



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**BIOMETRICKÉ ROZPOZNÁVÁNÍ NA ZÁKLADĚ SNÍMKŮ  
SÍTNICE**

RETINA-BASED BIOMETRIC RECOGNITION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JIŘÍ KANTOR**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. LUKÁŠ SEMERÁD, Ph.D.**

BRNO 2025

## Zadání bakalářské práce



163431

Ústav: Ústav inteligentních systémů (UITS)  
Student: **Kantor Jiří**  
Program: Informační technologie  
Název: **Biometrické rozpoznávání na základě snímků sítnice**  
Kategorie: Počítačová grafika  
Akademický rok: 2024/25

### Zadání:

1. Seznamte se s biometrií lidského oka, metodami identifikace a rozpoznávání na základě sítnice oka.
2. Navrhněte algoritmus a aplikaci na základě předchozího bodu zadání.
3. Vytvořte aplikaci, která bude umožňovat identifikaci a verifikaci na základě vloženého snímku sítnice vůči uloženým uživatelům v databázi.
4. Aplikaci otestujte na reprezentativním vzorku snímků.
5. Diskutujte případné problémy a navrhněte možnosti dalšího rozvoje aplikace.

### Literatura:

- Drahanský, M., Orság, F. a kol.: *Biometrie*. Computer Press, 2011.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:  
první dva body zadání

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Semerád Lukáš, Ing., Ph.D.**  
Vedoucí ústavu: Kočí Radek, Ing., Ph.D.  
Datum zadání: 1.11.2024  
Termín pro odevzdání: 14.5.2025  
Datum schválení: 31.10.2024

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá biometrickým rozpoznáváním osob podle snímku sítnice oka. Sítnice představuje časově stabilní a pro každého jedince unikátní část lidského těla, což z ní činí vhodného kandidáta pro využití v biometrii. Úvodní část práce se věnuje obecným principům biometrických systémů a jejich hodnocení, následuje přehled anatomie lidského oka, možných chorob, které mohou sítnici postihnout, a popis principů rozpoznávání podle sítnice. Hlavním cílem práce je návrh a implementace biometrického systému umožňujícího spolehlivou identifikaci a verifikaci osob. Použitý algoritmus je založen na analýze cévního řečiště, konkrétně na detekci bodů větvení a křížení cév. Praktická část zahrnuje návrh a realizaci programového řešení v jazyce Python. Funkčnost a spolehlivost systému byla ověřena na reprezentativním vzorku sítnicových snímků. V závěru práce jsou uvedeny návrhy na možná vylepšení a další rozvoj systému.

## Abstract

This bachelor's thesis focuses on biometric person recognition based on retinal images. The retina is a temporally stable and individually unique part of the human body, making it a suitable candidate for biometric applications. The introductory part of the thesis presents the general principles of biometric systems and their evaluation, followed by an overview of the anatomy of the human eye, potential diseases affecting the retina, and the principles of retina-based recognition. The main objective of the thesis is to design and implement a biometric system capable of reliable identification and verification of individuals. The algorithm used is based on the analysis of the vascular structure, specifically the detection of vessel bifurcations and crossovers. The practical part includes the design and implementation of the software solution in Python. The functionality and reliability of the system were verified on a representative sample of retinal images. The conclusion of the thesis presents suggestions for possible improvements and further development of the system.

## Klíčová slova

biometrie, sítnice, rozpoznávání, oko, segmentace, identifikace, verifikace, optický disk, fovea, bifurkace, OpenCV

## Keywords

biometrics, retina, recognition, eye, segmentation, identification, verification, optic disc, fovea, bifurcations, OpenCV

## Citace

KANTOR, Jiří. *Biometrické rozpoznávání na základě snímků sítnice*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Lukáš Semerád, Ph.D.

# Biometrické rozpoznávání na základě snímků sítnice

## Prohlášení

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

.....  
Jiří Kantor  
12. května 2025

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Lukáši Semerádovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce, odbornou pedagogickou pomoc a další poskytnuté cenné rady při zpracování této práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Biometrické systémy</b>	<b>6</b>
2.1	Biometrické vlastnosti . . . . .	7
2.2	Rozdělení na funkční celky . . . . .	9
2.3	Verifikace vs. identifikace . . . . .	9
2.4	Hodnocení spolehlivosti biometrických systémů . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Rozpoznávání podle sítnice</b>	<b>16</b>
3.1	Anatomie oka . . . . .	16
3.2	Oční choroby . . . . .	21
3.3	Biometrické rozpoznávání podle sítnice . . . . .	25
3.4	Postupy a technologie . . . . .	26
3.5	Historie . . . . .	29
3.6	Vyhodnocení technologie rozpoznávání pomocí sítnice . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Extrakce rysů sítnice a porovnání – návrh</b>	<b>31</b>
4.1	Příprava snímku pro porovnání . . . . .	31
4.2	Porovnávání . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Implementační postupy a jejich vyhodnocení</b>	<b>36</b>
5.1	Použité technologie . . . . .	36
5.2	Architektura . . . . .	36
5.3	Předzpracování . . . . .	37
5.4	Zpracování a segmentace . . . . .	38
5.5	Registrační modul . . . . .	46
5.6	Verifikační a identifikační modul . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Testování a návrh vylepšení</b>	<b>50</b>
6.1	Testování operací . . . . .	50
6.2	Testování celkové funkcionality . . . . .	52
6.3	Souhrn možných vylepšení . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>56</b>
	<b>Literatura</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Výsledky testování</b>	<b>60</b>

# Seznam obrázků

2.1	Schéma verifikace a identifikace (převzato z [12]). . . . .	10
2.2	Chyby FAR, FRR, FNRM a FMR (převzato z [3]). . . . .	12
2.3	Závislost EER, ZeroFMR a ZeroFNMR (převzato z [3]). . . . .	13
2.4	Ukázka DET křivky (převzato z [3]). . . . .	14
2.5	Ukázka ROC křivky (převzato z [3]). . . . .	15
3.1	Anatomie oka (převzato z [19]). . . . .	17
3.2	Projekce světelných paprsků do oka (upraveno z [11]). . . . .	18
3.3	Graf vlnových délek, které snímají jednotlivé typy čípků (převzato z [14]). . . . .	20
3.4	Stavba sítnice (převzato z [25]). . . . .	20
3.5	Snímek sítnice (upraveno z [10]). . . . .	21
3.6	Ilustrace sítnice postižené nemocí makulární degenerace. Vlevo je zdravá sítnice, uprostřed suchá forma a vpravo vlhká forma MD (převzato z [22]). . . . .	22
3.7	Ilustrace sítnice postižené nemocí diabetická retinopatie. Vlevo neproliferativní forma, uprostřed proliferativní forma, vpravo zdravá sítnice (převzato z [6]). . . . .	23
3.8	Ilustrace sítnice postižené odchlípením sítnice. Vlevo se nachází ilustrace normální sítnice, vpravo odchlípená sítnice (převzato z [5]). . . . .	24
3.9	Ilustrace sítnice postižené toxoplazmózou (převzato z [2]). . . . .	25
3.10	Snímek sítnice s vyznačením klíčových bodů (upraveno z [10]). . . . .	26
4.1	Vývojový diagram systému pro rozpoznávání podle sítnice (inspirován a upraven z [1]). . . . .	32
4.2	Barevné složky snímku sítnice na 1. řádku, zleva – červená, zelená, modrá; 2. řádek zobrazuje snímky převedené do odstínů šedé. . . . .	33
4.3	Gaborova transformace a adaptivní prahování (vlevo), invertovaný snímek (vpravo). . . . .	34
5.1	Znečištění snímku světlem vedoucí k nedokonalosti vytvoření masky. Snímek sítnice (vlevo), maska vytvořená pomocí prahování (uprostřed) a maska, která by měla správně vzniknout (vpravo). . . . .	39
5.2	Zamaskované oblasti používané pro detekci optického disku. Zleva se jedná o velikosti masky o 1/5, 1/4, 1/3, 1/2 a 1 násobku výšky sítnice. . . . .	40
5.3	Snímek sítnice s detekovaným optickým diskem (menší zelený kruh), foveou (červený kruh) a oblastí, ve které je vyhledávána fovea (velký zelený kruh). . . . .	42
5.4	Jednotlivé kroky segmentace. Snímky postupně zleva shora: zelený kanál, prahování, aplikace první masky, aplikace erodované masky, vyhlazování, odstranění kontur. . . . .	43
5.5	Skeletonizovaný snímek (vlevo), detekované body příznaků (vpravo). . . . .	44

5.6	Zarovnání a překrytí bodů, zelené (výchozí), červené (původní před zarovná- ním), modré (po zarovnání). . . . .	48
6.1	Histogram zastoupení výsledků verifikačního skóre. Kvalitnější snímky (vlevo), snímky s nižší kvalitou (vpravo). . . . .	53
6.2	Ukázkový výstup testování identifikace v konzoli. . . . .	54

# Kapitola 1

## Úvod

Biometrické rozpoznávání je součástí života každého jedince. Prakticky na denní bázi rozpoznáváme osoby v našem okolí podle jejich hlasu, obličeje, stylu chůze a podobně. V současné době nabývá rozpoznávání na základě biometrických vlastností čím dál tím důležitější roli. Spolehlivá autentizace je klíčovým prvkem v oblasti zabezpečení a přístupu. Z tohoto důvodu je velice důležité nalézt optimální rozpoznávací systém, který by zajistil vysokou spolehlivost, přesnost a zamezil by možnostem podvrhu identity nebo útoku na samotný systém při stálém zachování komfortu.

Tradiční autentizační systémy jsou založeny na znalostech (heslo, PIN) a vlastnostech (čip, tag, token, klíč). Tyto systémy však vykazují míru nespolehlivosti, jelikož není možné jednoznačně rozlišit oprávněného uživatele a útočníka, který podvodně získal oprávnění a snaží se do systému dostat. I přesto ve světě tradiční metody stále dominují. Řešení těchto problémů nabízí tzv. biometrické systémy. Tyto systémy využívají anatomické (fyziologické) a behaviorální rysy jedince a představují tak atraktivní řešení díky obtížné napodobitelnosti, jedinečnosti a hlavně nezapomenutelnosti. Obecně nejžádanějším aspektem při výběru konkrétního rysu je jeho univerzalita, jedinečnost, konstantnost a získatelnost.

Slovo biometrie pochází z řeckých slov *bios* (život) a *metron* (měřítko) a vyjadřuje jakési „měření života“. Pro biometrii jsou klíčové dva termíny – *identifikace* a *verifikace*. Identifikace je proces zjištění identity konkrétní osoby ze záznamů uložených v databázi (porovnání 1:N). V případě verifikace se jedná o rozpoznání, zda poskytnutá elektronická identita přísluší k fyzické identitě jedince (porovnání 1:1).

První dochované zmínky o biometrii pocházejí ze starověké Číny ze 14. století n.l. Jedná se pouze o dochované jeskynní kresby znázorňující struktury podobné otiskům prstů. Větší snahy o použití biometrie ve formě vzájemné identifikace se objevují až v 19. století n.l. Mezi hlavní průkopníky v tomto oboru patří William James Herschel a Francis Galton. Herschel se zabýval studií a využitím otisků prstů pro stvrzení identity, zatímco Galton tzv. *antropometrií* – oborem zabývajícím se měřením tělesných rozměrů. Biometrie byla v těchto dobách využívána spíše v kriminalistice pro identifikaci pachatelů. Na počátku 20. století Galton prosazuje pro identifikaci a verifikaci tzv. daktyloskopii. Na jejím základě začaly být otisky prstů standardizovanou metodou identifikace. Postupem času s nástupem výpočetní techniky se začaly přidávat i další biometrické charakteristiky. V současné době pokročila biometrie do fáze, kdy se kombinuje více modalit (tzv. multimodální systémy) pro dosažení vyšší bezpečnosti.

Výběr tématu (rozpoznávání podle snímků sítnice oka) je motivován několika faktory. Systémy (i samotná technologie) pro rozpoznávání osob podle snímku sítnice oka, i přes svůj vysoký potenciál, nejsou v současnosti ještě široce rozšířené. Přístup k biometrickému

rozpoznávání podle sítnice se stále nachází v rané fázi vývoje a jeho nasazení v praxi je stále omezené. To nabízí příležitost pro další výzkum a snahu o implementaci ideálního systému zajišťujícího vysokou přesnost, bezpečnost a spolehlivost, kterou tato technologie nabízí.

Cílem této práce je seznámit se s algoritmy nezbytnými pro implementaci systému pro rozpoznávání osob podle snímku sítnice oka a navrhnout vlastní aplikaci zaměřenou na spolehlivou identifikaci a verifikaci jednotlivců. Výsledný systém by měl umožňovat obě zmíněné funkce s důrazem na dosažení co nejvyšší přesnosti v reálných podmínkách. Klíčovými příznaky pro rozpoznávání byly zvoleny bifurkační a křížící body cévního řečiště. Pro účely zarovnání snímků jsou navíc detekovány i optický disk a fovea.

Pro snazší pochopení problematiky obsahuje práce úvodní přehled biometrických systémů, jejich základních principů a používaných biometrických charakteristik. Následuje rozbor parametrů ovlivňujících spolehlivost těchto systémů. Další část se věnuje anatomii lidského oka a očním onemocněním, která mohou narušit strukturu sítnice.

Pravděpodobně největší přínos této práce je obsažen v jejích závěrečných kapitolách. Kapitola 4 se věnuje návrhu výsledného systému a podrobnému popisu jednotlivých kroků zpracování. Následující kapitola 5 přináší detailní přehled použitých metod a implementačních technik, přičemž zároveň shrnuje i experimentálně ověřené přístupy, které byly v průběhu vývoje systému testovány. Kapitola 6 se zaměřuje na testování systému, vyhodnocení jeho výkonnosti a diskusi nad dosaženými výsledky. V závěru jsou rovněž navrženy možné směry dalšího rozvoje a zlepšení implementovaného řešení.

## Kapitola 2

# Biometrické systémy

Biometrie je věda, která se zabývá určováním identity jedince na základě fyzických, chemických nebo behaviorálních rysů osoby. Význam biometrie v moderní společnosti posílila potřeba rozsáhlých systémů pro správu identit, jejichž funkčnost plně závisí na přesném určení identity jednotlivce v kontextu několika různých aplikací. Příklady těchto aplikací zahrnují sdílení počítačových zdrojů v síti, udělování přístupu do zařízení, provádění finančních transakcí na dálku, nebo například nástup do komerčního letu. Rozšíření webových služeb (např. online bankovníctví) a zavedení decentralizovaných center zákaznických služeb (např. kreditní karty) dále zdůraznilo potřebu spolehlivých systémů správy identit, které mohou vyhovět velkému počtu osob [12].

Hlavním úkolem v systému správy identit je určení (nebo ověření) identity jednotlivce. Taková činnost může být nutná z různých důvodů, ale hlavním záměrem je ve většině aplikací zabránit podvodníkům v přístupu k chráněným zdrojům. Tradiční metody zjišťování identity osoby zahrnují mechanismy založené na znalostech (např. hesla) a na vlastnictví (např. průkazy totožnosti, karty, klíče), ale tyto zástupné reprezentace identity lze snadno ztratit, sdílet, manipulovat s nimi nebo je odcizit, čímž je ohrožena zamýšlená bezpečnost. Pomocí biometrie je možné zjistit identitu na základě toho, „kdo jste“, a ne podle toho, „co vlastněte“, jako je průkaz totožnosti, nebo „co si pamatujete“, jako je heslo. V některých aplikacích lze biometrii použít jako doplněk k průkazům totožnosti a heslům, čímž se dosáhne další úrovně zabezpečení. Takové uspořádání se často nazývá dvoufaktorové schéma ověřování.

V roce 2024 tvořila autentizace pomocí otisků prstů 28 % všech biometrických platebních transakcí, což z ní činí jednu z nejrozšířenějších metod biometrického rozpoznávání [4]. Získání těchto údajů je velice jednoduché a časově nenáročné. Z těchto důvodů, společně s rozpoznáváním obličeje, patří mezi nejčastěji využívané biometrické charakteristiky – například v mobilních telefonech, docházkových systémech, elektronických zámcích a v řadě dalších běžných aplikací. Vzhledem k dnešním technologiím je poměrně snadné neoprávněně získat otisky prstů nebo podobu obličeje, tyto údaje replikovat a následně zneužít k přístupu do systému. Biometrie založená na duhovce či sítnici může v tomto ohledu nabídnout vyšší míru zabezpečení. Oko je stabilní v čase a vysoce jedinečné – jeho vzor je natolik specifický, že se liší i mezi jednovaječnými dvojčaty. Replikace těchto údajů je složitá a vyžadovala by násilné činy pro jejich získání. Samotná získatelnost snímků sítnice oka je však poměrně komplikovaný proces v porovnání se snímáním otisků prstů. Získání kvalitního snímku očního pozadí vyžaduje plnou spolupráci snímaného jedince, která spočívá v přiblížení oka do bezprostřední vzdálenosti k přístroji a zaostření pohledu na tzv. fixační body.

Efektivita autentizátoru (biometrického nebo nebiometrického) je založena na jeho vhodnosti pro konkrétní aplikaci a také na jeho odolnosti vůči různým typům škodlivých útoků. Tyto útoky mohou postihnout jakoukoli část systému, ať už se jedná o moduly nebo o komunikaci mezi nimi. Z těchto důvodů je nutné při návrhu dbát na možná zranitelná místa systému a pokusit se o to, aby zranitelnost byla co nejnižší až nulová a v případě útoku systém sám identifikoval, že k němu došlo. Zatímco některé z těchto útoků lze odvrátit zavedením vhodných obranných mechanismů, není možné vyřešit všechny problémy spojené s používáním hesel a tokenů. Biometrie nabízí určité výhody, jako je negativní identifikace a nepopiratelnost, které nelze zajistit prostřednictvím tokenů a hesel. Negativní identifikace je proces, při kterém systém určí, že určitá osoba je skutečně zaregistrovaná v systému, i když tato osoba může svou registraci popírat. To je obzvláště důležité v aplikacích, jako je rozdělování sociálních dávek, kde se podvodník může pokusit získat více dávek (tzv. „dvojitě čerpání“) pod různými jmény. Nepopiratelnost je způsob, jak zaručit, že osoba, která přistupuje k určitému zařízení nebo zdroji, nemůže později popřít, že jej použila (např. osoba přistupuje k určitému počítačovému zdroji a následně tvrdí, že jej musel použít podvodník s falešnými přihlašovacími údaji).

Biometrické systémy mají sice svá omezení, ale oproti tradičním bezpečnostním metodám mají výhodu v tom, že je nelze snadno odcizit nebo sdílet. Kromě posílení bezpečnosti zvyšují biometrické systémy také pohodlí uživatelů tím, že snižují potřebu navrhovat a pamatovat si hesla.

Tato kapitola se zabývá stručnými informacemi o biometrických systémech potřebných k ucelené představě o základním fungování systému pro rozpoznávání na základě biometrické vlastnosti.

## 2.1 Biometrické vlastnosti

Biometrické systémy využívají ke zjištění totožnosti tzv. biometrické vlastnosti. V literatuře o biometrii můžeme pojem vlastnosti najít i v dalších různých podobách, např. znaky, identifikátory nebo modality. Tyto vlastnosti můžeme rozdělit do dvou kategorií [3]:

- Anatomické – nejsou ovlivnitelné stavem člověka a jsou vždy přítomny ve stejné podobě. Metoda analýzy anatomických rysů je označována jako *statická metoda*. Mezi zástupce anatomických rysů patří například: otisky prstů, obličej, sítnice oka, geometrie ruky, duhovka oka, dentální obraz, DNA, tvar ucha, dlaň, termogram obličej, termogram ruky.
- Behaviorální – jsou spojeny s chováním (akcí) uživatele a jsou lehce ovlivnitelné. Při každém snímání vykazují mírné odlišnosti v získaných vzorcích. Metodě analýzy behaviorálních rysů se říká *dynamická metoda*. Příklady behaviorálních rysů jsou například: hlas/řeč, mimika obličej, podpis, dynamika stisku kláves, chůze.

V závislosti na počtu biometrických vlastností, které biometrický systém využívá pro rozpoznávání, lze tyto systémy rozdělit na unimodální a multimodální. Unimodální biometrický systém je systém, který využívá pouze jednu vlastnost. Multimodální biometrické systémy využívají buďto více příznaků jedné vlastnosti (např. statické a dynamické formy podpisu) nebo více biometrických vlastností (např. rozpoznávání podle duhovky a sítnice). Multimodální systémy mají vyšší spolehlivost a jsou odolnější vůči útokům než systémy unimodální, avšak jejich pořizovací cena je markantně vyšší.

