dátovej štruktúry. Keďže nálezy sa môžu vyskytovať v rôznych tvaroch, do súradnicového systému sa zaznamenáva ich centroid. Poloha z kartézskeho súradnicového systému je prepočítaná do polárneho súradnicového systému. V polárnom súradnicovom systéme, prvá súradnica r udáva vzdialenosť od počiatku sústavy súradníc a druhá súradnica φ udáva uhol spojnice tohoto bodu a počiatku od zvolenej osy ležiacej v rovine zvyčajne osy x kartézskeho súradnicového systému. Prevod kartézskych súradníc na polárne je udaný vzorcom:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi &= arctg\left(\frac{y}{x}\right) \end{aligned} \tag{3.5}$$

V snímku sietnice tvorí počiatok súradnicovej sústavy stred OD a os podľa ktorej sa vypočíta uhol tvorí priamka spájajúca OD a foveu (obrázok 3.15). Pri ukladaní plochy, ktorú nález v obrázku zaberá, je potrebné počítať s pomerom, v akom sú jednotlivé snímky. Pomer sa získa zo vzdialenosti OD a fovey a nálezy menšieho snímku sa pri ukladaní touto hodnotou prenásobia. Plocha, ktorú nález zaberá je vypočítaná funkciou z knižnice OpenCV $contourArea()$, vzdialenosť r je udaná v pixeloch. Program predpokladá, že obe vstupné snímky majú rovnaký zorný uhol. Program je tak v konečnom dôsledku schopný porovnať počet nálezov na snímkach, plochu ktorú nálezy zaberajú a má informácie o ich umiestnení.



Obrázek 3.15: Polárny súradnicový systém. Modrým krížikom je označený nález, s je stred OD a f označuje foveu.

3.7 Implementácia

Program je implementovaný v jazyku C++ a využíva knižnicu OpenCV verzie 3.1, ktorá poskytuje funkcie na spracovanie obrazu. Program bol vyvíjaný pod operačným systémom Windows 10 vo vývojovom prostredí Visual Studio 2015. Program je kvôli lepšej prehľadnosti rozdelený do viacerých súborov. Súbor *Source.cpp* je jadrom programu – spracúva parametre a volá potrebné funkcie na detekciu ochorení a porovnávanie snímkov.

Program je možné spustiť s jednou snímkou na vstupe a overiť si tak správnosť lokalizácie OD, fovey alebo ochorení. V tom prípade sú parametre nasledujúce:

- `--help` – Zobrazí nápovedu a ukončí sa.
- `-i/--image [param]` – Povinný parameter s cestou ku obrázku.
- `-d/--destination [param]` – Povinný parameter s cestou ku priečinku kde budú spracované obrázky uložené.
- `-l/--localize` – Lokalizácia OD a fovey.
- `-e/--exudates` – Detekcia exudátov.
- `-h/--hemorrhages` – Detekcia hemoragií.

Aby program porovnal 2 snímky, je potrebné spustiť ho s 3 parametrami:

- `-i1/--image1 [param]` – Povinný parameter s cestou ku prvému obrázku.
- `-i2/--image2 [param]` – Povinný parameter s cestou ku druhému obrázku.
- `-d/--destination [param]` – Povinný parameter s cestou ku priečinku kde budú spracované obrázky uložené.

Program pri porovnávaní uloží obe snímky s vyznačenými ochoreniami do cieľového adresára a do terminálu vypíše polohu jednotlivých nálezov, ich počet a plochu.