## Charakteristiky biometrických vlastností

Při výběru konkrétní biometrické vlastnosti se vždy posuzují její charakteristiky. Mezi základní charakteristiky patří [3][12]:

- univerzalita – každá osoba by měla tuto biometrickou vlastnost mít,
- jedinečnost (unikátnost) – daná vlastnost by se měla dostatečně lišit u všech jedinců v populaci, tedy žádné dvě osoby nesmí vlastnit stejnou biometrickou vlastnost,
- konstantnost – daná biometrická vlastnost zůstává neměnná s časem; vlastnost, která se v průběhu času výrazně mění, není užitečným biometrickým údajem,
- získatelnost – mělo by být možné získat a digitalizovat biometrickou vlastnost pomocí vhodných zařízení, která nezpůsobují jednotlivci zbytečné potíže; získaná nezpracovaná data by navíc měla být zpracovatelná tak, aby bylo možné získat reprezentativní soubory znaků,
- výkonnost – přesnost rozpoznávání a prostředky potřebné k dosažení této přesnosti by měly splňovat omezení daná aplikací,
- akceptace – ochota jednotlivců z cílové populace předložit a nechat si nasnímat svou biometrickou vlastnost,
- odolnost proti falšování – snadnost vytvoření falzifikátu dané vlastnosti,
- finanční náklady na pořízení – cenové náklady na pořízení systému.

Tabulka 2.1 zobrazuje jednotlivé biometrické vlastnosti člověka a uvádí k nim jejich charakteristiky, které jsou uvedeny ve výčtu výše.

Tabulka 2.1: Charakteristiky biometrických vlastností (převzato z [3][15]).

Vlastnost	Univerzalita	Jedinečnost	Trvalost	Získatelnost	Výkonnost	Přijatelnost	Bezpečnost	Pořizovací cena
Obličej	Vysok.	Nízká	Střed.	Vysok.	Nízká	Vysok.	Nízká	Nízká
Otisk prstu	Střed.	Vysok.	Vysok.	Střed.	Vysok.	Střed.	Vysok.	Nízká
Geom. ruky	Střed.	Střed.	Střed.	Vysok.	Střed.	Střed.	Střed.	Střed.
Žíly ruky	Střed.	Střed.	Střed.	Střed.	Střed.	Střed.	Vysok.	Střed.
Duhovka	Vysok.	Vysok.	Vysok.	Střed.	Vysok.	Nízká	Vysok.	Vysok.
Sítnice	Vysok.	Vysok.	Střed.	Nízká	Vysok.	Nízká	Vysok.	Vysok.
Podpis	Nízká	Nízká	Nízká	Vysok.	Nízká	Vysok.	Nízká	Nízká
Hlas	Střed.	Nízká	Nízká	Střed.	Nízká	Vysok.	Nízká	Nízká
DNA	Vysok.	Vysok.	Vysok.	Nízká	Vysok.	Nízká	Nízká	Vysok.
Chůze	Střed.	Nízká	Nízká	Vysok.	Nízká	Vysok.	Střed.	Vysok.
Ušní boltec	Střed.	Střed.	Vysok.	Střed.	Střed.	Vysok.	Střed.	Střed.
Termogram	Vysok.	Vysok.	Nízká	Vysok.	Střed.	Vysok.	Vysok.	Vysok.

## 2.2 Rozdělení na funkční celky

Biometrické systémy se zabývají automatickým rozpoznáváním jedinců na základě jejich charakteristických vlastností. Skládají se ze dvou modulů – registračního a verifikačního/identifikačního modulu. Tyto moduly často bývají integrovány do jednoho softwarového balíčku.

**Registrační modul** obsahuje biometrický senzor, který poskytuje zachycení vzorku a převedení do digitální podoby. Následně jsou ze snímku vyextrahovány rysy do podoby tzv. „biometrického markantu“. Tato položka je následně uložena do databáze. Tento registrační proces se provádí jednou pro každý snímek před jeho používáním.

**Verifikační/identifikační modul** provede stejné akce jako modul registrační s rozdílem, že se data neukládají do databáze. Namísto toho jsou z databáze načítána data pro porovnání s aktuálními biometrickými údaji, které modul zpracoval. Následuje porovnání a výsledek procesu, kterým může být buďto údaj o shodě či neshodě, nebo v rámci identifikace informace o nalezené identitě.

Obecný biometrický systém lze rozdělit do několika modulů. Patří k nim modul se senzorem, modul pro extrakci příznaků, databázový modul a v neposlední řadě porovnávací modul. Detailnější popis jednotlivých částí obecného biometrického systému je zde účelně vynechán. Členění a detailnější popis biometrického systému využívající sítnici jako biometrického rysu je uveden v kapitole 3.3.

## 2.3 Verifikace vs. identifikace

V závislosti na kontextu aplikace může biometrický systém pracovat ve dvou operačních režimech – identifikace a verifikace (schéma obou režimů je zobrazeno na obrázku 2.1). Pro bezpečnostní systémy (obecně) jsou tyto dva pojmy nesmírně důležité, proto je následující sekce vymezena pro vysvětlení rozdílu mezi těmito pojmy. Tato sekce je inspirována [3][12][13].

### Verifikace

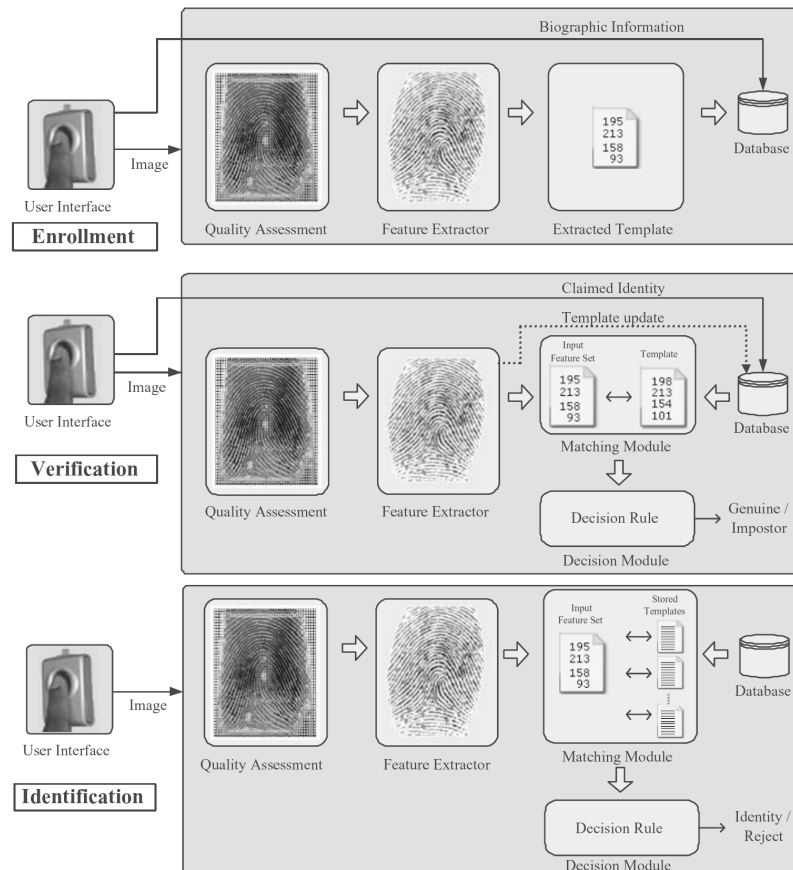
Při verifikačním režimu systém ověří totožnost osoby porovnáním zachycených biometrických údajů s vlastní biometrickou šablonou uloženou v databázi systému. V tomto scénáři je dotaz porovnáván pouze se šablonou odpovídající zadané identitě (porovnání 1:1). Identita je obvykle ověřována prostřednictvím osobního identifikačního čísla (PIN), uživatelského jména nebo tokenu (např. čipové karty) [13]. Pokud jsou vstup uživatele a šablona zadané identity vysoce podobné, je nárok na identitu přijat jako „pravý“. V opačném případě je nárok zamítnut a uživatel je považován za „útočníka“. Verifikace se typicky používá v oblastech, kde je cílem zajistit prevenci před přístupem neautorizovaných uživatelů do systému.

### Identifikace

Systém v identifikačním režimu slouží ke zjištění identity osoby. Jedinec zadá systému svou biometrickou vlastnost, ale nesdělí mu svou identitu. Systém následně provádí porovnání poskytnutého vzorku s celou databází (porovnání 1:N), výsledkem je nalezená identita, která vykazuje nejvyšší míru shody nebo výsledek „identita nebyla nalezena“ [3]. Systém tedy odpovídá na otázku: „Čí jsou to biometrické údaje?“ nebo: „Přísluší tyto údaje někomu, kdo je systému znám?“. Identifikace je klíčovou součástí systémů negativní identifikace,

kde je cílem zjistit, zda osoba je tou, kterou tvrdí, že není. Účelem negativní identifikace je zabránit tomu, aby jedna osoba používala více identit. Identifikace však může být použita při pozitivní identifikaci, například pro zvýšení pohodlí (uživatel nemusí svou identitu aktivně zadávat). Zatímco tradiční metody, jako jsou hesla, PINy, klíče nebo tokeny, mohou být dostačující pro pozitivní identifikaci, negativní identifikaci je možné pouze prostřednictvím biometrických údajů.

Na obrázku 2.1 je uveden rozdíl mezi identifikačním a verifikačním procesem.



Obrázek 2.1: Schéma verifikace a identifikace (převzato z [12]).

## 2.4 Hodnocení spolehlivosti biometrických systémů

V okamžiku realizace biometrických systémů do praxe nastává otázka, jak je systém výkonný, spolehlivý a jaká je spolehlivost vybraného algoritmu například pro extrakci rysů apod. Z tohoto důvodu existují charakteristiky, pomocí nichž lze porovnávat různé biometrické metody a na jejich základě realizovaná zařízení. Existuje řada charakteristik, které budou v této kapitole probrány. V ideálním případě by biometrický systém neměl vykazovat žádnou chybovost, což je však v praxi nereálné.

Každému biometrickému systému je potřeba nastavit práh citlivosti (threshold), na základě kterého se rozhoduje, zda skóre porovnání patří do intervalu shody či neshody. Tento práh je nutné vypočítat pro každý systém, jelikož se liší podle zvolené metody implementace.

Pokud je výsledek porovnání (skóre porovnání) menší než práh, požadavek je zamítnut, v opačném případě, kdy je skóre větší nebo rovno práhu, požadavek je přijat.

Chyby biometrických systémů jsou většinou způsobeny právě rozhodováním podle skóre porovnání a určeného práhu. Dalším faktorem ovlivňujícím chybovost systémů je vnitro-  
třídní a mezitřídní variabilita.

Výsledkem porovnání skóre s nastaveným prahem vyvodí biometrický systém závěr, který může mít následující 4 podoby:

- správné přijetí (True Accept) – nastane pokud jsou dva vzory od stejné osoby v jiném časovém okamžiku označeny jako shodné,
- chybné přijetí (False Accept) – nastane pokud jsou dva odlišné vzory od dvou osob označeny jako shodné,
- správné odmítnutí (True Reject) – nastane pokud jsou dva odlišné vzory od dvou osob označeny jako neshodné,
- chybné odmítnutí (False Reject) – nastane pokud jsou dva vzory od stejné osoby v jiném časovém okamžiku označeny jako neshodné.

Na základě těchto stavů jsou odvozeny charakteristiky/chybové míry, které se využívají pro hodnocení spolehlivosti biometrických systémů. Informace o níže popsaných mírách pochází z [3].

### Míra chybného přijetí

Míra chybného přijetí – FAR (False Accept Rate) je pravděpodobnost, že biometrický systém chybně vyhodnotí dva odlišné vzory od dvou osob jako shodné. Jedná se o podíl verifikačních transakcí s nepravdivým tvrzením o identitě, které jsou chybně potvrzeny. Tato chyba povolí přístup neoprávněné osobě (v horším případě možnému útočníkovi) do systému. FAR lze vypočítat pomocí následující rovnice:

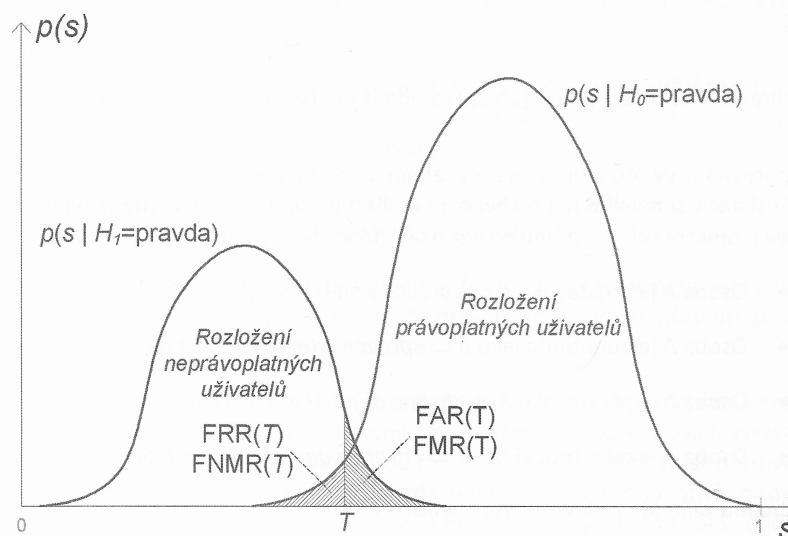
$$FAR = \frac{\text{počet porovnání rozdílných vzorů s výsledkem shoda}}{\text{celkový počet porovnání rozdílných vzorů}} \quad (2.1)$$

### Míra chybného odmítnutí

Míra chybného odmítnutí – FRR (False Reject Rate) je pravděpodobnost, že biometrický systém chybně vyhodnotí dva vzory od stejné osoby jako odlišné. Jedná se o podíl verifikačních transakcí s pravdivými tvrzeními o identitě, které jsou chybně odmítnuty. Tato chyba vede ke znemožnění přístupu oprávněné osoby do systému. Z bezpečnostního hlediska se nejedná o závažnou chybu, avšak z hlediska uživatele je velice nepříjemná. FRR lze vypočítat pomocí následující rovnice:

$$FRR = \frac{\text{počet porovnání vzorů osoby A vedoucích k neshodě}}{\text{celkový počet porovnání vzorů osoby A}} \quad (2.2)$$

Na obrázku 2.2 je zobrazen graf znázorňující FAR a FRR s rozdělením pravděpodobnosti a prahovou hodnotou.



Obrázek 2.2: Chyby FAR, FRR, FNMR a FMR (převzato z [3]).

### Míra chybné shody

Míra chybné shody – FMR (False Match Rate) je podíl pokusů útočníků s nulovým úsilím chybně vyhodnocených jako shodné s nevlastními šablonami vzoru. Udává tedy podíl chybně akceptovaných osob. Výpočet FMR je následující:

$$FMR(T) = \int_T^1 p(s|H_1) ds \quad (2.3)$$

kde  $T$  je rozhodovací práh,  $H_1$  je výrok „rozdílné“ (vzor a šablona jsou od různých osob),  $p$  je pravděpodobnostní hustota, že výrok v závorce je pravdivý a  $s$  je skóre porovnání. Rozdíl mezi FMR a FAR je takový, že FMR do celkových součtů nezahrnuje pokusy, které byly neúspěšné ještě před samotným porovnáním (FTA, FTE, viz níže).

### Míra chybné neshody

Míra chybné neshody – FNMR (False Non-Match Rate) vyjadřuje podíl případů, kdy je oprávněný uživatel systémem chybně vyhodnocen jako cizí osoba, tedy jeho biometrický vzorek není rozpoznán jako shodný s jeho vlastní šablonou. Jinými slovy, jedná se o situace, kdy systém zamítne přístup oprávněnému uživateli. Výpočet FNMR je následující:

$$FNMR(T) = \int_0^T p(s|H_0) ds \quad (2.4)$$

kde  $T$  je rozhodovací práh,  $H_0$  je výrok „shodné“ (vzor a šablona jsou od stejné osoby),  $p$  je pravděpodobnostní hustota, že výrok v závorce je pravdivý a  $s$  je skóre porovnání. Rozdíl mezi FNMR a FRR je takový, že FNMR do celkových součtů nezahrnuje pokusy, které byly neúspěšné ještě před samotným porovnáním (FTA, FTE, viz níže)

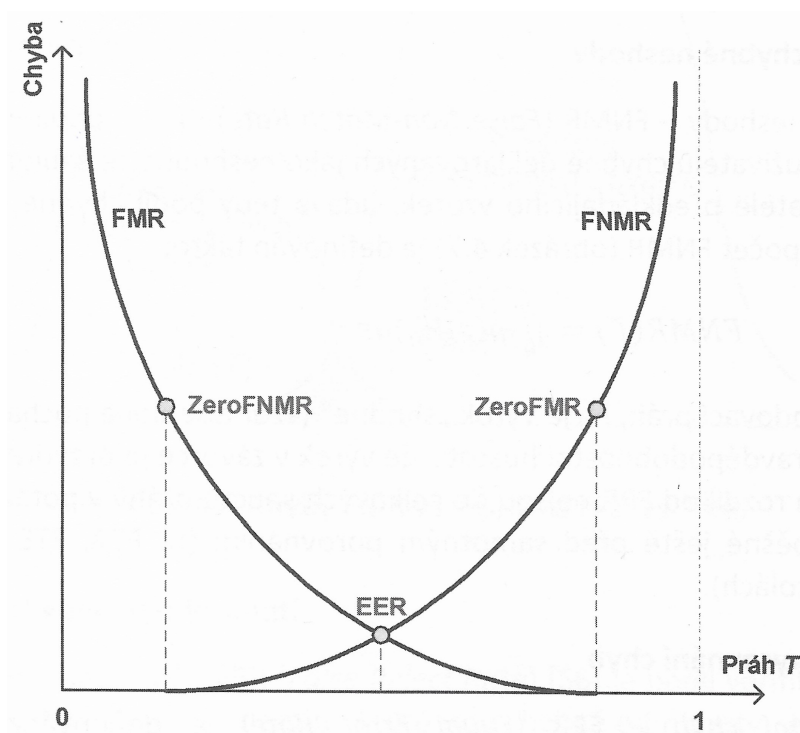
### Míra vyrovnání chyb

Míra vyrovnání chyb – EER (Error Equal Rate) zastává důležité místo při měření spolehlivosti biometrického systému. Je definována podmínkou  $FMR(T) = FNMR(T)$ . V praxi

jsou FMR a FNMR diskrétní funkce, tedy přesné určení EER není možné. Lze pouze identifikovat oblast, ve které se tyto chybové míry shodují. Při nastavení porovnávacího prahu na hodnotu EER bude chybně akceptován i odmítnut stejný počet lidí. Tento parametr je tedy pro biometrický systém velice důležitý, jelikož umožňuje nastavení prahu, aby byly hodnoty FMR a FNMR odpovídaly požadavkům systému. S pojmem EER souvisí dvě další charakteristiky, a to:

- ZeroFMR – dolní hranice FNMR, tj.  $FMR = 0$ ,
- ZeroFNMR – dolní hranice FMR, tj.  $FNMR = 0$ .

Závislost těchto charakteristik je vyobrazena na grafu v obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Závislost EER, ZeroFMR a ZeroFNMR (převzato z [3]).

### Míra neschopnosti nasnímat

Míra neschopnosti nasnímat – FTA (Fail To Acquire) je podíl pokusů o verifikaci či identifikaci, u kterých systém selže při zachycení či lokalizaci obrazu nebo signálu dostatečné kvality. Udává tedy podíl chybných záznamů při automatickém módu snímání daného senzoru. To znamená, že zaznamenání je odmítnuto, přestože je biometrická vlastnost u senzoru přítomna. Vysoká hodnota FTA naznačuje, že použitý senzor není vhodný pro záznam uvedené biometrické vlastnosti.

### Míra neschopnosti zaregistrovat

Míra neschopnosti zaregistrovat – FTE (Fail To Enroll) vyjadřuje podíl populace, pro kterou systém selže při registračním procesu – procentuální podíl uživatelů, které se systém není

schopen naučit. Velikost této míry bývá často ovlivněna vlastnostmi některých systémů – konkrétně kontroly kvality biometrické charakteristiky. To znamená, že se systém tyto charakteristiky nenaučí kvůli jejich nedostatečné kvalitě. FTE udává v systému s kontrolou kvality údaj, který ohodnocuje schopnost algoritmu pracovat s nekvalitními charakteristikami.

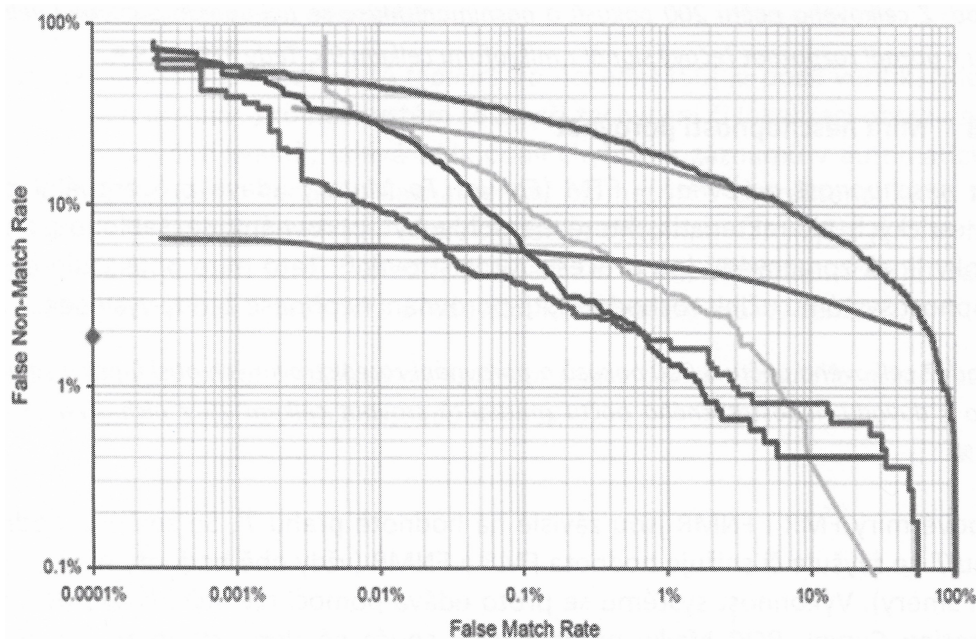
### Míra neschopnosti porovnat

Míra neschopnosti porovnat – FTM (Fail To Match) udává procentuální podíl biometrických charakteristik, u kterých systém nemohl provést porovnání se šablonou nebo po procesu zaregistrování nemohly být jakkoli jinak zpracovány. FTM poukazuje na neschopnost systému provést rozhodnutí, tedy situaci, kdy porovnání nepřinese žádný výsledek.

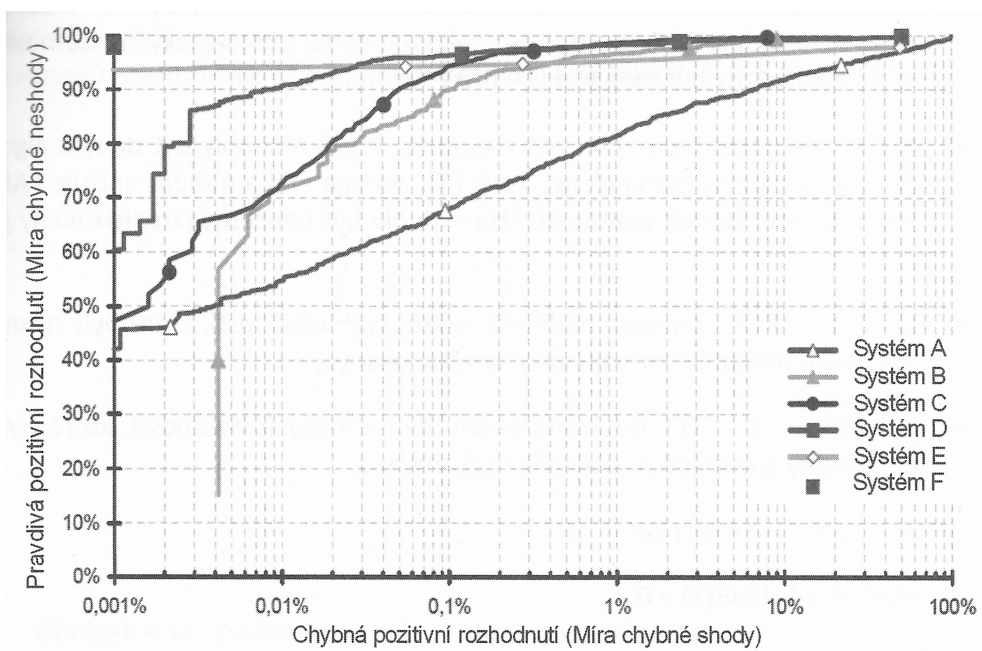
### DET a ROC křivky

Výkonnost biometrického systému se často vyjadřuje pomocí tzv. ROC křivky (Receiver Operating Characteristic Curve). Tato křivka slouží k popisu vlastností systému a umožňuje vizuálně zhodnotit jeho schopnost rozlišovat mezi shodnými a rozdílnými vzory. Grafy ROC umožňují optimalizovat porovnávací práh systému s ohledem na pravděpodobnost přijetí falešných biometrických údajů jako pravých (False Accept Rate, FAR) a naopak jejich odmítnutí jako nepravých (False Reject Rate, FRR). ROC křivka je rovněž užitečným nástrojem pro porovnávání různých přístupů k detekci padělků [12].

Dalším typem grafu je DET křivka (Detection Error Trade-Off Curve), která je obdobou ROC křivky, ale liší se způsobem zobrazení hodnot v grafu, což často usnadňuje interpretaci chyb detekce. Příklady křivek jsou uvedeny na obrázcích 2.4 a 2.5.



Obrázek 2.4: Ukázka DET křivky (převzato z [3]).



Obrázek 2.5: Ukázka ROC křivky (převzato z [3]).

## Kapitola 3

# Rozpoznávání podle sítnice

Lidské oko je unikátní smyslový orgán, který reaguje na světlo. Je to párový orgán umožňující živé bytosti vidět. Oko patří k nejpohyblivějším orgánům lidského těla a lze v něm nalézt mnoho struktur jedinečně specifických pro svého nositele. Oko tvoří dvě zásadní části, které mají relativně velkou biometrickou entropii, a jsou tak vhodnými kandidáty pro využití k rozpoznávání. První je duhovka – přední barevná část oka, a druhou sítnice, která je zodpovědná za vnímání světla a není pozorovatelná pouhým okem, jelikož se nachází na zadní straně oční koule [11]. Následující kapitoly se zabývají obecnými informacemi potřebnými k plnému pochopení ostatních částí práce. Popisují základy anatomie oka, choroby, postupy snímání a využití oka jako biometrické vlastnosti sloužící k rozpoznávání. Nedílnou součástí je také vysvětlení, jakým způsobem rozpoznávání sítnice funguje, tj. procesy a postupy nutné k získání snímku sítnice.

### 3.1 Anatomie oka

Tato kapitola vychází z [3][7][8][9][25]. Lidské oko je jedním z nejsložitějších smyslových orgánů těla. Zrak je smysl umožňující vnímat světlo, různé barvy a tvary. Zrak je pro člověka nejdůležitějším smyslem, ze kterého pochází zhruba 80 % všech informací. Základní struktura oka je vyobrazena na obrázku 3.1. Lidské oko se skládá z mnoha funkčních částí, jako jsou bělma (skléra), rohovka, zornice, čočka, duhovka, řasnaté tělísko, sítnice, zrakový nerv, cévnatka, atd.

Oko reaguje na světlo, které do něj vstupuje, a zajišťuje vidění. Z fyzikálního hlediska se jedná o optickou soustavu, která pomocí rohovky a čočky soustřeďuje světelné paprsky na povrch sítnice. Rohovka se nachází v přední části oka, je pružná, průhledná a má pevnou optickou mohutnost. Čočka dokáže měnit svůj tvar, a tím i optickou mohutnost a ohniskovou vzdálenost. Umožňuje zaostřit na předmět v různých vzdálenostech od pozorovatele (akomodace). Minimální a maximální vzdálenost, na kterou může oko zaostřit, je dána dvěma body [23]:

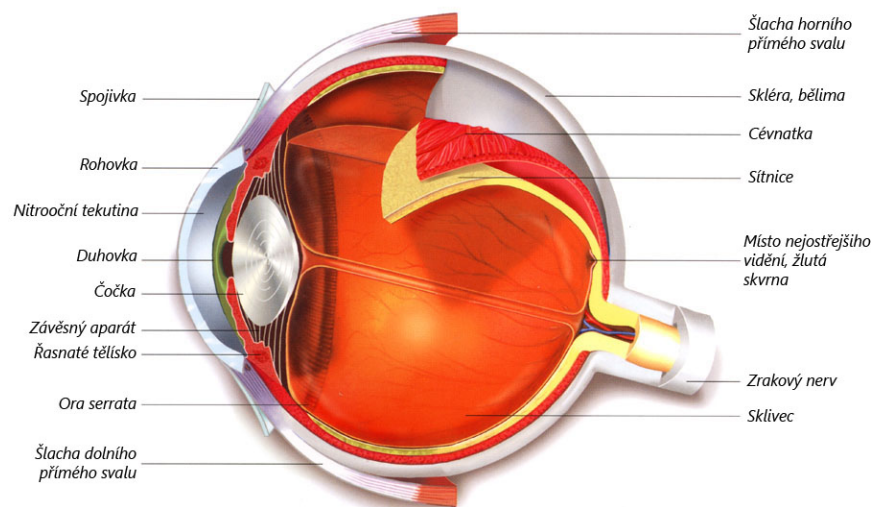
- Blízký bod (angl. *near point*) – nejmenší vzdálenost mezi objektem a pozorovatelem, která poskytuje stále ostrý obraz na sítnici. Jedná se o nejbližší bod, který vidí oko ostře při maximální akomodaci. V tomto případě má optická soustava oka největší optickou mohutnost více než 60 dioptrií. Zdravé oko dokáže bez námahy zaostřit na předmět ve vzdálenosti 25 cm.
- Daleký bod (angl. *far point*) – největší vzdálenost mezi předmětem a pozorovatelem, která poskytuje stále ostrý obraz na sítnici. Jedná se o nejvzdálenější bod, který oko

vidí ostře bez akomodace. Oční čočka má nejnižší optickou mohutnost. U zdravého jedince je tato vzdálenost v nekonečnu.

Na obrázku 3.2 je zobrazen princip projekce světelných paprsků do oka. Výsledný obraz vnějšího světa je v oku převrácený (vzhůru nohama), zrcadlený a zmenšený. Zachycený obraz je následně transformován na elektrické signály, které jsou prostřednictvím zrakového nervu vedeny do mozku. V mozku je obraz zpracován, tj. je převrácen vzhůru nohama a zrcadlen podle skutečnosti. Na obrázku si lze povšimnout existence dvou os – vizuální osy oka a optické osy. Osy mezi sebou svírají úhel přibližně 5°. *Optická osa* je přímka procházející středem rohovky, zornice, čočky a sítnice. Při pohledu na předmět podél této přímky je nejostřejší vidění – nachází se nejostřejší ohnisko. *Vizuální osa* je vizuální linie od středu zornice k fovee. Tato osa poskytuje nejlepší barevné vidění (protože fovea se skládá z vysoké hustoty čípků a žádných tyčinek).

Oko – koule oční je kulovitý orgán uložený v očnici. Její předozadní průměr je 24–26 mm, vertikální a příčný kolem 24 mm [7]. Stěna oka je anatomicky rozdělena do tří vrstev – vrstvy zevní vazivové (fibrózní), vrstvy střední s vysokou hustotou cév a vrstvy vnitřní, která je sensorickou částí. Tato kapitola se zabývá obecným popisem anatomie oka potřebným pro pochopení jeho funkcionality. K jednotlivým částem je uveden základní popis, funkcionality a umístění v rámci oka.

Důkladné pochopení anatomie oka úzce souvisí s návrhem optického systému pro pořízení digitální kopie oka. Tu lze využít pro lékařské i biometrické účely.

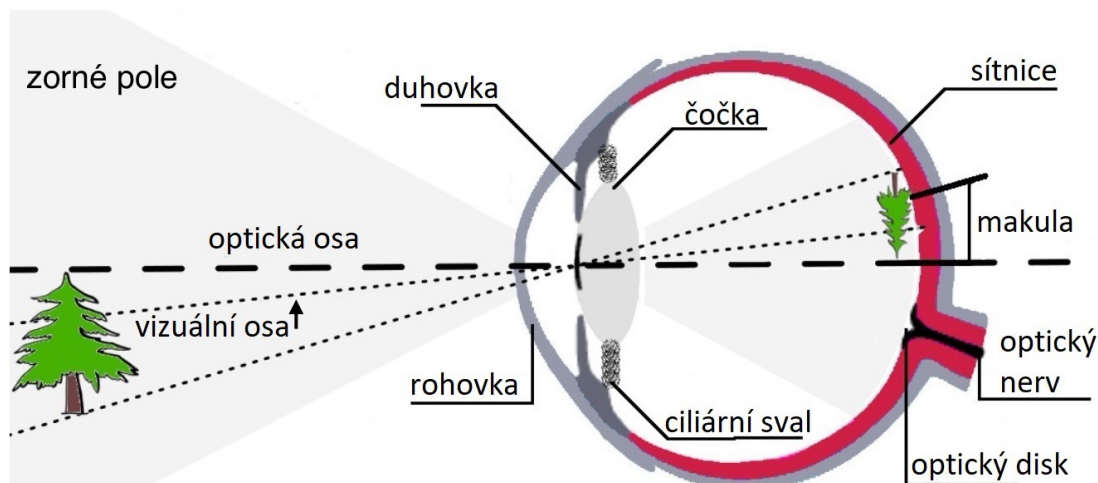


Obrázek 3.1: Anatomie oka (převzato z [19]).

### Zevní vazivová vrstva

Fibrózní vrstva slouží jako ochranná vrstva oka – tvoří tuhou a pevnou obal oční koule. Je místem úponů šlach okohybných svalů a stará se o stabilitu tvaru oční koule. Tvoří ji bělma (skléra) a rohovka – přední část, kterou do oka vstupují světelné paprsky.

**Bělma**, skléra, latinsky *sclera* tvoří největší část (cca 5/6) zevní vrstvy oka [25]. Je pevného a tuhého charakteru, tvořená kolagenními vlákny. Zastává funkci ochranného obalu vnitřních vrstev oka a představuje pevnou oporu pro připojení okohybných svalů. Je typická



Obrázek 3.2: Projekce světelných paprsků do oka (upraveno z [11]).

svým bělavým zbarvením převážně z důvodu, že je téměř bezcévná. S přibývajícím věkem její barva mírně žloutne. Zadní částí skléry z oka vychází zrakový nerv a současně do oka vstupují hlavní arterie a vény vyživující sítnici. Přední úsek skléry je kryt spojivkou, viz obr. 3.1. Přední část skléry tvoří velký otvor o průměru asi 12 mm. Do tohoto otvoru je zasazena rohovka. Přejít rohovky do skléry se přirovnává k zasazení hodinového sklíčka [7].

**Rohovka**, latinsky *cornea* tvoří přední elastickou část oka (cca 1/6). Uzavírá kruhový otvor v předním okraji skléry o průměru cca 12 mm. Rohovka je bezcévná. Díky svému vnitřnímu uspořádání zajišťuje průhlednost a propustnost pro světelné paprsky. Představuje tak ideální vstupní oddíl optického prostředí oka a z hlediska indexu lomitivosti světla je jeho nejvýznamnější součástí [25]. Rohovka má konstantní optickou mohutnost kolem 40 dioptrií, což představuje přibližně 2/3 celkové optické mohutnosti oka. Tato hodnota je po celou dobu života neměnná.

### Prostřední vrstva

Živnatka tvoří tenkou vrstvu oka, která se nachází hned pod vnější povrchovou vrstvou. Je tvořena řídkým vazivem s hojnými pigmentovými buňkami. Obsahuje krevní cévy, ze kterých je zásobována převážná část oční koule. Střední vrstvu oka lze rozdělit celkem na tři části – cévnatku, řasnaté těleso a duhovku.

**Cévnatka**, latinsky *choroidea* tvoří střední vrstvu stěny oční koule a představuje její největší část. Zaujímá přibližně 2/3 její zadní části. Má podobu 0,2–0,4 mm tenké blány, která je bohatě vaskularizovaná. Od skléry je z povrchové strany oddělena vrstvičkou řídkého vaziva, ve kterém taktéž probíhají četné cévy. Druhá, dutinová strana cévnatky je hladká a přiléhá na ni sítnice. Díky bohatosti na pigment cévnatka pohlcuje světelné paprsky a zabraňuje jejich odrazům a přesvětlení oka. Stará se o výživu buněk sítnice a představuje pro ni jakousi tmavou komoru. Směrem k rohovce se cévnatka rozšiřuje a vytváří řasnaté těleso, které obsahuje hladká svalová vlákna starající se o regulaci ztlušťování, a tím i refrakci mohutnosti čočky (akomodace oka).

**Řasnaté těleso**, latinsky *corpus ciliare* vychází z duhovky a v zadní části přechází do cévnatky. Má tvar zřaseného prstence, který je přiložen na vnitřní stranu bělimy. Z dutinové

strany směřuje k okraji čočky. Součástí řasnatého tělesa jsou četné hladké svalové buňky, které tvoří tzv. *musculus ciliaris* (řasnatý sval). Jeho kontrakce umožňuje změnu napětí v závěsném aparátu čočky, což způsobuje změnu tvaru čočky. Tento proces představuje základ akomodace oka.

**Duhovka**, latinsky *iris* představuje společně se zornicí jednu ze dvou nejdůležitějších částí oka vhodných pro biometrii. Je to barevná prstencovitá struktura, která se stará o regulaci průměru zornice a tím i o množství světla přicházejícího do oka. Vybíhá z řasnatého tělíska jako neúplná přepážka tvaru mezikruží s centrálně uloženým otvorem zvaným zornice. Duhovka tvoří nejpřednější část střední vrstvy stěny oka. Z přední části je od rohovky oddělena přední komorou oční. Přední plocha duhovky je rozdělena kruhovitou vlnovitou čarou na dva nestejně velké prstence – vnitřní (šířka asi 1 mm) a zevní (šířka 3–4 mm). Barva, textura a vzor duhovky jsou u každé osoby jiné. Barvu oka určuje duhovka. Barva duhovky závisí na hustotě melaninového pigmentu, tedy množství barviva zvaného *melanin* v její přední části. Při malém množství pigmentu má oko modrou barvu, naopak při větším množství barvu až tmavě hnědou.

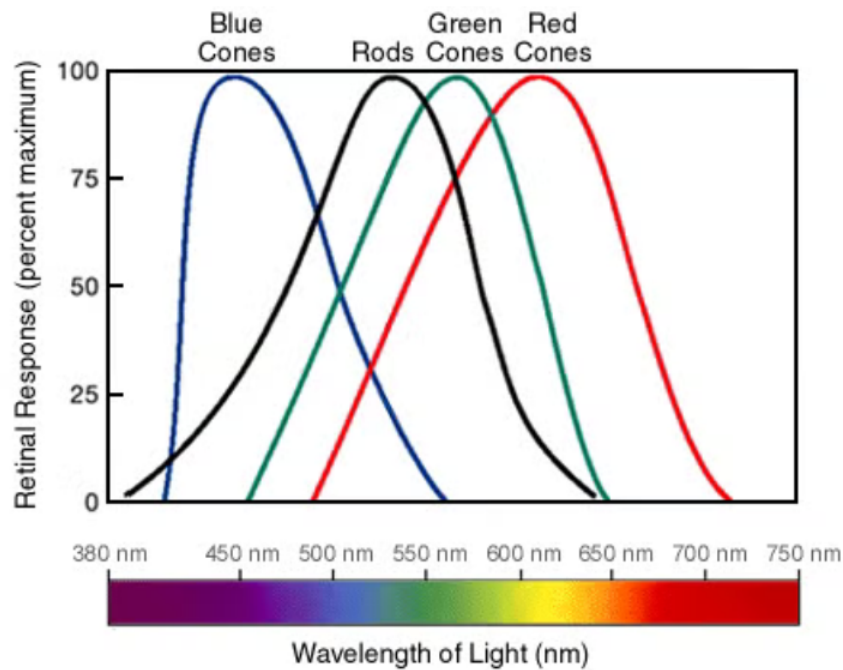
Duhovka je téměř celá tvořena pojivovou tkání a hladkými svalovými vlákny a zastává funkci regulace množství světla přicházejícího do oka. Je spojena s jemnými svaly, které můžeme rozdělit do dvou systémů na rozvěrač a svěrač zornice. Pokud je světla příliš mnoho, aktivuje se svěrač zornice, který způsobí její zúžení. Naopak pokud je světla nedostatek, dochází k aktivaci rozvěrače, který zornici roztáhne.

Povrch duhovky je pro biometrii velice důležitý díky tomu, že obsahuje asi 250 rysů. Nejdůležitějšími rysy jsou krypty, radiální rýhy a pigmentové skvrny.