Kapitola 4

Testovanie a dosiahnuté výsledky

4.1 Použité databázy

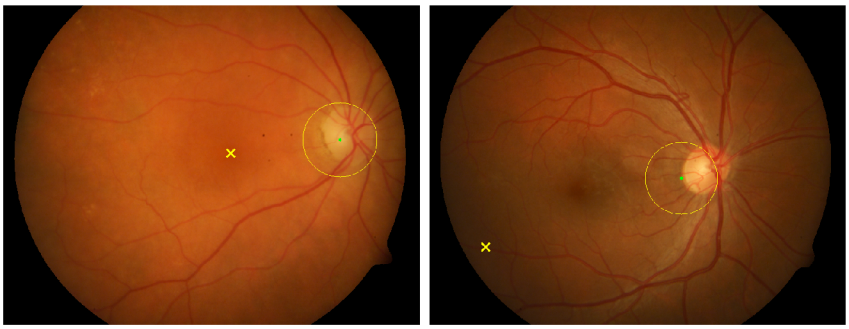
Na testovanie boli použité voľne dostupné databázy DRIVE [4], DiaretDB0 [17], ROC [6] a Messidor [5]. Databáza Messidor obsahuje 1200 obrázkov rozdelených do 3 setov, každý z iného oftalmologického oddelenia. Každý set je rozdelených do 4 súborov po 100 obrázkov. Špeciafikácie každej databázy zobrazuje tabuľka 4.1.

Databáza	Počet snímkov	Rozmery	Formát	Zorné pole
DiaretDB0	130	1500×1152	.png	50°
ROC	100	rôzne	.jpg	–
DRIVE	40	565×584	.tif	45°
Messidor	1200	rôzne	.tif	45°

Tabulka 4.1: Použité databázy

4.2 Úspešnosť lokalizácie optického disku a fovey

Testovanie lokalizácie optického disku a fovey prebehlo len vizuálne. Na testovanie boli využité databázy DiaretDB0, ROC, DRIVE a Messidor (Base 13, 23 a 33), ktoré spolu obsahujú 570 snímkov. U testovania optického disku som sa zamerala na správnu lokalizáciu jeho stredu, keďže práve ten je potrebný na zostavenie súradnicového systému. Obrázok 4.1 ukazuje v akom prípade bola lokalizácia prijatá za úspešnú a v akom nebol OD správne nájdený. U lokalizácie fovey boli rozhodovanie o správnosti jednoduchšie, pretože značka bola buď v jej tesnej blízkosti alebo úplne mimo oblasti. Testovanie detekcie fovey prebehlo len na obrázkoch, kde bol správne lokalizovaný OD, keďže detekcia fovey je závislá na správnej lokalizácii OD. Ku nesprávnej detekcii dochádzalo, ak sa v obrázku vyskytovali svetlé odlesky alebo boli naopak veľmi tmavé. V jednom prípade bol za OD prehlásený aj zhluk exudátov, ktorý ho svojím tvarom a jasom pripomínal.



Obrázek 4.1: Obrázok vľavo bol prijatý za správnu detekciu OD, obrázok vpravo bol braný ako chyba.

Databáza	Správna detekcia	Nesprávna detekcia	Úspešnosť
DiaretDB0	114	16	87,69%
ROC	93	7	93%
DRIVE	39	1	97,%
Messidor Base13	88	12	88%
Messidor Base23	90	10	90%
Messidor Base33	97	3	97%
Spolu	521	49	91,4%

Tabulka 4.2: Úspešnosť detekcie optického disku

Databáza	Správna detekcia	Nesprávna detekcia	Úspešnosť
DiaretDB0	96	18	84,21%
ROC	89	4	95,7%
DRIVE	34	5	87,18%
Messidor Base13	88	0	100%
Messidor Base23	89	1	98,88%
Messidor Base33	92	5	94,85%
Spolu	488	33	93,24%

Tabulka 4.3: Úspešnosť detekcie fovey

4.3 Úspešnosť detekcie ochorení

Testovanie detekcie exudátov a hemoragií prebehlo na 120 snímkach, ktoré boli náhodne vybraté z databáz Messidor (80 snímok) a DiaretDB0 (40 snímok). Fotky boli vytlačené a manuálne skontrolované 3 oftalmológmi: doktorkami Veronikou Matuškovou, Karolínou Skorkovskou a doktorom Tomášom Mňukom. Pooznačované obrázky som prešla a spočítala nálezy. Celkový počet nálezov v každom obrázku mi poskytol program, preto stačilo spočítať nálezy, ktoré neboli označené a oblasti, ktoré boli označené ale nálezmi nie sú. Vyhodnotenie popisujú tabuľky 4.4 a 4.5. Úspešnosť v týchto tabuľkách predstavuje počet

správne lokalizovaných nálezov ku celkovému počtu nálezov. Postrehy zdelené doktormi, na ktorých algortimus zlyhával sú:

- Algoritmus občas vyhodnotil bod kríženia ciev za hemoragie. Je to spôsobené zvýšenou sýtosťou farby v tejto oblasti.
- Niekedy boli za exudáty nesprávne označené svetlo-žlté nervové vlákna popri širokých cievach.
- Často neboli identifikované veľké hemoragie.