## Vnitřní vrstva

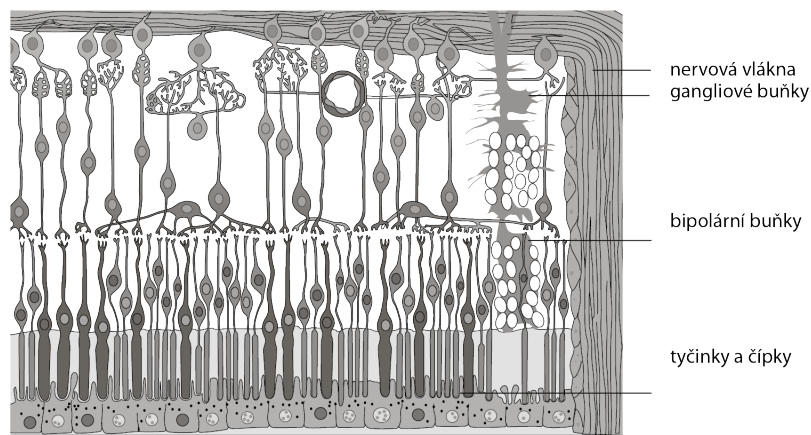
Vnitřní vrstvu oka tvoří **sítnice**, latinsky *retina*. Jak je vyobrazeno na obrázku 3.1, nachází se na zadní části vnitřního prostoru oční koule a vystýlá celou její dutinovou část. Je považována za součást centrální nervové soustavy (CNS) a je částí, kterou lze přímo a neinvazivně pozorovat. Jedná se o vrstvu buněk citlivých na světlo, tenkou přibližně 0,2–0,4 mm. Optický systém oka vytváří na sítnici obraz reálného světa, který je otočený a invertovaný. Světelné paprsky nejprve procházejí přes rohovku a čočku a až poté dosahují sítnice. Při dopadu světla na sítnici započne kaskáda chemických a elektrických jevů, které okamžitě aktivují nervové impulzy. Ty jsou prostřednictvím vláken optického nervu vysílány do jednotlivých zrakových center mozku. Funkci sítnice můžeme přirovnat k funkci filmu ve fotoaparátu [14].

Sítnice se skládá z několika vrstev neuronů, které jsou propojeny pomocí synapsí. Nejdůležitější je vrstva obsahující primární smyslové buňky (fotoreceptory) a neurony, které sbírají informace z fotoreceptorů a dále je vysílají prostřednictvím očního nervu z oka do mozku. Rozlišujeme dva druhy fotoreceptorů sítnice – tyčinky a čípky [14]. Tyčinky registrují množství dopadajícího světla, fungují převážně při tmavých podmínkách. Umožňují pouze černobílé vidění a jejich zastoupení v sítnici oka je majoritní. Naopak čípky vyžadují mnohem více světla a slouží k dennímu vidění a vnímání barev. Rozlišujeme tři typy čípků podle citlivosti na různé rozsahy vlnových délek – konkrétně se rozlišují pro barvy modrou, červenou a zelenou. To samozřejmě neznamená, že bychom mohli vidět pouze tyto tři barvy. Díky překryvu čípků a způsobu, jakým mozek nakládá s jejich signály, dokážeme rozlišit široké spektrum barev. Tento způsob míchání barev lze připodobnit k paletě RGB. Na obrázku 3.3 můžeme vidět graf zabývající se rozložením vlnových délek pro jednotlivé typy čípků a tyčinky.



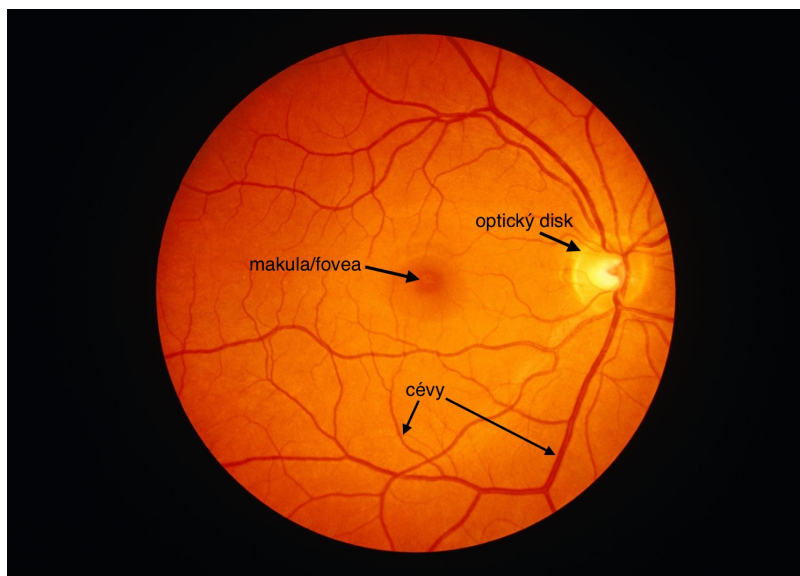
Obrázek 3.3: Graf vlnových délek, které snímají jednotlivé typy čípků (převzato z [14]).

Celá plocha sítnice zabírá cca 70% vnitřního povrchu oční koule a obsahuje přibližně 7 milionů čípků a 75 až 150 milionů tyčinek [9][14]. Na obrázku 3.4 je zobrazena stavba sítnice.



Obrázek 3.4: Stavba sítnice (převzato z [25]).

Na obrázku 3.5 zachycujícím oční pozadí lze rozlišit několik útvarů, ke kterým patří slepá skvrna (neboli také optický disk) a žlutá skvrna (makula). Zhruba ve středu sítnice leží žlutá skvrna (*macula*) kulovitěho až eliptického tvaru o průměru přibližně 5 mm. V jejím středu se nachází prohlubeň nazvaná *fovea centralis*, která leží přímo ve vrcholu optické osy a představuje tak místo nejostřejšího vidění, jelikož se do ní promítá centrální paprsek. V této oblasti převládají převážně čípky, které zde mají i největší hustotu [25]. Žlutá skvrna má ve srovnání s okolní sítnicí sytě červenou barvu. Žlutou barvu má až po smrti člověka.



Obrázek 3.5: Snímek sítnice (upraveno z [10]).

Druhým útvarem, který se na obrázku 3.5 nachází napravo od makuly, je optický disk. Toto bělavé kruhové políčko o průměru přibližně 3 mm je místem, kterým z oční koule odstupuje zrakový nerv. Tato oblast plně postrádá veškeré receptory. Pokud tedy na toto místo dopadne paprsek světla, pro člověka nebude viditelný. V těchto případech si mozek často vymýšlí, jak by obraz měl vypadat, aby toto místo zaplnil. O existenci slepé skvrny se může každý sám přesvědčit pomocí jednoduchého testu popsáno např. v [3] (strana 189).

Na základě řady studií bylo potvrzeno, že vzdálenost mezi optickým diskem a foveou je přibližně 2,5 násobek průměru optického disku [27]. Povědomí o tomto vztahu může výrazně usnadnit práci se snímky, na kterých fovea není přímo zachycena. Tento fakt umožňuje zhruba odhadnout její polohu a zpřesnit výsledky, které by mohly být ovlivněny absencí makuly, čímž se zlepší celková přesnost analýzy.

Na obrázku lze vidět, jak je sítnice bohatě protkaná vyživujícími cévami a nervy. Hlavními zdroji krve pro sítnici jsou cévy a sítnicová tepna. Větší průtok krve zajišťuje cévnatka (*choroidea*) – konkrétně vyživuje vnější stranu s fotoreceptory. Sítnicová tepna obstarává především vnitřní stranu sítnice a obvykle má čtyři hlavní větve. Celý cévní aparát připomíná mozek, kdy struktura a žilní spleť jsou během života neměnné.

Díky svému umístění uvnitř oka je sítnice velmi dobře chráněna proti vnějším vlivům. Po celou dobu života zůstává cévní struktura neměnná a je proto vhodná pro biometrické účely.

## 3.2 Oční choroby

Oko, tak jako každou jinou část lidského těla, může v průběhu života postihnout nějaká choroba. Choroby lze rozdělit např. na dědičné, vyléčitelné a nevyléčitelné. Vyléčitelná choroba je odstranitelná bez větších následků, např. řezná rána či zánět. Naopak nevyléčitelná choroba je postižení, které nelze odstranit aniž by to mělo za následek ztrátu (zmizení) biometrické informace. Jakýkoli typ choroby, ať už se jedná o dočasnou či trvalou, může přímo

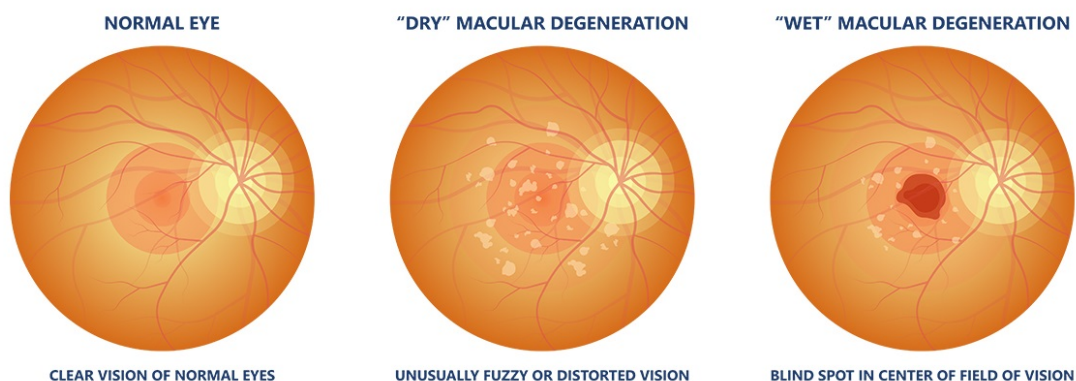
ovlivnit průběh rozpoznávání. Pokud je tedy struktura sítnice ovlivněna jakoukoli chorobou, může dojít k nesprávnému vyhodnocení rozpoznávání či možnosti úplného zamítnutí vytvořeného vzoru [3]. Následující část se zabývá onemocněními, které přímo ovlivňují strukturu sítnice.

## Makulární degenerace

Makulární degenerace je onemocnění, které v 90 % případů vzniká s přibývajícím věkem. V tomto ohledu se mluví o tzv. věkem podmíněné makulární degeneraci (VPMD, nebo anglicky *age-related macular degeneration* – ARMD), která je nejčastější příčinou slepoty u pacientů starších 65 let. S rostoucím počtem starších lidí její výskyt stále stoupá. Nejčastějšími faktory vzniku VPMD jsou vysoký věk, kouření cigaret, nízký příjem antioxidantů ve stravě, dědičnost, rasa, obezita, hypertenze (vysoký krevní tlak), nevhodné stravování a sluneční UV záření. Nicméně jedinou zatím potvrzenou příčinou rozvoje VPMD je stáří.

Ve zbytku případů se makulární degenerace vyskytuje u mladých lidí nebo dětí ve formě *Bestovy makulární degenerace* nebo *Stargardtovy nemoci*. Tato onemocnění vznikají převážně na základě dědičnosti.

U makulární degenerace dochází k postižení centrální části sítnice – makuly. Důsledkem tohoto poškození dochází k poklesu centrální zrakové ostrosti – periferní vidění zůstává nepoškozené, avšak ve středu zorného pole vidí pacient šedý stín až černou skvrnu. Makulární degenerace se vyskytuje ve dvou formách: suché (atrofické) a vlhké (exudativní). Mezi společné symptomy patří rozmazaná šedá nebo černá skvrna v centru zorného pole (známého jako *centrální skotom*) [11]. Postižená osoba vidí deformované rovné linie, rozmazané písmo nebo neodpovídající tvar předmětů, současně může docházet k postižení vidění barev, které se mohou zdát vybledlé [3]. U suché formy se postupně objevují nažloutlé usazeniny pod sítnicí (drúzy), otoky a vysychání. V průběhu nemoci buňky postupně odumírají a vytváří zjizvení. Vlhká forma naopak postupuje rychle a projevuje se velice rychlým a masivním zhoršením zraku. Při této formě cévy prorůstají do sítnice a může docházet ke krvácení, hromadění tekutiny (edémům) a také může dojít k odchlípení sítnice [17]. Na obrázku 3.6 je zobrazena ilustrace sítnice postižené makulární degenerací.



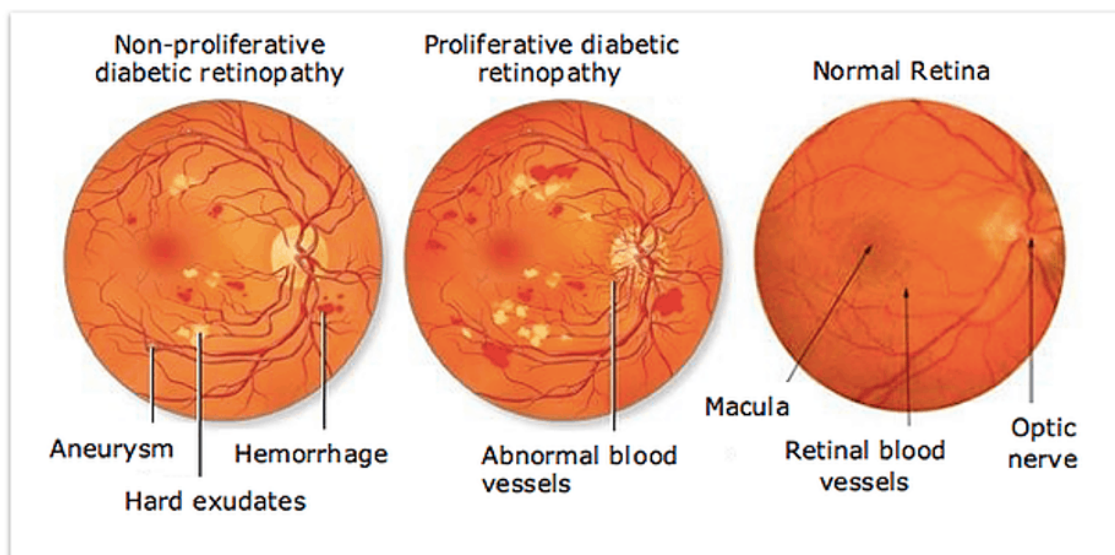
Obrázek 3.6: Ilustrace sítnice postižené nemocí makulární degenerace. Vlevo je zdravá sítnici, uprostřed suchá forma a vpravo vlhká forma MD (převzato z [22]).

## Diabetická retinopatie

Diabetická retinopatie (DR) je nejčastější cévní onemocnění sítnice. Jedná se o nezánettivé onemocnění, které vzniká jako důsledek postižení cév u diabetu mellitu [3]. Příznaky se objevují zhruba po deseti letech trvání nemoci, ale mohou i dříve nebo později, v závislosti na tom, jak dobře je diabetes kompenzován, tj. jak se diabetikovi daří udržovat glykemický index co nejbliže normálním hodnotám. Rizikovými faktory tohoto onemocnění jsou kouření a vysoký krevní tlak [16].

Diabetická retinopatie se vyskytuje ve dvou formách. První se nazývá neproliferativní a vyznačuje se tvorbou malých mikroaneurysmat, která často praskají a vedou k dalším typickým příznakům – malým krvácením. Další forma se nazývá proliferativní diabetická retinopatie. Projevuje se netěsností cév, ze kterých vytéká tekutina, která způsobuje otok sítnice. Oko se kvůli nedostatečnému prokrvení a otoku snaží vyřešit situaci růstem nových cév (*neovaskularizace*). Nově vzniklé cévy jsou však křehké, nekvalitní, vyrůstají na nesprávném místě a mají pro oko katastrofické následky. Krvácení pak silně poškozuje zrak a může způsobit odchlípení sítnice. Vzniklé krevní usazeniny brání sítnici zachytit obraz [23].

V práci [28], zabývající se očními poruchami, je průběh onemocnění popsán následovně: „V raném stádiu DR na sobě pacient nepozoruje žádné symptomy, v této fázi může sítnicové změny odhalit pouze oční lékař během prohlídky. V pokročilejším stádiu se změny sítnice promítnou na zhoršeném vidění pacienta, kdy se obvykle jedná o postižení obou očí. Pacient pociťuje rozmazané vidění, které je způsobeno buďto krvácením do sklivce nebo kolísáním hladiny cukru v krvi. Často se jedinci barvy jeví jako vybledlé a v zorném poli se mu postupně objevuje více a více plovoucích skvrn, které vnímá jako tmavé oblasti bránící vidění. Bez lékařského zásahu člověk postupem času přichází o zrak.“



Obrázek 3.7: Ilustrace sítnice postižené nemocí diabetická retinopatie. Vlevo neproliferativní forma, uprostřed proliferativní forma, vpravo zdravá sítnice (převzato z [6]).

Na obrázku 3.7 je ilustrováno porovnání zdravé sítnice se sítnicemi postiženými oběma formami diabetické retinopatie. Snímek vlevo zobrazuje sítnici postiženou neproliferativní formou diabetické retinopatie (*Non-proliferative diabetic retinopathy*). Na tomto snímku jsou vidět mikroaneurysmata (*aneurysm*), což jsou drobná vyduťtí cévních stěn, která mohou

vést k úniku tekutiny. Dále se na snímku nacházejí tzv. těžké exsudáty (*hard exudates*), což jsou žlutavé lipidové usazeniny vzniklé z prosakující tekutiny. Posledním jevem na tomto snímku jsou místa krvácení (*hemorrhage*), která se projevují jako červené skvrnité oblasti způsobené poškozením cév.

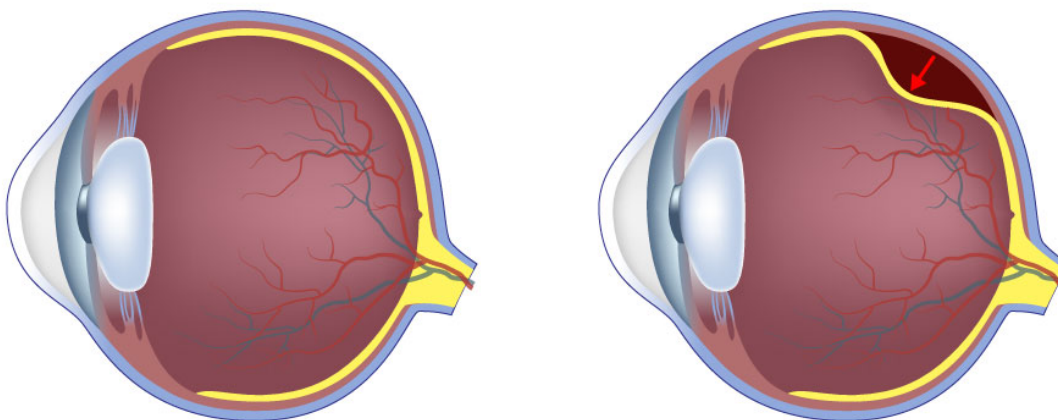
Druhý snímek (uprostřed) ukazuje proliferativní formu diabetické retinopatie, kde jsou přítomny nové cévy vzniklé neovaskularizací. Tyto cévy jsou malé, křehké a náchylné ke krvácení. Třetí snímek (vpravo) zobrazuje zdravou sítnici.

## Odchlípení sítnice

Odchlípení sítnice je velice závažné onemocnění, které může jedince zasáhnout v jakémkoli věku, nejčastěji se však vyskytuje ve středním až starším věku. V zorném poli se objevují mžitky, malé tečky nebo tmavý stín. K odchlípení sítnice oka dochází, když se v sítnici objeví trhliny nebo otvory. Těmito místy prosakuje sklivcová tekutina pod sítnici, což vede k jejímu odchlípení od cévnatky. V důsledku odchlípení se do sítnice nedostávají živiny a kyslík, takže buňky sítnice postupně odumírají. K odchlípení nejprve dochází na kraji sítnice, ale pokud se neléčí, pomalu se přesouvá až k centru vidění.

Odchlípení sítnice se nejčastěji vyskytuje u starších lidí, při krátkozrakosti, či při diabetické retinopatii. Pokud lékař včas objeví trhliny či otvory sítnice dříve než dojde k jejímu odchlípení, může je ošetřit pomocí laseru. Pokud však k odchlípení sítnice již došlo, nezbývá jiná možnost než operace pod kompletní anestézií.

Toto onemocnění zcela ničí postižené oblasti sítnice. Ve výsledku je aktuální struktura od původní natolik odlišná, že snímání jedince nebude pomocí biometrického systému rozpoznán. Ilustrace oka s odchlípnutou sítnicí je na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Ilustrace sítnice postižené odchlípením sítnice. Vlevo se nachází ilustrace normální sítnice, vpravo odchlípená sítnice (převzato z [5]).

## Toxoplazmóza

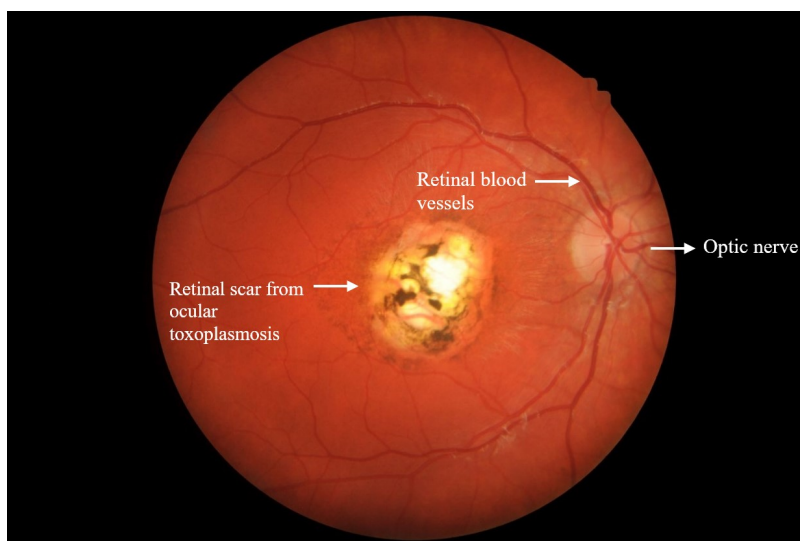
Celá následující část čerpá z [3] a [18].

Toxoplazmóza je parazitické onemocnění oka, které se řadí mezi tzv. *zoonózy*, tedy nemoci přenosné ze zvířat na člověka. Oční forma probíhá jako zánět cévnatky s poškozením sítnice a krvácením.

Toxoplazmóza se vyskytuje po celém světě. V evropských zemích má přibližně 10–60 % obyvatel vytvořené protilátky proti toxoplazmóze, což závisí na jejich stravovacích návycích. V České republice je přítomnost protilátek v krvi odhadována na 20–40 %.

Nemoc se obvykle projevuje zvýšenou teplotou, příznaky podobnými chřipce, bolestmi hlavy, svalů, únavou a mohou trvat až tři měsíce. Nejčastěji jsou zduřené lymfatické uzliny krční, v záhlaví, tříslech a pod pažemi. Uzliny jsou poměrně citlivé až přímo bolestivé a zvětšené bývají několik měsíců. Akutní fáze onemocnění může někdy přejít do chronického stádia, v 90 % případů však infekce probíhá zcela bez povšimnutí a je odhalena pouze přítomností specifických antitoxoplasmových protilátek v krvi. Ty mohou v nízké koncentraci přetrvávat po celý život (latentní fáze infekce).

Existuje mnoho typů toxoplazmózy – například uzlinová, oční (obr. 3.9), mozková, gynekologická a další. Ostatní formy toxoplazmózy jsou však méně běžné [3].



Obrázek 3.9: Ilustrace sítnice postižené toxoplazmózou (převzato z [2]).

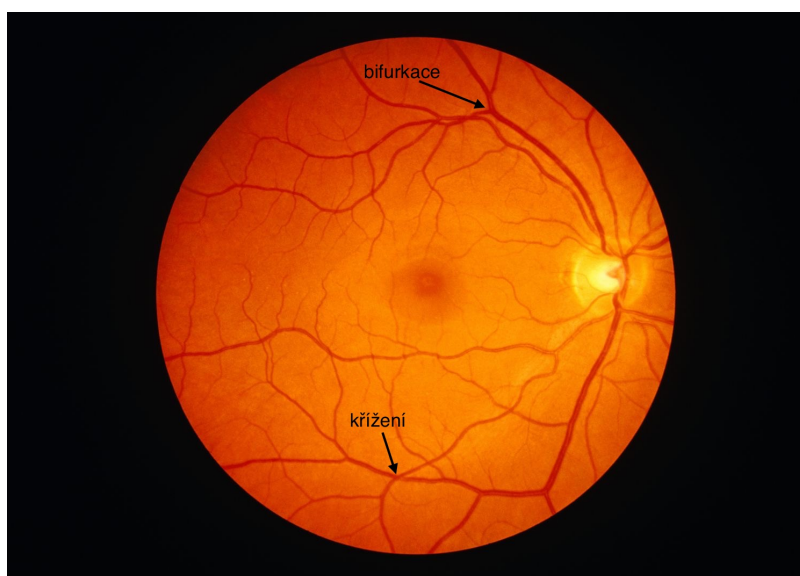
### 3.3 Biometrické rozpoznávání podle sítnice

V porovnání s ostatními biometrickými vlastnostmi nabízí oko, především duhovka a sítnice, vyšší míru náhodnosti. Na základě několika studií bylo dokázáno, že struktury sítnice i duhovky vykazují výrazné rozdíly i u identických dvojčat. Tyto oční struktury navíc zůstávají během lidského života neměnné. Rozpoznávání podle sítnice tedy nabízí vysokou bezpečnost a nízkou pravděpodobnost výskytu padělků. Jakýkoliv pokus o padělání snímku sítnice je velmi obtížný, v prvním kroku by musel útočník získat snímek sítnice, což ale není bez vědomí a spolupráce jedince a speciální kamery či oftalmoskopu možné. V druhém kroku by útočník musel napodobit optický systém oka, aby mohl systém provést skenování padělku sítnice.

Ačkoli je technika identifikace založená na sítnici často vnímána jako velmi bezpečný biometrický přístup, není tato metoda široce používána kvůli několika zásadním nevýhodám. Mezi hlavní nevýhody se řadí především složitost a cena optického systému pro snímání, nízká míra uživatelského komfortu a přívětivosti při snímání. Navzdory tomu má rozpoznávání podle sítnice velký potenciál. Sítnice má na rozdíl od ostatních biometrických vlastností

značnou výhodou v jedinečnosti a počtu rysů, kterých může být až 400 [9]. Navíc je sítnice jediné místo CNS v lidském těle, kde je možné neinvazivně a přímo pozorovat cévní obraz. Mezi hlavní rysy můžeme zařadit například velikost optického disku, velikost relativních úhlů hlavních cév vycházejících z optického disku nebo barevné vzory sítnice a krevního řečiště sítnice [23]. K dalším často používaným rysům patří cévní struktura sítnice, konkrétně se jedná o rysy založené na větvení a křížení cév a jejich zakončení.

V současnosti neexistují žádné standardy pro rozpoznávání podle sítnice, nicméně v podstatě se jedná o podobný snímek cév tomu, který se používá při rozpoznávání pomocí krevního řečiště rukou či prstů. Konkrétně se při rozpoznávání osoby používá jedinečný vzor krevních cév ve snímku sítnice. Jedním z možných přístupů je porovnávání tzv. *bifurkací* a *křížení* cévních struktur. Bifurkace je místo, kde se jedna céva dělí na dvě a křížení je místo, kde se cévy vizuálně kříží. Pro ilustraci je uveden obrázek 3.10.



Obrázek 3.10: Snímek sítnice s vyznačením klíčových bodů (upraveno z [10]).

### 3.4 Postupy a technologie

Procesy potřebné pro identifikaci/verifikaci jsou pro systémy pracující se snímky sítnice stejné jako u ostatních biometrických technologií. Lze je rozdělit do tří netriviálních subsystémů:

- získání a zpracování snímku – pořízení digitálního snímku pomocí optického systému kamery,
- preprocessing a porovnání – předzpracování snímku, extrakce klíčových příznaků a porovnání se šablonami z databáze,
- reprezentace – reprezentace vyextrahovaných rysů umožňující rychlé porovnání či ukládání do databází.

## Snímání

Pořizování snímků sítnice je jedna z nejdůležitějších částí celého procesu. Snímací zařízení pracují na principu lékařských optických přístrojů pro vyšetření oka. K těmto zařízením patří tzv. retinoskopy nebo fundus kamery. Mechanická složitost těchto zařízení se silně projevuje na jejich ceně.

Princip pořizování snímků je stále podobný jako u retinoskopu. Na sítnici je nejprve zaměřen paprsek světla a následně je pomocí CCD kamery snímáno odražené světlo. Paprsek světla z retinoskopu se nastaví tak, aby jej oční čočka zaostřila jako bod na povrch sítnice. Tím se část prošlého světelného paprsku odrazí zpět do oční čočky, která jej znovu nastaví, přičemž paprsek opouští oko pod stejným úhlem, pod jakým do něj vstoupil (zpětný odraz). Tímto způsobem lze získat snímek povrchu oka v úhlu přibližně  $10^\circ$  kolem vizuální osy, jak ukazuje obrázek 3.10.

Z uživatelského hlediska vypadá proces snímání následovně. Přístroje nebývají zcela automatické, tedy je potřeba přítomnost odborníka, který se bude starat o zachycení snímku. Snímaná osoba musí nejprve přiblížit oko velice blízko k přístroji. Pro zajištění, aby byla snímaná oblast zaostřena na sítnici a oko uživatele bylo v ose skenovacího paprsku, slouží fixační bod. Pro kvalitní zachycení snímku musí uživatel zaměřit svoje oko na tento fixační bod a ideálně po celou dobu snímání setrvat ve stejné poloze. Zdrojem osvětlení pro snímání je světlo vlnových délek podobných infračervenému záření. V okamžiku, kdy oko zaostří na fixační bod, zařízení se automaticky zarovná do osy vycentrováním rotujícího disku na oční pozadí. Při zarovnání dvou a více vzorů za sebe je infračervený paprsek vycentrován na pupilu a může dojít k přečtení informace [3]. Při snímání si uživatel musí sundat brýle, aby nebyl ovlivněn postup snímání, předpokládá se, že většina uživatelů by měla být schopna zaostřit bez ohledu na svou optickou vadu.

Fundus kamery fotografují vnitřní povrch oka, včetně sítnice, cévního řečiště sítnice, optického disku, žluté skvrny a zadního pólu (tj. fundu), jak je znázorněno na obrázku 3.10.

## Porovnání

Porovnávací část biometrického systému lze rozdělit na několik částí. V první fázi dochází k předzpracování (preprocessingu) snímku. Předzpracování se provádí za účelem přípravy snímku k dalším operacím. Účelem je vyjmutí obrazu sítnice z pozadí, odstranění zašuměných oblastí, úprava kontrastu, převod zeleného kanálu na odstíny šedi (*grayscale*), segmentace, extrakce rysů a mnoho dalších operací. Tato část je velice důležitá, jelikož zachycené snímky sítnice mohou být při jednotlivých snímáních mírně pootočený v porovnání s původní nasnímanou pozicí. Tento proces se stará o jakousi standardizaci snímků, která spočívá v zarovnání snímků podle vybraných klíčových bodů do jednotné podoby. Každý zpracovávaný snímek je dále upraven na dané rozlišení. Hlavním důvodem je urychlení výpočtů, kde při redukci pixelů dojde ke snížení počtu nutných operací. V dalším kroku se provádí oddělení pozadí snímku od popředí se sítnicí, hlavním důvodem je efektivita vedoucí ke snížení počtu výpočtů a druhým důvodem je odstranění nežádoucího šumu pozadí, který by mohl být škodlivý pro proces detekce. Každé takové pozadí může být jiné, mít jiný tvar a velikost a barva taktéž nemusí být jednotná. Z těchto důvodů je dobré zaměřit se při extrakci na detekci podle ostrých hran mezi pozadím a obrazem sítnice. Pro automatizované oddělení pozadí od obrazu sítnice je nutné nejprve obraz převést do odstínů šedé (*grayscale*), aplikovat vyhlazení (*smoothing*) zprůměrováním standardní masky o velikosti dané podle filtru a poté zvolit prahovou hodnotu, která umožní toto oddělení. U některých

snímků není pozadí čistě černé, což může způsobit problémy při oddělení pozadí od požadované části obrázku. Z tohoto důvodu se tato hodnota počítá pro každý snímek zvlášť [23].

Rozpoznávání podle sítnice závisí nejčastěji na vzoru cév a jejich vlastnostech, proto je velmi důležité, aby byly cévy přesně segmentovány. Další fáze se zabývá „vylepšením“ obrazu cévního řečiště a následnou segmentací pomocí waveletů a různých prahovacích technik. Tím získáme vylepšený obraz vhodný pro následnou extrakci příznaků.

Jako biometrickou vlastnost lze využívat celé extrahované snímky cévního řečiště, avšak pro snížení výpočetního času, a to bez ztráty přesnosti a spolehlivosti, se využívá pouze sada příznaků (features). Ideální příznak by měl být dobře rozlišitelný od svého okolí a měl by být invariantní vůči změnám jasu, kontrastu, natočení, posunutí, měřítka a dalších geometrických či fotometrických transformací. Důležitým aspektem je taktéž spolehlivost a dobrá detekovatelnost příznaku. Podle volby příznaku je pak pro rozpoznávání zvolen vhodný algoritmus. Často využívanými příznaky při rozpoznávání podle snímků sítnice jsou body větvení (tzv. *bifurkace*), body křížení cév a koncové body cév. Body větvení jsou místa, kde se céva rozdvouje – dělí do dvou menších cév, a body křížení jsou místa, kde se dvě krevní cévy překrývají (viz obrázek výše 3.10). Avšak existuje spousta algoritmů využívajících jiné postupy, které mohou využívat následujících příznaků:

- vlastnosti cévního řečiště – cévní hustota, tvar a rozložení cév,
- textura sítnice, textura okolí optického disku,
- optický disk – využití specifických geometrických a texturálních charakteristik. Tvar, umístění, velikost optického disku a poměr jeho velikosti vůči velikosti cévního řečiště,
- různé parametry cév – délka, úhly mezi cévami, průběh cév.

Poslední fáze reprezentuje samotné porovnávání snímků. Tato fáze je klíčová pro všechny algoritmy sloužící k určení shody dvou snímků. V databázi je prohledáván záznam se snímkem, který je podobný (odpovídá) snímku vstupnímu. Tento princip hraje jednu z nejdůležitějších rolí identifikačních systémů. Existuje mnoho srovnávacích metrik pro určení shody dvou snímků. Shodu snímků lze spočítat pomocí korelace, kovarianční matice či pomocí metrik založených na vzdálenosti. Mezi metriky založené na vzdálenosti můžeme zařadit vzdálenost Euklidovskou, Manhattanskou, Čebyševovu, Minkowského, Canberrovu nebo Bray-Curtisovu.

## Reprezentace

Reprezentace slouží jako sjednocená šablona, která obsahuje příznaky extrahované ze zpracovaných snímků. Tyto příznaky jsou uspořádány a ukládány do databáze ve standardizovaném formátu. Reprezentace sítnice je navržena tak, aby byla optimalizována pro snadné a efektivní využití v procesech biometrické identifikace.

Neexistuje žádná obecná šablona, ani standard pro reprezentaci sítnice, jelikož formát šablony čistě závisí na konkrétní metodě extrakce rysů. Např. v [3] je uvedena následující podoba:

*„Šablona sítnice obsahuje pole 96 čtyřbitoých čísel kontrastů z 96 scanů soustředných kruhů v časové oblasti, tj.  $96 \cdot 4 = 48$  bytů. Intenzity jsou v časové oblasti a mohou nabývat hodnot v intervalu  $\langle -8, 7 \rangle$ , přičemž se provádí normalizace na toto rozložení – úprava na 4 bity intenzivního rozložení.“*

## 3.5 Historie

První zmínky o struktuře sítnice oka se objevují v první polovině 20. století. V roce 1935 zjistili dva oční lékaři Dr. Carleton Simon a Dr. Isidore Goldstein při studiu očních chorob, že obraz krevního řečiště v sítnici se u dvou jedinců liší, tedy že by lidé mohli být identifikováni na základě struktury cév ve snímku sítnice. Následně svou práci publikovali v časopisovém článku [24], který se zabýval využitím snímku sítnice (konkrétně obrazu žil) jako unikátního vzoru pro identifikaci osob.

Jejich výzkum byl podpořen doktorem Paulem Towerem, který se zabýval studiem jednovaječných dvojčat. V roce 1955 publikoval článek zabývající se touto studií [26]. Zjistil, že právě vzory cév vykazují nejmenší podobnost ze všech dalších zkoumaných vzorů. Jeho myšlenka o rozpoznávání pomocí snímku sítnice se stala nadčasovou. Všechny tyto objevy podpořily výzkum různých oftalmologických přístrojů, které lze použít ke snímání sítnice.

Koncept plně automatizovaného a jednoduchého zařízení pro identifikaci osob snímáním sítnice se objevil až v roce 1975. Přišel s ním Robert Hill, který následně roku 1976 zakládá firmu EyeDentify, která postupně začala s vývojem těchto přístrojů. Z počátku vývoje tyto přístroje vycházely z nástrojů lékařů a byly příliš drahé a složité [21]. Nicméně plně funkční zařízení se na trhu neobjevilo ještě několik dalších let. Nejprve se pro osvětlení při snímání používalo běžné viditelné světlo. To se ale časem vyjevilo jako nevhodné, neboť množství světla, které muselo být vyzářeno, bylo tak velké, že bylo pro uživatele velice nepříjemné. Modernější systémy pro osvětlení sítnice využívají infračervené světlo (IR), které je pro člověka neviditelné. Zajišťuje tedy vyšší míru komfortu při snímání než klasické světlo a hlavně nedochází ke zmenšování průměru zornice.

První fungující prototyp zařízení byl představen roku 1981. Snímání očního pozadí probíhalo speciální kamerou s osvětlením IR záření. Tato kamera byla připojena ke standardnímu počítači, který sloužil pro analýzu pořízeného snímku. Výsledkem testování byl jako nejvhodnější algoritmus pro srovnávání zvolen algoritmus jednoduché korelace [3] [21].

Po dalších čtyřech letech usilovné práce uvedla společnost EyeDentify, Inc. na trh systém *EyeDentificationSystem 7.5*. Tento systém prováděl ověření na základě obrazu sítnice a PIN kódu zadaného uživatelem s údaji uloženými v databázi. Poslední produkt společnosti EyeDentify nazvaný ICAM 2001 byl navržen v roce 2001. Hlavním rozdílem mezi starším modelem byl především ve velikosti databáze, tento přístroj dokázal pojmout až 3000 vzorů sítnice [11]. Přístroj byl také mnohem kompaktnější. Bohužel, díky své vysoké ceně a uživatelské nepřívětivosti byl stažen z trhu. Společnost EyeDentify tímto ukončila svou činnost a přestala nabízet své výrobky.

O vývoj sítnicové technologie se snažily i další společnosti. V roce 1999 vznikla firma Retinal Systems LLC, která pracovala na vývoji systému pro identifikaci osob na základě oční sítnice, zcela nezávisle na algoritmech firmy EyeDentify [21]. Tento systém měl být mnohem jednodušší na implementaci do komerčních aplikací a měl být mnohem uživatelsky přívětivější. Nicméně i tento produkt na trhu neuspěl.

## 3.6 Vyhodnocení technologie rozpoznávání pomocí sítnice

Technologie rozpoznávání osob podle snímků sítnice přináší velkou přesnost a spolehlivost, avšak existuje mnoho limitací, kvůli kterým nebyla do reálného světa stále nasazena. Mezi hlavní nedostatky této technologie můžeme zařadit následující body:

- strach uživatelů z poškození oka – obavy veřejnosti, že snímání může poškodit jejich zrak,
- venkovní a vnitřní použití – různá světelná prostředí ovlivňují velikost zornice, což může vést k horší kvalitě obrazu sítnice a snížení přesnosti rozpoznávání,
- porucha zraku (astigmatismus) – snímání uživatel s astigmatismem není schopen zaostřit na fixační bod a není tedy možné správně zachytit snímek sítnice,
- vysoká cena zařízení – cena snímacího zařízení pro sítnici je podstatně vyšší než např. přístroje pro snímání otisků prstu,
- samotný proces snímání – akceptace uživatelů nechat se snímat, mnoho lidí má z této technologie strach.

Mezi možné zdroje chyb lze zařadit nedostatečnou fixaci oka, chybnou vzdálenost od snímače, nedostatečně rozšířenou pupilu, interferenci světla, oční čočky a mnoho dalších.

## Kapitola 4

# Extrakce rysů sítnice a porovnání – návrh

Výsledná aplikace je navržena a koncipována jako unimodální biometrický systém využívající sítnici jako zdroj biometrické informace pro porovnávání. Aplikace bude umožňovat registrovat, tedy vytvářet šablony z poskytnutých snímků a ukládat je ve stanovené formě do databáze, dále pak provádět verifikaci a identifikaci osob se záznamy v databázi. Pro jednoduchost jsem se rozhodl, že aplikace bude konzolového charakteru, jelikož není zapotřebí žádných interaktivních grafických elementů. Na základě požadované operace aplikace poskytne buď potvrzení či vyvrácení identity při verifikaci, či poskytne identitu hledané osoby při identifikaci. Třetí možností spuštění je samotná registrace, která nebude obsahovat žádné návratové hlášky operací, maximálně pouze informativní hlášku o uložení šablony do databáze.

Tato práce je pojata formou experimentování s různými technikami, kdy na základě výsledků bude zvolena technika vykazující nejlepší výsledky. Jako klíčové rysy pro rozpoznávání jsou zvoleny body křížení a bifurkační.

Tato kapitola se zabývá návrhem výsledné aplikace s důrazem na jednotlivé kroky, které budou prováděny, jak u předzpracování snímků, tak i u samotného porovnání. Kapitola pouze abstrahuje systém, konkrétně použité techniky a metody budou uvedeny v následující kapitole o implementaci 5.