Databáza	Správne označené	Neoznačené	Chybne označené	Úspešnosť
DiaretDB0	1467	104	199	93,38%
Messidor (1. sada)	1741	182	240	90,54%
Messidor (2. sada)	1603	181	235	89,85%
Spolu	4811	467	684	91,15%

Tabulka 4.4: Úspešnosť detekcie exudátov

Databáza	Správne označené	Neoznačené	Chybne označené	Úspešnosť
DiaretDB0	1459	165	62	89,84%
Messidor (1. sada)	962	114	103	89,41%
Messidor (2. sada)	866	104	107	89,28%
Spolu	3287	383	272	89,57%

Tabulka 4.5: Úspešnosť detekcie hemoragií

Kapitola 5

Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvoriť program, ktorý bude schopný porovnať patologické nálezy na dvoch retinálnych snímkach. Program sa zameriava na detekciu dvoch najrozšírenejších ochorení, ktoré postihujú sietnicu ľudského oka a to diabetickú retinopatiu a vekom podmienenú makulárnu degeneráciu.

Pred samotnou implementáciou bolo nevyhnutné oboznámiť sa so štruktúrou oka a ochoreniami, ktoré ho postihujú. Taktiež som sa oboznámila s technikami spracujúcimi obraz a knižnicou OpenCV, ktorá mnohé z nich implementuje. Následne som navrhla a implementovala jeden z možných postupov porovnania retinálnych obrázkov.

Ako prvé bolo potrebné lokalizovať optický disk a foveu. Tieto prvky nepriaznivo ovplyvňujú segmentáciu nálezov a taktiež sú potrebné pri zostavení súradnicového systému. Následne boli v snímke vyhľadané ochorenia a zaznamená ich veľkosť a poloha. Posledným krokom bolo porovnanie počtu a plochy, ktorú nálezy na snímke zaberajú.

Testovanie prebehlo na snímkach zo 4 voľne dostupných databáz. Úspešnosť lokalizácie optického disku a fovey bola vizuálne vyhodnotená z 570 snímok. Lokalizácia optického disku dosiahla úspešnosť 91,4% a úspešnosť lokalizácie fovey dosiahla 93,24%. Schopnosť algoritmu detekovať ochorenia bola posudzovaná 3 lekármi, pričom každý hodnotil 40 spracovaných snímkov. Úspešnosť detekcie exudátov bola 91,15% a hemoragií 89,57% z ich celkového počtu. Algoritmus na detekciu ochorení by bolo možné vylepšiť presnejšou detekciou krvného riečiska. Ku krvným cievam boli občas priradené aj hemoragie, ktoré ho svojím tvarom a farbou veľmi pripomínajú.

Program by mohol byť potencionálne využitý v nemocniciach na zisťovanie progresu chorôb u pacientov, trpiacich ochoreniami sietnice. Program by bolo možné rozšíriť o vyhľadávanie ďalších ochorení ako sú napríklad vatové ložiská. Program by taktiež mohol byť rozšírený o rozpoznávanie jednotlivých osôb a predísť tak prípadnému porovnávaniu snímok od rôznych pacientov.

Literatura

[1] Morphological reconstruction. [Online; navštívené 29.4.2019].
URL https://html1-f.scribdassets.com/7p2qgc7j9c41ve67/images/3-1d97ce725d.jpg

[2] Neighbourhoods. The University of Auckland, [Online; navštívené 29.4.2019].
URL https://www.cs.auckland.ac.nz/courses/compsci773s1c/lectures/ImageProcessing-html/neighbourhoods.gif

[3] *Diabetes mellitus : vysvětlení a rady*. Běstvina : Geum, páté vydání, 1999, ISBN 80-86256-06-5.

[4] DRIVE: Digital Retinal Images for Vessel Extraction. 2004.
URL https://www.isi.uu.nl/Research/Databases/DRIVE/

[5] MESSIDOR: Methods to Evaluate Segmentation and Indexing Techniques in the field of Retinal Ophthalmology Within the scope of Diabetic Retinopathy. 2004.
URL http://www.adcis.net/en/third-party/messidor/

[6] Retinopathy Online Challenge. The University of Iowa, 2007.
URL http://webeye.ophth.uiowa.edu/ROC/

[7] *Základní principy strojového vidění – 8. díl*. Leden 2012, [Online; navštíveno 21.01.2019].
URL http://www.elektroprumysl.cz/automatizace/zakladni-principy-strojoveho-videni-8-dil

[8] *Histograms - 2: Histogram Equalization*. OpenCV, 2015, [Online; navštíveno 29.4.2019].
URL https://docs.opencv.org/3.1.0/d5/daf/tutorial_py_histogram_equalization.html

[9] *Image Thresholding*. Prosinec 2017, [Online; navštíveno 21.01.2019].
URL https://docs.opencv.org/3.4.0/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html

[10] Addo, E.; Bamiro, O. A.; Siwale, R.: *Anatomy of the Eye and Common Diseases Affecting the Eye*. Springer International Publishing, DOI 978-1-4051-7035-2, 2012.

[11] Aquino, A.; Gegundez, M. E.; Marín, D.: *Automated Optic Disc Detection in Retinal Images of Patients with Diabetic Retinopathy and Risk of Macular Edema*. 2009, [Online; navštíveno 20.2.2019].
URL https://waset.org/publications/15485/automated-optic-disc-detection-in-retinal-images-of-patients-with-diabetic-retinopathy-and-risk-of-macular-edema

[12] Ernest, J.: *Makulární degenerace : trendy v léčbě věkem podmíněné makulární degenerace* . Praha : Mladá fronta, 2010, ISBN 978-80-204-2363-4.

[13] Fisher, R.; Perkins, S.; Walker, A.; aj.: *Gaussian Smoothing*. 2003, [Online; navštíveno 23.01.2019].
URL https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm

[14] García, M.; López, M.; Álvarez, D.; aj.: *Assessment of four neural network based classifiers to automatically detect red lesions in retinal images*. Prosinec 2010, [Online; navštíveno 20.03.2019].
URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350453310001669?via%3Dihub

[15] Hlaváč, V.: *Šedotónová matematická morfologie*. České vysoké učení technické v Praze, [Online; navštíveno 29.4.2019].
URL http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/71-06MatMorfolGrayCz.pdf

[16] Hložánek, M.; Brůnová, B.: *Přístrojová technika v oftalmologii*. Univerzita Karlova, 2. lékařská fakulta, 2006, ISBN 80-902160-9-9.

[17] Kauppi, T.; Kalesnykiene, V.; Kamarainen, J.-K.; aj.: DIARETDB0 - Standard Diabetic Retinopathy Database. 2006.
URL http://www2.it.lut.fi/project/imageret/diaretdb0/

[18] Kauppi, T.; Kalesnykiene, V.; Kamarainen, J.-K.; aj.: DIARETDB1 - Standard Diabetic Retinopathy Database. 2007.
URL http://www2.it.lut.fi/project/imageret/diaretdb1/

[19] Kolář, P.; aj.: *Věkem podmíněná makulární degenerace* . Praha : Grada, 2008, ISBN 978-80-247-2605-2.

[20] Krzystolik, M. G.; Greenberg, P. B.: Retinal Vein and Retinal Artery Occlusion. [Online; navštívené 29.01.2019].
URL http://www.sneretina.com/retinal-diseases-and-treatments/retinal-vein-and-retinal-artery-occlusion.asp

[21] Liang, Z.; Wong, D. W. K.; Liu, J.; aj.: *Automatic fovea detection in retinal fundus images*. 2012, [Online; navštíveno 21.2.2019].
URL https://ieeexplore.ieee.org/document/6361008

[22] Mašek, P.; Cholevík, D.; Němčanský, J.: *Oftalmologie a diagnostické metody a přístroje v oftalmologii : studijní opora* . Ostravská univerzita v Ostravě, 2014, ISBN 978-80-7464-569-3.