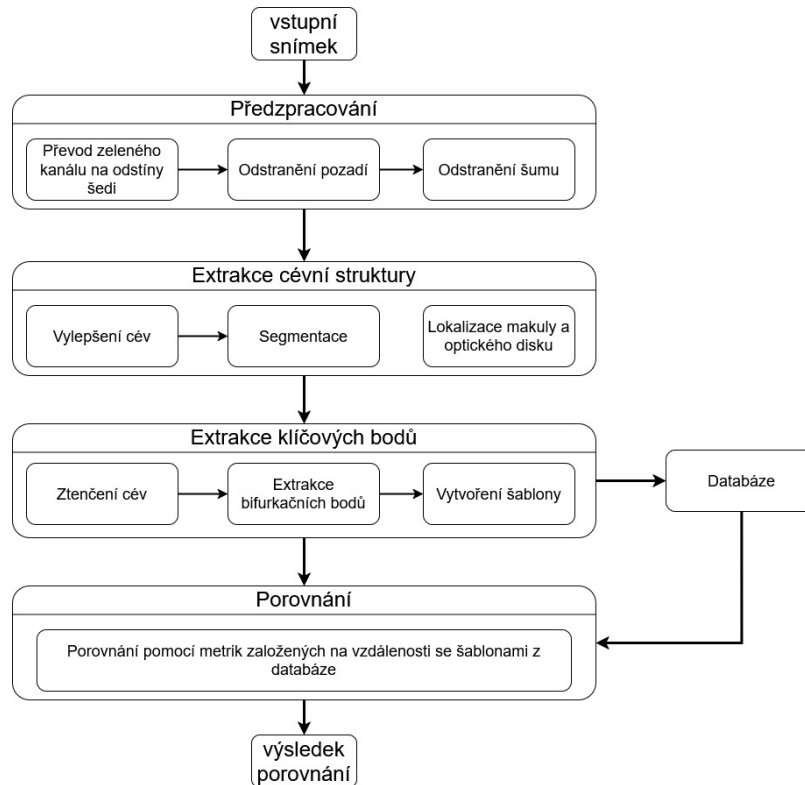
Navrhovaný systém se skládá celkem ze čtyřech částí – předzpracování, extrakce cévní struktury, extrakce klíčových bodů a samotného porovnání. Na obrázku 4.1 je zobrazen vývojový diagram navrhovaného systému.

### 4.1 Příprava snímku pro porovnání

Příprava snímků je důležitou fází, která produkuje extrahované rysy dále používané pro uložení či porovnání. Tato část navrhované aplikace obsahuje fázi předzpracování, extrakci cévní struktury a extrakci klíčových bodů.

#### Předzpracování

První fází předzpracování je úprava rozlišení snímku na stanovenou hodnotu. Hlavním důvodem této operace je především zrychlení výpočtů a druhým neméně důležitým i stanovení jednotných parametrů pro snímky, které by při rozličných hodnotách rozlišení musely být každému snímku samostatně nastavovány. Pokud má vstupní snímek větší rozlišení, tzn.



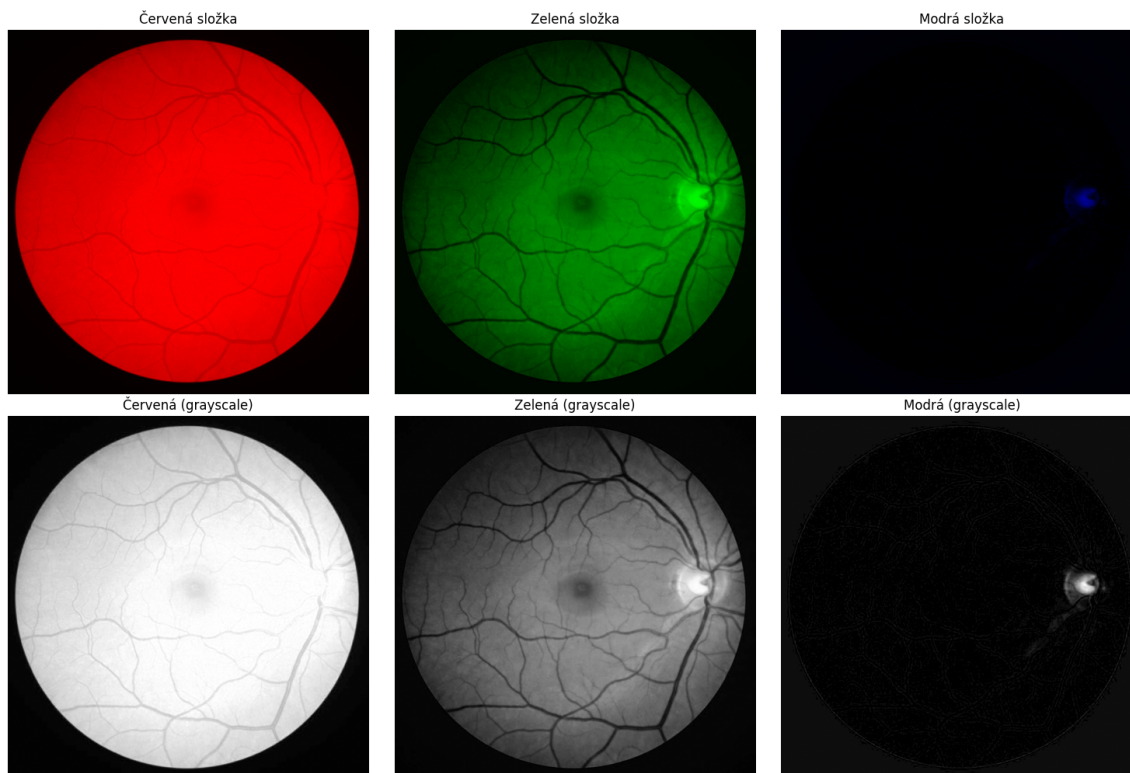
Obrázek 4.1: Vývojový diagram systému pro rozpoznávání podle sítnice (inspirován a upraven z [1]).

větší počet pixelů, rozlišení je zmenšeno. Zmenšení probíhá formou vytvoření jednoho pixelu ze čtyřech existujících. Pokud je počet pixelů snímků nižší než stanovená hodnota, rozlišení je zdvojnásobeno.

Další fází zpracování snímku je oddělení oblasti zájmu. Konkrétně se jedná o odstranění pozadí snímku, které může negativně ovlivňovat následující operace. Pozadí snímků nemusí být jednotné, může obsahovat zašumělé oblasti či jiné rušivé elementy, proto je třeba dbát na správné oddělení. Pro odstranění pozadí se nejčastěji využívá technik segmentace obrazu, která odděluje relevantní části snímku – sítnici od nežádoucího pozadí. Mezi metody pro odstranění pozadí lze zahrnout prahování (celého obrazu či adaptivní), využívání hranových detekcí nebo segmentace na základě texturálních a barevných vlastností. Pro finální oddělení se často tyto metody kombinují, přičemž je velice důležité zajistit, aby byl proces segmentace co nejpřesnější, protože jen tak lze minimalizovat chyby v další analýze a tím zvýšit spolehlivost celého systému. Při oddělování pozadí se často pracuje s obrazem převedeným do odstínů šedi. Tento krok značně zjednodušuje proces segmentace a snižuje výpočetní náročnost. Barvy v mnoha ohledech mohou působit jako rušivé faktory. V rámci implementace bude experimentováno s různými metodami pro oddělení relevantní části snímku.

Jak již bylo v minulém odstavci zmíněno, obraz je nejprve potřeba převést do odstínů šedi. To se netýká pouze odstranění pozadí, ale celého procesu. Od této doby budeme tedy uvažovat slovo snímek jako už předzpracovaný snímek, u kterého bylo odstraněno pozadí, případný šum a byl převeden do odstínu šedi. V případě snímků sítnice se využívá převod zeleného kanálu na odstíny šedi. Důvodem pro výběr právě zeleného kanálu je množství

relevantních informací, které obsahuje. Na obrázku 4.2 si lze povšimnout různých barevných složek snímků, na které byl původní snímek rozložen. Na prvním řádku jsou zobrazeny jednotlivé snímky barevných složek v pořadí červená (R), zelená (G), modrá (B). Druhý řádek obsahuje tytéž barevné složky s rozdílem, že jsou převedeny do odstínů šedi.



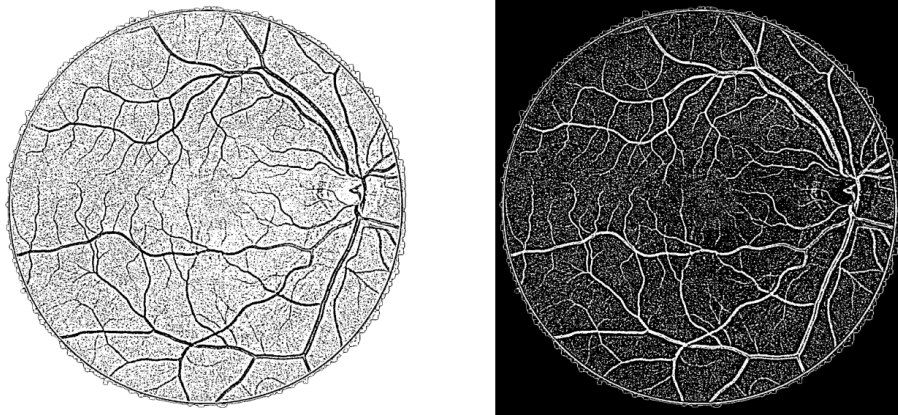
Obrázek 4.2: Barevné složky snímku sítnice na 1. řádku, zleva – červená, zelená, modrá; 2. řádek zobrazuje snímky převedené do odstínů šedi.

Nyní je snímek připraven na další operace, které budou zahrnovat zvýraznění cévní struktury, optického disku, makuly (i fovey) a dále jejich lokalizaci a extrakci.

### Extrakce cévní struktury

Rozpoznávání podle sítnice závisí výhradně na vzoru cév a jejich vlastnostech, proto je velmi důležité, aby byly cévy přesně segmentovány a při procesu nebyla ztracena žádná relevantní část. Pro správnou identifikaci klíčových bodů je potřeba nejprve „vylepšit“ cévy, tedy zvýraznit je, aby bylo dále možné jednoduše identifikovat klíčové body. Pro segmentaci cév lze využít 2D Gaborovu vlnkovou transformaci, která zajistí zesílení cév, a v druhé fázi využít techniku adaptivního prahování. Výsledkem těchto dvou procesů je vylepšená síť cév, jakou lze vidět na obrázku 4.3.

Na tento produkt jsou dále aplikovány různé techniky vyhlazování, které se starají o odstranění rušivých elementů, které mohly vzniknout při aplikaci předchozích technik. Cílem je vyprodukovat snímek obsahující pouze cévy. Adaptivní prahování a vyhlazování však mohou vést ke ztrátě některých informací, konkrétně mohou narušit průběh nějaké cévy (přerušit ji). Z těchto důvodů je zapotřebí provést další zpracování, které zajistí analýzu okolí a klasifikaci, zda se jedná o cévy či nikoli.



Obrázek 4.3: Gaborova transformace a adaptivní prahování (vlevo), invertovaný snímek (vpravo).

Současně je v této fázi relevantní lokalizovat optický disk a makulu. Tyto dva objekty sítnice budou využívány jako body sloužící pro zarovnání snímků. Budou sloužit pro jakousi normalizaci snímku do šablony. Nicméně může se stát, že na snímku nebude zachycena makula (tzn. i fovea). V tomto případě se výsledná aplikace pokusí odhadnout pozici fovey na základě pozice a velikosti optického disku. Na snímcích sítnice se fovea nachází vždy relativně na stejném místě vzhledem k optickému disku, přibližně na dvaapůlnásobku jeho šířky. Jelikož jsou makula i optický disk kruhového až oválného tvaru, pro jejich lokalizaci budou využity detektory kruhových tvarů – konkrétně Houghova transformace. Tyto operace jsou prováděny na původním šedotónovém snímku.

### Extrakce klíčových bodů

Hlavními klíčovými body této implementace jsou body větvení (bifurkační), kde se céva dělí na dvě větve, a dále body křížení a body koncové. Na extrahovaném snímku se nejprve provede morfologické ztenčování cév, které cévy zredukuje na tenké linky bez ztráty potřebné informace. Spojitost cév, taktéž jejich tvar a poloha zůstávají zachovány. Tato operace nejenže snižuje výpočetní čas, ale také zmenšuje paměťové nároky pro uložení šablony.

Pokud je takto extrahovaná síť cév dostatečně kvalitní, detekce klíčových bodů už není složitým úkolem. Extrakce těchto příznaků se provádí například pomocí metody průsečíků (anglicky *crossing number* – CN). Předpokladem je, že obraz je převeden do binární podoby, kde každý pixel má hodnotu 0 nebo 1. Tato metoda extrahuje bifurkační, křížící a koncové body na základě zkoumání okolních bodů každého pixelu s použitím okna o velikosti 3x3 pixely. Pokud mají 3 sousední pixely (z celkových 8 sousedních pixelů) stejnou hodnotu jako aktuální bod  $(x,y)$ , pak je aktuální bod vyhodnocen jako bod větvení. Pokud má centrální bod okna pouze jednoho souseda se stejnou hodnotou, jedná se o koncový bod cévy. Jako místo křížení cév je bod označen v případě, kdy více než tři sousední pixely mají stejnou hodnotu jako aktuální bod. Normální průběh cévy lze poznat tak, že centrální pixel okna má právě dva sousedy se stejnou hodnotou. Body, ve kterých se nacházejí cévy, budou nabývat hodnotu 1, ostatní hodnotu 0. Výsledkem tohoto procesu je nalezení klíčových bodů, které budou využity pro finální porovnání či uložení do databáze. Vytvořená šablona bude tvořit vektor klíčových bodů, který se následně použije pro porovnání.

## 4.2 Porovnávání

Porovnání dvou šablon je poslední fází celého procesu aplikace. Pro porovnání šablon budou použity metriky založené na vzdálenosti. Primárně bude aplikována Euklidovská vzdálenost a experimentálně vyzkoušeny i jiné metriky a porovnány jejich výsledky.

Proces porovnání bude vracet míru podobnosti (skóre porovnání) dvou šablon v procentech, podle které budou šablony klasifikovány na základě stanoveného prahu za shodné či odlišné.

## Kapitola 5

# Implementační postupy a jejich vyhodnocení

Na základě návrhu systému a dalších získaných poznatků byla v rámci této práce realizována implementace biometrického systému využívajícího body větvení a křížení cév jako klíčové rysy pro rozpoznávání. Hlavním cílem implementace bylo prozkoumat různé varianty postupů, experimentovat s nimi a vyhodnotit jejich přínos z hlediska přesnosti a spolehlivosti systému.

Implementace se opírá o návrh popsany v kapitole 4, přičemž některé metody byly v průběhu realizace upraveny či nahrazeny na základě dosažených výsledků. Tato kapitola se věnuje popisu použitých metod pro jednotlivé části systému a jejich zhodnocení.

Všechny nastavené parametry, které byly v rámci implementace zvoleny, vycházejí z experimentování s přibližně stovkou snímků pocházejících ze tří různých databází. Použity byly snímky z veřejné databáze DRIVE, DiaRet a dále snímky pořízené fundus kamerou v laboratoři na FIT VUT v Brně.

### 5.1 Použité technologie

Pro implementaci systému byl zvolen programovací jazyk *Python* ve verzi *3.10.13*. Pro zpracování snímků a dat byla využita knihovna *OpenCV*, zaměřená na počítačové vidění, a knihovna *NumPy* pro efektivní práci s numerickými daty a poli. Dále byly použity moduly *scipy.ndimage* pro konvoluční operace, *pathlib* pro správu souborových cest a *argparse* pro zpracování vstupních argumentů, spolu s dalšími nativními knihovnami jazyka Python.

Volba jazyka Python byla motivována jeho přehledností, jednoduchostí a rozsáhlou podporou knihoven vhodných pro rychlý vývoj v oblasti zpracování obrazu a datové analýzy. Mezi jeho hlavní výhody patří přívětivá syntaxe a široká komunita. Nevýhodou je naopak nižší výkonnost oproti kompilovaným jazykům, jako je například C++, což se může projevit delší dobou zpracování zejména při práci s většími databázemi. Přesto byla rychlost vyhodnocena jako dostatečná pro účely této práce.

### 5.2 Architektura

Vyvinutý systém je implementován jako konzolová aplikace umožňující tři hlavní operace: registraci nové šablony, verifikaci identity a identifikaci osoby na základě poskytnutého snímku.

Funkcionalita aplikace je rozdělena do tří modulů odpovídajících jednotlivým operacím (registrace, verifikace, identifikace). Všechny moduly sdílí společné jádro, jehož úkolem je provést předzpracování snímku a přípravu potřebných dat. Výstup jádra pak slouží jako vstup pro nadřazené moduly dle zvolené operace.

Aplikace je ovládána pomocí argumentů příkazové řádky. Klíčové přepínače jsou následující:

- `-r` nebo `-register` pro registraci nové identity do databáze,
- `-v` nebo `-validation` pro verifikaci identity,
- `-i` nebo `-identification` pro identifikaci osoby bez předem známé identity.

Dále je nutné zadat:

- cestu ke vstupnímu snímku (`-im` nebo `-image`),
- cestu k databázi (`-d` nebo `-database`).

V případě operací registrace a verifikace je navíc vyžadováno specifikovat jméno identity pomocí argumentu `-n` nebo `-name`.

Tato modulární struktura zajišťuje přehlednost kódu a umožňuje případné budoucí rozšíření systému o nové funkcionality bez zásadních zásahů do stávající architektury.

### 5.3 Předzpracování

Předzpracování snímků sestává ze tří hlavních kroků. Krom samotného načtení snímku, které je provedeno pomocí funkce *imread* z knihovny *OpenCV*, se jedná o sjednocení rozlišení snímků na danou hodnotu, vyhledání oblasti sítnice a oříznutí snímků.

V rámci předzpracování je každý snímek upraven na rozlišení přibližně 1 MPix při poměru stran 1:1, tedy na velikost 1000×1000 pixelů. Samotná oblast sítnice má ve snímcích obvykle přibližně kruhový tvar, který odpovídá požadovanému poměru stran, avšak mimo tuto oblast se často nachází černé či jinak barevné pozadí. Z tohoto důvodu nemusí mít původní snímky striktně čtvercový tvar. Sjednocení rozměrů do čtvercového formátu o zmíněném rozlišení je realizováno následujícím způsobem: Nejprve je určeno původní rozlišení snímku a z jeho rozměrů je vybrána menší hodnota, která slouží k výpočtu škálovacího faktoru. Tento faktor je následně použit k proporcionálnímu přepočítání obou rozměrů tak, aby byl zachován původní poměr stran a nedošlo k deformaci obrazu. Samotná změna velikosti je poté provedena funkcí *resize*.

Při zachování původního poměru stran snímků sice nedochází k deformaci obrazu, nicméně z hlediska snížení výpočetních nároků při následném zpracování je vhodné odstranit co nejvíce nepotřebných částí snímku. Pro tento účel je nejprve nutné detekovat oblast sítnice. Detekce probíhá rozmazáním obrazu pomocí mediánového filtru o velikosti 5×5 pixelů a následnou aplikací Houghovy transformace zaměřené na vyhledávání kruhových tvarů. Parametry funkce *HoughCircles* jsou nastaveny tak, aby detekovaly kružnice s minimálním poloměrem ( $\text{min}/3$ ) - 40 pixelů a maximálním poloměrem ( $\text{min}/2$ ) + 100 pixelů, kde *min* označuje menší stranu rozlišení snímku. Středy detekovaných kružnic musí být od sebe vzdáleny minimálně 300 pixelů. Tyto parametry byly zvoleny na základě experimentálního testování s přibližně 110 snímky, u kterých vedly ke stoprocentní úspěšnosti detekce. Výstupem této transformace jsou souřadnice středu nalezené kružnice a její poloměr.

Po detekci středu oblasti zájmu, tedy kruhové části snímku obsahující sítnici, je možné provést oříznutí obrazu. Při ořezu se zachovává kratší strana, která byla již dříve nastavena na 1000 pixelů. Druhá strana je rovněž upravena na 1000 pixelů, přičemž je nutné určit oblast, která má ve výsledném snímku zůstat zachována. Rozmezí této oblasti se vypočítá na základě souřadnice středu sítnice příslušné strany, od které se odečte polovina hodnoty rozlišení druhé strany (vždy 500 pixelů). Počáteční souřadnice oblasti odpovídá tomuto výpočtu, zatímco koncová souřadnice je získána jednoduše přičtením hodnoty 1000 pixelů (v implementaci hodnotou délky kratší hrany). Výsledný snímek je oříznut podle takto stanovených mezí a zároveň jsou přepočítány souřadnice středu, které se v jednom směru vlivem oříznutí mění.

Kromě předchozích operací dochází v rámci této části programu i k vytvoření masky oblasti sítnice pro eliminaci rušivých elementů (např. šumu). Při implementaci byly vyzkoušeny celkem tři přístupy s naprosto odlišnými jádry. Všechny tyto postupy již pracují se šedotónovými obrázky. První z nich je vytvoření masky pomocí Cannyho hranového detektoru. Detekce hran ve dvourozměrném obraze zahrnuje několik kroků, kde mezi hlavní dva patří eliminace šumu Gaussovým filtrem a prahování. Před použitím samotného detektoru je aplikován Gaussovský filtr o velikosti  $3 \times 3$ , dále proběhne detekce, které následuje vyhledání kontur. Z kontur jsou odstraněny ty, jejichž oblast je menší než hodnota 1000, a v poslední řadě je vybrána největší z nich, která je následně vykreslena do prázdné šablony pro masku.

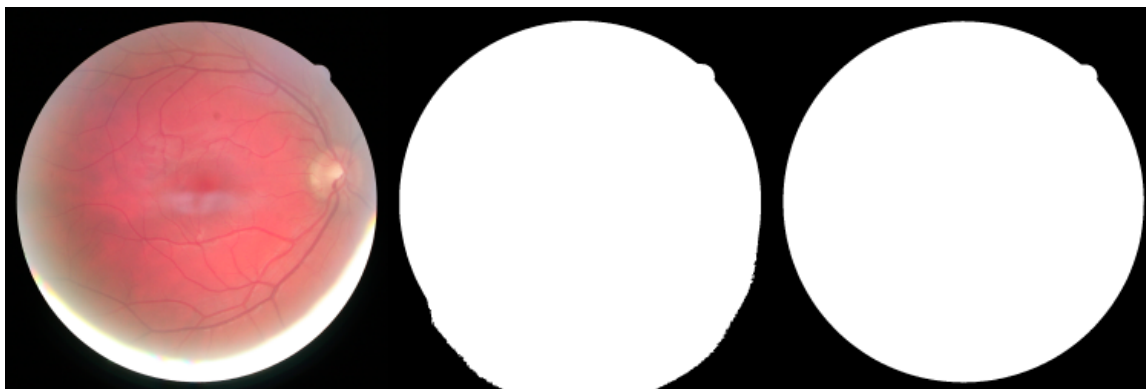
Druhým postupem je využití prahování. Jednotlivé snímky mohou mít pozadí v jiném stavu (nedokonale černé, různá místa šumu, atd.), je tedy nutno použití individuálního přístupu. Nejprve je na snímky aplikován Gaussovský filtr o velikosti  $5 \times 5$ . Pro každý snímek je vypočítána vlastní hodnota prahu následujícím způsobem: U všech čtyř rohů snímku je vytvořen čtverec o straně délky jedné desetiny výšky snímku, následně se vypočítá průměrná intenzita v těchto čtvercích a v poslední řadě se tyto čtyři vzniklé intenzity taktéž zprůměrují. Tato hodnota se zaokrouhlí a přičte se k ní hodnota 5. Následně se provede prahování s vypočteným parametrem a ve vzniklém binárním obraze se vyhledají kontury. Největší kontura pak patří sítnici a tím je vytvořena její maska. Použití tohoto postupu je inspirováno z [23]. Bylo experimentováno s různým nastavením velikosti čtverců, konkrétně  $1/5$  a  $1/4$  výšky, avšak při tmavších snímcích se tyto hodnoty ukázaly jako neoptimální a byla zanechána strana o délce  $1/10$  výšky. Jediným úskalím této metody jsou snímky s rušivými částmi světla, které mohou masku znehodnotit (viz obrázek 5.1).

Posledním vyzkoušeným postupem je vytvoření masky na základě detekce kruhových objektů. Tento postup prakticky vychází a kopíruje metody použité při počítání oblasti zájmu zmíněné o několik odstavců výše. Snímek je nejprve rozmazán mediánovým filtrem o velikosti  $5 \times 5$  a následně transformován pomocí Houghovy transformace, která se pokusí nalézt kružnice. Parametry funkce jsou ponechány na totožné hodnoty jako u počítání oblasti zájmu, neboť je požadován stejný výsledek.

Takto předzpracovaný snímek je připraven k dalším operacím, přičemž díky sjednoceným rozměrům je možné využívat stabilní a předem definované hodnoty parametrů při následném zpracování.

## 5.4 Zpracování a segmentace

Aktuální část systému se zabývá detekcí a lokalizací optického disku (slepé skvrny) a fovey, které jsou využity pro výpočet transformace nutné pro zarovnání a překrytí porovnávaných snímků. Ze snímku jsou dále segmentovány cévy a v poslední řadě probíhá extrakce klíčo-



Obrázek 5.1: Znečištění snímku světlem vedoucí k nedokonalosti vytvoření masky. Snímek sítnice (vlevo), maska vytvořená pomocí prahování (uprostřed) a maska, která by měla správně vzniknout (vpravo).

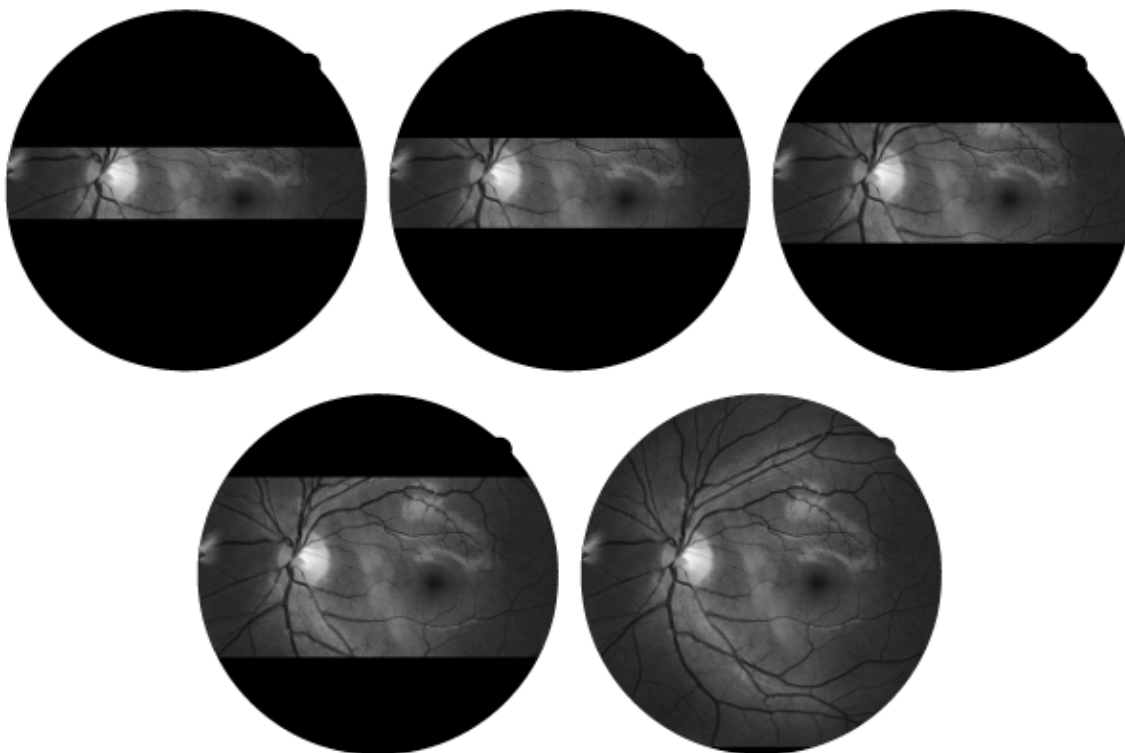
vých bodů. Tato podkapitola se zabývá použitými metodami při implementaci zmíněných částí a shrnuje možné alternativní přístupy, se kterými bylo experimentováno, a důvody, proč nebyly pro výslednou implementaci zvoleny.

## Detekce optického disku

Optický disk mívá podobu oválného tvaru a často také mívá z celé sítnice největší intenzitu. Díky těmto poznatkům se nabízí jasná cesta pro jeho detekci. Může se však stát, že snímek bude znečištěn například světelnými odlesky, či kontrasty nemusí být zcela vyvážené. Je tedy nutné brát ohled i na pozici optického disku, ve které se většinou ve snímcích nachází. Dalším problémem mohou být tzv. těžké exsudáty (angl. *heavy exudates*) neboli lékařsky patologické výpotky na sítnici, které často nabývají tvarů podobných optickému disku a mohou být za OD zaměněny. Z tohoto důvodu je vhodné brát v potaz i velikost OD, která se v rámci experimentů a dohledaných informací odhadla na přibližně  $1/7$  velikosti poloměru sítnice [23].

Proces detekce začíná extrakcí zeleného kanálu původního snímku a jeho převodem na odstíny šedi. Dalším krokem je použití algoritmu CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization), který vylepšuje kontrast snímku. Funkcionalita tohoto algoritmu závisí na dvou parametrech – `clipLimit`, který nastavuje prahovou hodnotu pro omezení kontrastu, a `tileGridSize`, který se používá pro rozdělení obrazu na menší části o dané velikosti. Na základě experimentování byly za neoptimálnější hodnoty zvoleny práh na 2 a velikost oblasti na  $8 \times 8$ . Vylepšený snímek je v této chvíli připraven na samotnou detekci. Detekce spočívá ve vyhledávání oblasti o poloměru velikosti  $1/7$  poloměru sítnice s největší intenzitou v rámci vyhledávané části snímku. Na základě poznatků bylo zjištěno, že OD se většinou nachází přibližně v horizontálním středu snímku. Pro optimalizaci detekce a taktéž zamezení nesprávné detekce jsou postupně prohledávány oblasti, které při neúspěšné detekci narůstají. Konkrétně se vytvoří maska snímku ve velikostech  $1/5$ ,  $1/4$ ,  $1/3$ ,  $1/2$  a nakonec celé výšky snímku, které jsou postupně prohledávány. Zamaskované části sítnice jsou ukázány na obrázku 5.2.

Po aplikaci masky je snímek vyhlazen pomocí Gaussovského filtru o velikosti  $5 \times 5$  a dále lokalizováno okno o velikosti  $40 \times 40$  s největším kontrastem. Samotná detekce je založená na prahování, kde hodnota prahu začíná na 255 a postupně se snižuje o 2, než se dostane



Obrázek 5.2: Zamaskované oblasti používané pro detekci optického disku. Zleva se jedná o velikosti masky o  $1/5$ ,  $1/4$ ,  $1/3$ ,  $1/2$  a  $1$  násobku výšky sítnice.

na hodnotu 80. Postupné prahování je ukončeno v moment, kdy se v rámci nalezených kontur detekuje oblast o velikosti odpovídající alespoň 11 násobku poloměru sítnice, a současně bude její poloměr menší nebo roven 1,2 násobku odhadnuté velikosti poloměru OD. Z kontury, která splňuje tyto podmínky, je následně vypočten centroid, který udává souřadnice středu OD. Na základě těchto souřadnic je pak zjištěno, zda se jedná o oko levé (OD bývá v levé části snímku) nebo oko pravé (OD v pravé části). Podle pozice oka jsou pak finální horizontální souřadnice podrobeny mírné korekci v podobě posunutí o 0,4 násobek poloměru OD v kladném směru u pravého oka a o 0,4 násobek v záporném směru u oka levého. Může se stát, že OD nebude vůbec lokalizován, v tomto případě vrací funkce příznak o nenaalení. Pro vylepšení přesnosti detekce je do poslední fáze vyhodnocení přidána kontrola, která hlídá vzdálenost nalezené oblasti od oblasti s největším kontrastem, která byla dříve lokalizována. Pokud vzdálenost mezi těmito oblastmi přesahuje délku o velikosti průměru optického disku, nalezená oblast je zahozena a pokračuje se dál. Pomocí této vychytávky se přesnost detekce zvýšila přibližně o necelých pět procent.

V rámci implementace detekce optického disku byly otestovány celkem tři metody, jejichž cílem bylo zpřesnit samotnou detekci a případně identifikovat nesprávně lokalizované oblasti. První základní metoda byla založena pouze na výpočtu centroidů z nalezených kontur. Ve druhé metodě bylo navíc implementováno vyhledávání místa s nejvyšším kontrastem v rámci celého snímku, nikoli pouze v zamaskované oblasti. Finální implementace využívá hledání lokálního maxima kontrastu omezeného právě na zamaskovanou oblast, což vedlo k nejvyšší úspěšnosti správné lokalizace optického disku. Úspěšnost jednotlivých metod, testovaných na souboru 104 snímků a uvedených v pořadí výše, dosahovala přibližně

78,8 %, 81,7 % a 83,65 %. Je však důležité poznamenat, že vyšší úspěšnost nebyla způsobena pouze správnou detekcí u snímků, které předchází metody nezachytily. V některých případech novější metoda selhala tam, kde základní metoda byla úspěšná.

Přestože vybraná metoda vykazuje nejvyšší úspěšnost ze všech testovaných přístupů, její přesnost stále není dostatečná pro nasazení do vyspělých biometrických systémů. Avšak nutno podotknout, že významný podíl nesprávně detekovaných nebo zcela nedetekovaných optických disků byl způsoben přítomností rušivých vlivů, zejména výrazných světelných odrazů, které snímky výrazně degradovaly. Úpravy obrazu, například zvýšení kontrastu, vyhlazování či filtrování, by v těchto případech pravděpodobně nepomohly, ba naopak by mohly vést k dalšímu poškození obrazu a ztrátě potřebných detailů.

## Detekce fovey

Fovea má zpravidla kruhový až oválný tvar a oproti optickému disku je tím nejtmaším místem v sítnici. Jak už bylo v kapitole 4 zmíněno, poloha fovey vůči optickému disku se nachází relativně na stejném místě, přibližně na 2,5 násobku jeho šířky.

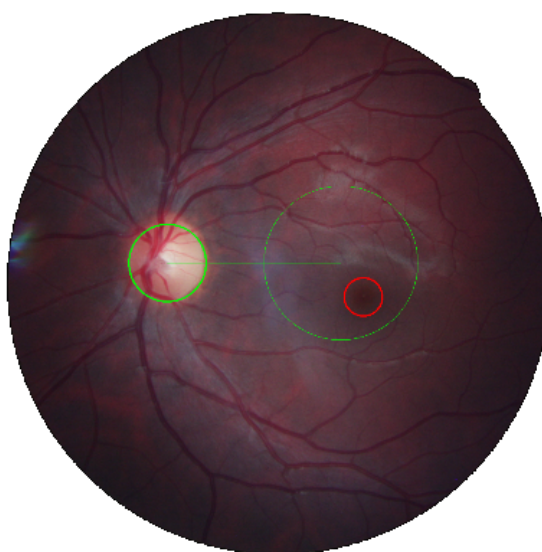
Implementace detekce vychází ze zmíněných informací, které jsou obohaceny o další metody vedoucí k lepšímu výsledku. Ze snímku je oddělen zelený kanál, převeden na odstíny šedi a podroben vylepšení kontrastu pomocí algoritmu *CLAHE* se stejnými parametry jako u OD. Následně je provedeno vyhlazení Gaussovským filtrem o velikosti  $21 \times 21$ . Další postup probíhá ve dvou variantách v závislosti na úspěšnosti detekce optického disku. V pozitivním případě detekce jsou využity informace o lokalizovaném disku k určení oblasti, ve které se fovea vyhledává. Vzdálenost středu oblasti je zvolena jako 2,25 násobek průměru OD a její průměr na dvojnásobek průměru OD. Pomocí těchto hodnot je vytvořena maska pro oblast hledání.

V druhé variantě, kdy optický disk nebyl lokalizován, se jako oblast hledání použije celá sítnice. Tato varianta však není příliš přesná, zpravidla když jsou snímky hodně tmavé, či nějaká céva má menší kontrast než samotná fovea.

Detekce fovey ve zvolené oblasti pak probíhá pomocí lokalizace nejtmaššího místa v makulární oblasti. Místo pouhého minima implementace využívá percentilovou hranici tmavosti, která se získá pomocí funkce `numpy.percentile`. Na základě experimentování vyplynulo, že optimální percentilová hodnota je 3. Tímto je u každého snímku zvolena individuální prahová hodnota, která je dále využita pro detekci. Zvolená oblast sítnice je prohledána na pixely, jichž hodnota je nižší nebo rovna hodnotě prahu (tedy jsou tmavší). Nalezené pixely pak vytváří oblast, kde se samotná fovea nachází. Pro finální detekci její přesné pozice se opět využije výpočet centroidu těchto nejtmašších pixelů.

V rámci implementace byl také otestován alternativní přístup, který vycházel z podobných principů jako metoda použitá pro detekci optického disku. Hlavním rozdílem bylo, že prahování začínalo od hodnoty 0 a postupně se zvyšovalo a taktéž nebyla vyhledávána oblast s největším kontrastem. Ostatní kroky zůstaly zachovány.

Jak již bylo zmíněno, přesnost detekce fovey výrazně klesá v případě, že není správně určena poloha optického disku. Správná detekce optického disku a fovey má zásadní vliv na funkčnost celého systému, protože obě oblasti jsou klíčové pro zarovnání a následné překrytí snímků před jejich porovnáváním. Na obrázku 5.3 je znázorněna detekce optického disku, fovey a oblast, ve které je fovea vyhledávána.



Obrázek 5.3: Snímek sítnice s detekovaným optickým diskem (menší zelený kruh), foveou (červený kruh) a oblastí, ve které je vyhledávána fovea (velký zelený kruh).

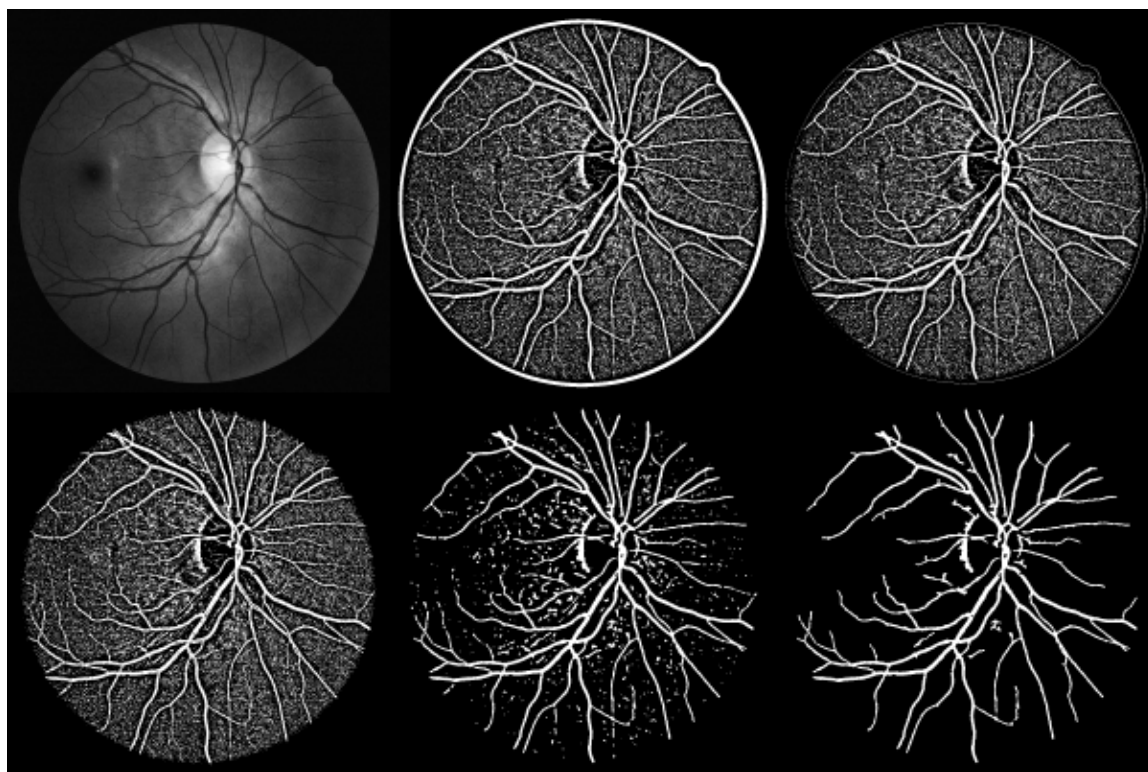
## Segmentace

Segmentace cévní struktury představuje nejdůležitější část celého systému. Přesnost a spolehlivost výsledků plně závisí na kvalitě segmentovaného obrazu. Segmentace cév patří zároveň mezi nejsložitější části implementace této bakalářské práce. Nastavení vhodných univerzálních parametrů pro dosažení co nejlepší segmentace představuje značnou výzvu, a to zejména kvůli rozdílné kvalitě snímků, jejich znečištění a přítomnosti různých rušivých faktorů. Implementovaný postup se oproti původnímu návrhu mírně liší, neboť experimentálně bylo ověřeno, že přináší přesnější výsledky. V rámci segmentace je klíčové extrahovat pouze oblasti odpovídající cévám, přičemž ideálním cílem je zachování jejich kompletního průběhu bez narušení tvaru či ztráty jemných struktur. V praxi však vzhledem ke kvalitě dostupných snímků nelze očekávat stoprocentní shodu mezi segmentovanými cévami a originální cévní sítí. Existuje řada různých přístupů k segmentaci, v rámci této práce byly vyzkoušeny dva zásadně odlišné postupy, které budou v následující části stručně shrnuty.