[23] MerciOptik: Fotografia sietnice ľavého oka. [Online; navštívené 20.12.2018].
URL http://www.mercioptik.sk/images/fotofrafia_sietnice_laveho_oka_0a279b5b5fb15536.jpg

[24] Montague, C.: Hypertensive retinopathy. EyeRounds Online Atlas of Ophthalmology, 2012, [Online; navštívené 29.01.2019].
URL https://webeye.ophth.uiowa.edu/eyeforum/atlas/photos/Hypertensive-Retinopathy-OD.JPG

[25] Pandya, H. K.: Retinal detachment. Courtesy of Kresge Eye Institute, Detroit, Michigan, 2010, [Online; navštívené 29.01.2019].
URL https://img.medscapestatic.com/pi/meds/ckb/68/40668tn.jpg

[26] Pilárová, M.; Hurčíková, M.: Diabetická retinopatia. 2017.
URL https://www.procare.sk/diabeticka-retinopatia/

[27] Ryan, S.; Schachat, A.; Wilkinson, C.; aj.: *Retina*. MOSBY, Čtvrté vydání, 2006, ISBN 0323025986.

[28] Scanlon, P. H.; Wilkinson, C. P.; Aldington, S. J.; aj.: *A Practical Manual of Diabetic Retinopathy Management*. Wiley-Blackwell, 2009, ISBN 978-1-4051-7035-2.

[29] Sinthanayothin, C.; Boyce, J.; Williamson, T.; aj.: *Automated detection of diabetic retinopathy on digital fundus images*. Březen 2002, [Online; navštíveno 28.03.2019].
URL
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1464-5491.2002.00613.x

[30] Sopharak, A.; Uyyanonvara, B.; Barman, S.; aj.: *Automatic detection of diabetic retinopathy exudates from non-dilated retinal images using mathematical morphology methods*. Prosinec 2008, [Online; navštíveno 28.03.2019].
URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895611108000931

[31] Sosna, T.: Diabetická retinopatie. *Medicína pro praxi*, 2009, ISSN 1803-5310.
URL https://www.medicinapropraxi.cz/pdfs/med/2009/05/11.pdf

[32] Sosna, T.: *Diabetická retinopatie: diagnostika, prevence, léčba*. Axonite CZ, druhé, prepracované vydání, 2016, ISBN 978-80-88046-05-9.

[33] symptomy.sk: Stavba oka. 2014, [Online; navštívené 29.01.2018].
URL http://www.symptomy.sk/anatomia/oci/stavba-oka.jpg

[34] Synek, S.; Šárka Skorkovská: *Fyziologie oka a vidění*. Grada, druhé vydání, 2014, ISBN 978-80-247-3992-2.

[35] Valešová, L.; Hycl, J.: *Diabetická retinopatie*. Triton, 2002, ISBN 80-7254-230-3.

[36] Valešová, L.; Hycl, J.: *Atlas oftalmologie*. Triton, 2003, ISBN 80-7254-382-2.

[37] Yavuz, Z.; Köse, C.: *Blood Vessel Extraction in Color Retinal Fundus Images with Enhancement Filtering and Unsupervised Classification*. Srpen 2017, [Online; navštíveno 22.03.2019].
URL https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5559979/

[38] Špačková, K.: Oční projevy interních chorob. *Interní medicína pro prax*, 2004.
URL http://www.solen.sk/pdf/Spackova.pdf

[39] Štrofová, H.; aj.: Věkem podmíněná makulární degenerace. *Klinická farmakologie a farmacie*, 2013, ISSN 1803-5353.
URL https://www.klinickafarmakologie.cz/pdfs/far/2013/02/04.pdf

Příloha A

Obsah CD

Priložené CD obsahuje:

- `implemetacia/zdrojove_kody/` – zdrojové kódy programu
- `implemetacia/doc/` – vygenerovaná dokumentácia - Doxygen
- `implemetacia/spustitelny_subor/` – spustiteľný súbor
- `textova_cast/` – pdf súbor obsahujúci text tejto práce a zdrojové texty pre LaTeX
- `testovanie/` – obrázky po automatickej detekcii