Finální implementací použitý postup je založen na adaptivním prahování, vyhlazování a vyhledávání a klasifikaci kontur. Proces segmentace používá jako vstup extrahovaný zelený kanál převedený do odstínů šedi. Na tento snímek je pak aplikováno vylepšení kontrastu algoritmem *CLAHE* s parametry `clipLimit = 3` a `tileGridSize = (9,9)`. Na základě poznatků při experimentování bylo zjištěno, že algoritmus s těmito hodnotami nejlépe upraví viditelnost cév ve snímku. Na takto upravený snímek zeleného kanálu je aplikováno Gaussovské adaptivní prahování, jehož výsledkem vznikne binární obraz. Tento způsob adaptivního prahování funguje na základě výpočtu individuální hodnoty prahu pro každý snímek. Vypočtená hodnota představuje vážený součet sousedních pixelů, od kterého je následně odečtena zvolená konstanta. Velikost oblasti sousedních pixelů, ze které se počítá hodnota prahu, a hodnota odečítané konstanty tvoří dva hlavní parametry adaptivního prahování. Menší oblast způsobuje vyšší citlivost na drobné detaily, zatímco větší oblast pomáhá zohlednit širší kontext snímku. Proto je třeba oblast volit tak, aby zachytila dostatek detailů, ale zároveň omezila množství rušivých prvků. Experimentováním s dostupnými snímky byly

jako optimální určeny hodnoty 4 pro konstantu a 43 pro velikost oblasti. Prahování bylo provedeno inverzně, tedy výsledný binární obraz měl bílou barvu (hodnotu 1) pro cévy či jiné výrazné prvky, zatímco pozadí zůstávalo černé.

Výsledkem adaptivního prahování je snímek, ve kterém se podél okrajů sítnice objevují nové rušivé elementy (obr. 5.4 nahoře uprostřed). Pro jejich odstranění je na snímek nejprve aplikována maska, která výrazně potlačí tento šum. Obraz však i po tomto kroku vykazuje přítomnost zřetelné hrany po obvodu sítnice (obr. 5.4 vpravo nahoře). Z toho důvodu je maska dále upravena pomocí morfologické eroze s jádrem o velikosti  $5 \times 5$ , která ji doladí tak, aby bylo možné nežádoucí artefakty účinně odstranit. Upravená maska je znovu aplikována na snímek (obr. 5.4 vlevo dole), který je následně dvakrát vyhlazen mediánovým filtrem o velikosti  $5 \times 5$  (obr. 5.4 dole uprostřed). I po tomto zpracování však v obraze zůstávají drobné rušivé prvky, které se odstraní pomocí zahazování kontur – konkrétně jejich zabarvením na černou. Zahazování kontury se provede pouze v případě, kdy její plocha je menší než 200 pixelů. Výsledný stav snímku s odstraněnými konturami je zobrazen na obr. 5.4 vpravo dole.



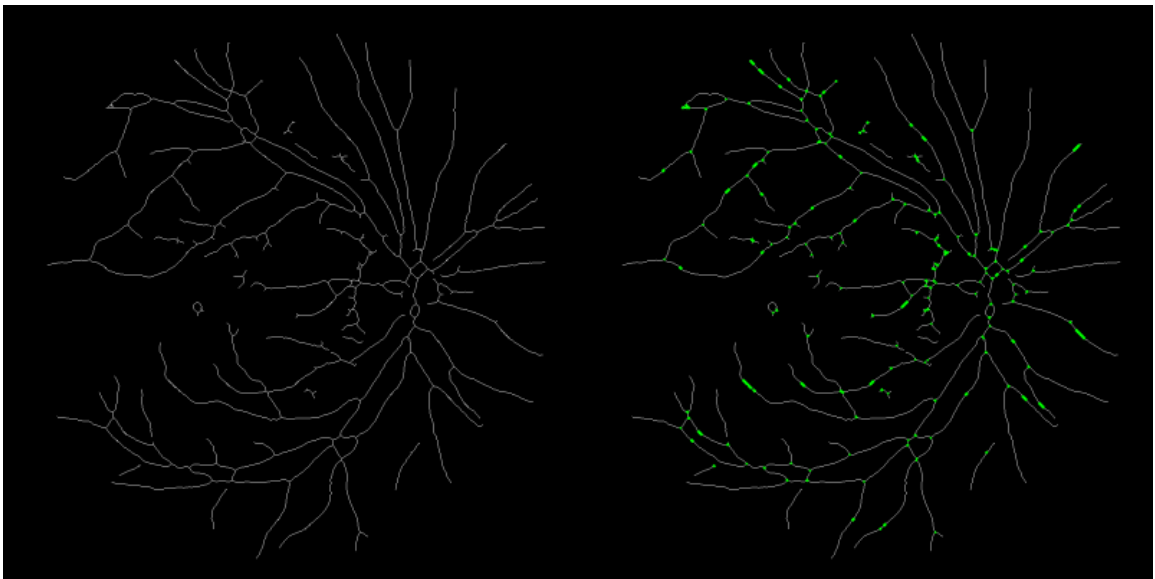
Obrázek 5.4: Jednotlivé kroky segmentace. Snímky postupně zleva shora: zelený kanál, prahování, aplikace první masky, aplikace erodované masky, vyhlazování, odstranění kontur.

Tento upravený snímek by měl být zbaven téměř všech rušivých elementů a šumivých oblastí, čímž je připraven pro extrakci příznaků. Dalším krokem je aplikace procesu skeletonizace (ztenčování), který zajišťuje, že tloušťka všech cév bude omezena na jeden pixel. Operace, jako je vyhlazování a skeletonizace, často negativně ovlivňují kontinuitu průběhu cév, a proto je nutné se pokusit o jejich následné vyplnění, aby nedošlo k úplnému zahazení relevantní informace. Zaplnění přerušovaných cév je realizováno ve dvou fázích pomocí postupu založeného na morfologickém uzavírání. V první fázi je na původní ztenčený obraz

aplikováno morfologické uzavírání s lineárním jádrem o rozměrech  $1 \times 10$  pixelů. Tento proces zahrnuje nejprve dilataci (rozšíření světlých oblastí) a následnou erozi (zúžení světlých oblastí), což napomáhá překlenout drobné mezery v cévách orientovaných vodorovně. Ve druhé fázi je provedeno morfologické uzavírání i pro cévy orientované v jiných směrech. Ztenčeným snímkem se postupně rotuje po krocích o velikosti  $15^\circ$  (v rozsahu  $15^\circ$  až  $345^\circ$ ), přičemž po každé rotaci se znovu provede morfologické uzavírání stejným lineárním jádrem. Výsledek se následně zpětně otočí do původní orientace. Takto získané výsledky z různých rotací se nakonec sloučí pomocí funkce `numpy.maximum`, čímž se zachová maximum z každé orientace a efektivně se zaplní přerušené cévy bez ohledu na jejich směr. Tento postup byl inspirován na základě existujícího řešení na serveru *GitHub* [20].

Druhý vyzkoušený přístup k zaplnění přerušovaných cév spočívá v použití morfologického uzavírání s eliptickým jádrem o velikosti  $5 \times 5$  pixelů. Tento postup využívá taktéž operaci morfologického uzavírání, která nejprve rozšíří světlé oblasti pomocí dilatace a následně je zúží erozí. Výsledkem je vyplnění malých mezer a děr uvnitř cév bez výrazného ovlivnění jejich původního tvaru. Na rozdíl od přístupu s lineárním jádrem a rotací, který se snaží cíleně spojovat cévy v různých směrových orientacích, eliptické jádro vyplňuje mezery plošně, bez ohledu na směr struktury. Tento způsob je výpočetně méně náročný a rychlejší, avšak nemusí být tak účinný při opravě tenkých a podlouhlých přerušení, kde orientované morfologické operace dosahují lepších výsledků. Z těchto důvodů byl v implementaci zvolen první přístup.

V aktuální podobě snímků cévy již opět nemají jednotnou šířku, a proto je před samotnou extrakcí příznaků nezbytné provést skeletonizaci. Tento krok je realizován pomocí funkce `ximgproc.thinning` z knihovny *OpenCV*, přičemž je využito ztenčování typu `THINNING_GUOALL`. Další alternativu nabízí knihovna *scikit-image*, ve které je pro skeletonizaci implementována funkce `skeletonize`. Finální podoba ztenčeného snímku je zobrazena na obrázku 5.5 vlevo.



Obrázek 5.5: Skeletonizovaný snímek (vlevo), detekované body příznaků (vpravo).

Druhou vyzkoušenou alternativou s vysokým potenciálem byla neuronová síť U-Net. Implementaci této sítě jsem sám neprováděl. Využil jsem existující jednoduché řešení dostupné na serveru *GitHub*, které jsem otestoval. Na vlastním zařízení jsem provedl trénování s vyu-

žitím snímků z databáze *DRIVE* a následně ověřil segmentaci na jiných snímcích. Výsledky segmentace pomocí U-Netu byly v mnoha případech velice uspokojivé a často dosahovaly lepší kvality než výsledky mé vlastní implementace, přesto však nebyly zcela bezchybné — zejména u drobných cév se stále vyskytovaly obdobné s přerušením průběhu cév. Využití U-Net neuronové sítě proto považuji za perspektivní směr, který by mohl v budoucnu výrazně přispět ke zlepšení kvality celého systému.

## Extrakce klíčových bodů

Extrakce příznaků je relativně triviální část. Vstupem je skeletonizovaný segmentovaný binární snímek, kde pixel o hodnotě 1 značí cévu a ostatní pixely s hodnotou 0 značí pozadí. V rámci implementace byly vyzkoušeny dva alternativní přístupy detekce bodů, přičemž jejich přesnost je dostatečně vysoká.

Finální implementovaný postup detekuje body křížení, bifurkací i body koncové a extrahuje jejich souřadnice, které postupně ukládá do pole. Implementace tohoto postupu zcela vychází z návrhu. Jedná se o metodu průsečíků (anglicky *crossing number* – *CN*), jejíž princip je vysvětlen v kapitole 4. Pro detekci klíčových bodů je použita matice 8 sousedů, která má velikost  $3 \times 3$  a vypadá následovně:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Pomocí konvoluce se prochází celý obraz a pro každý pixel se na základě jeho sousedních pixelů vypočítává hodnota *cn* (crossing number). Po aplikaci konvoluce se pole těchto čísel vynásobí původním obrazem, čímž se zajistí, že se budou zohledňovat pouze světlé pixely (tedy pixely se cévami). Tímto způsobem se získají relevantní hodnoty pro detekci koncových bodů, bifurkací a křížení cév. Koncové body jsou identifikovány jako pixely, u kterých je vypočtená hodnota rovna 1. Bifurkace či místa křížení cév jsou určeny na základě vypočtené hodnoty větší nebo rovné 3. Detekovaná místa příznaků jsou zvýrazněna zeleně a zobrazena na obrázku 5.5 vpravo.

Druhým vyzkoušeným přístupem byla detekce bifurkací cév pomocí pěti morfologických jader o velikosti  $3 \times 3$ , přičemž každé jádro reprezentovalo možné konfigurace větvení cév. Tento přístup se zaměřuje na detekci bifurkací, nikoli na detekci koncových bodů, jak tomu bylo v předchozím postupu. Příklady pěti jader, která byla použita, jsou znázorněna ve vzorci 5.2.

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ K_1 & K_2 & K_3 & K_4 & K_5 \end{matrix} \quad (5.2)$$

Pro zajištění pokrytí všech možných orientací větvení cév bylo každé z těchto jader aplikováno nejprve ve své původní podobě a následně bylo rotováno o  $90^\circ$ . Tímto způsobem vznikly čtyři verze každého jádra, které byly použity k filtrování obrazu. Filtrace byla provedena pomocí operace, která aplikovala jednotlivá jádra na obraz. Vzniklé hodnoty byly zkoumány a bod, který měl hodnotu 4, byl vyhodnocen jako bifurkační bod. Tato metoda není stoprocentně dokonalá, pro vyšší přesnost je potřeba vytvořit jader více, jelikož větvení se může objevovat i v dalších atypických podobách.

## 5.5 Registrační modul

Registrační modul slouží pro uložení extrahovaných dat z poskytnutého snímku v jednotné formě dané šablonou do databáze. V rámci této implementace je za databázi považován adresář, který si uživatel pomocí zadaných parametrů zvolí. Registrační, tak i verifikační a identifikační modul používají stejné jádro, jímž je volání operací od předzpracování až po samotnou extrakci příznaků. Následující operace už se liší v závislosti na vybraném úkonu. Pro registraci je kromě vstupního snímku vyžadována i identita uživatele, pod kterou chce sítnici do systému zaregistrovat. Identita se do systému zadává ve formátu `Jméno-Příjmení-ID`, případně `Jméno-Jméno-Příjmení-ID`. Z informací získaných ze snímku jsou do databáze ukládány následující: souřadnice optického disku ve tvaru  $(x,y)$ , souřadnice fovey ve tvaru  $(x,y)$ , souřadnice středu sítnice ve tvaru  $(x,y)$ , poloměr sítnice a v poslední řadě *numpy* pole s příznaky. Všechna tato data jsou pak uložena pomocí funkce `numpy.savez` do příslušné databáze pod názvem ve tvaru `identita_oko_cislo.npz`, kde `identita` je identita uživatele ve výše zmíněném formátu, `oko` znamená pozici a může nabývat pouze hodnot `left`, `right` a `None` (neurčené oko), a `cislo` je identifikační číslo vytvořené z důvodu možnosti uložit více snímků stejného oka pod stejnou identitou. Výsledný soubor má následující strukturu:

- `center.npy`
- `features.npy`
- `fovea_center.npy`
- `od_center.npy`
- `radius.npy`

## 5.6 Verifikační a identifikační modul

Identifikační a verifikační modul jsou implementovány téměř totožným způsobem s jediným rozdílem ve výsledku. Identifikační modul nepřijímá informaci o identitě uživatele, nýbrž jeho úkolem je tuto identitu na základě poskytnutého snímku zjistit. Verifikační modul naopak vyžaduje, aby uživatel zadal svou identitu (ve stejném formátu jako u modulu registračního). Na základě poskytnuté identity jsou v databázi vyhledány záznamy o této identitě, které jsou porovnány s daty získanými z poskytnutého snímku. Na rozdíl od registračního modulu tyto dva moduly databázi pouze prohledávají, nikoliv do ní zapisují.

Funkcionální základ je stejný jako u registrace. Nejprve proběhne předzpracování snímku, dále už jsou získávána data z jednotlivých operací zpracování snímku a segmentace. Následující postup je již závislý na vybrané operaci.

### Verifikace

Při procesu verifikace je zvolený databázový adresář prohledáván na záznamy odpovídající dané identitě. Na základě informace o pozici oka získané z poskytnutého snímku se vytvoří tzv. *pattern*, podle kterého je záznam vyhledáván. Příklad takového *patternu* může být např. `josef-novak-550078_left_*`, kde hvězdička označuje libovolné pokračování řetězce. Pokud se lokalizaci oka nepodaří provést, vyhledávací *pattern* se zjednoduší na `josef-novak-550078_*`. V případě, že nebyl nalezen žádný záznam a zároveň nebyla detekována pozice oka, je program ukončen s informací, že požadovaná identita v databázi

neexistuje. Pokud nebyl nalezen záznam, ale lokalizace oka proběhla úspěšně, je databáze následně prohledána ještě jednou bez ohledu na pozici oka. Pokud ani poté není nalezen žádný odpovídající záznam, je proces opět přerušen. Ve všech ostatních případech, kdy je nalezen odpovídající záznam podle identity a současně i pozice oka, proběhne samotné porovnání. Výsledkem je skóre podobnosti, na jehož základě se vzhledem k nastavenému prahu rozhodne o úspěšnosti verifikace.

## Identifikace

Při identifikaci je databázový adresář prohledáván na všechny záznamy odpovídající stejné pozici oka. Pokud se pozice oka nepodaří detekovat, jsou prohledávány všechny záznamy bez ohledu na pozici. Vyhledávání probíhá opět pomocí patternů, které mají v tomto případě podobu `*_left_*`, `*_right_*` nebo `*_None_*` v případě, kdy pozice byla detekována, ale v databázi neexistují žádné snímky se stejnou pozicí oka. Všechny nalezené snímky jsou následně porovnány a ohodnoceny skórem podobnosti. Výsledkem identifikace je identita osoby s nejvyšší dosaženou mírou podobnosti, přičemž tato míra musí zároveň překročit předem stanovený práh. V rámci této implementace jsou navíc zobrazeny všechny identity, jejichž skóre překračuje stanovený práh.

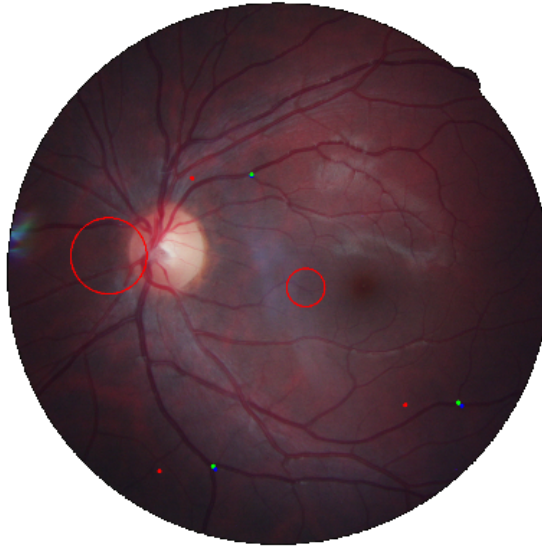
## Porovnávání

Porovnání je po segmentaci druhou nejdůležitější operací celého systému. Aby bylo možné snímky vůbec porovnat, je nejprve nutné zajistit jejich zarovnání a následné překrytí. V této implementaci však nejde o přímé zarovnání celých snímků, ale pouze extrahovaných příznaků. Systém pro zarovnání využívá dva dříve detekované body — optický disk a foveu. Pokud se nepodaří správně detekovat optický disk nebo foveu, výrazně klesá šance na úspěšné porovnání, neboť použité algoritmy jsou závislé na co nejpřesnějším překrytí těchto bodů. V případě, že optický disk není nalezen, je uživatel upozorněn na zvýšenou pravděpodobnost nepřesného výsledku způsobeného nemožností správného překrytí.

Jak již bylo uvedeno, pro zarovnání a překrytí snímků slouží dvě dvojice souřadnic — jedna z uživatelem poskytnutého snímku a druhá z databázového snímku. Tyto dvojice obsahují souřadnice optického disku (OD) a fovey. Výchozím snímkem, vůči kterému se zarovnání provádí, je snímek od uživatele. V každém snímku je nejprve vypočítán vektor vedoucí od optického disku k fovee. Pomocí těchto vektorů je následně spočítán úhel mezi snímky, tedy úhel, o který je nutné databázový snímek otočit, aby odpovídal orientaci uživatelského snímku. Databázový snímek je nejprve přepočítán do lokálního souřadného systému tak, že všechny souřadnice jsou vyjádřeny relativně k pozici jeho optického disku. Poté je na všechny body aplikována rotace o vypočtený úhel a následně jsou transformované souřadnice přepočítány zpět do souřadného systému uživatelského snímku, aby došlo k zarovnání. V závěrečné fázi jsou z výsledné množiny bodů odstraněny ty, které leží mimo oblast zájmu — tedy mimo oblast sítnice uživatelského snímku. To je provedeno tak, že se pro každý bod spočítá jeho vzdálenost od středu sítnice a body nacházející se za hranicí definovanou poloměrem sítnice jsou vyřazeny. Funkce následně vrací pouze ty body, které spadají do oblasti překrytí.

V aktuální situaci jsou k dispozici dvě sady příznaků zarovnaných přes sebe. Na obrázku 5.6 je zobrazeno pár vybraných bodů ze dvou různých snímků stejného oka. Zeleně jsou zobrazeny body výchozího snímku, červeně původní body druhého snímku a modře zarovnané body z druhého snímku do souřadnic výchozího. Dvě červené kružnice vyznačují pozici OD a fovey v druhém snímku. V tomto konkrétním případě byl vypočten úhel rotace o velikosti

0,71 stupňů a posunutí bylo o 102 pixelů ve vertikálním směru a -5 pixelů v horizontálním směru.



Obrázek 5.6: Zarovnání a překrytí bodů, zelené (výchozí), červené (původní před zarovnáním), modré (po zarovnání).

Samotné porovnání je implementováno pomocí dvou vzdáleností – Euklidovské a Manhattanské. Obě tyto vzdálenosti se vyznačují nutností co nejpřesnějšího překryvu pro svou správnou funkcionalitu.

Euklidovská vzdálenost je metrika daná vztahem:

$$d_E(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2} \quad (5.3)$$

kde  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)$  a  $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_n)$  jsou body v  $n$ -rozměrném prostoru. Pro výpočet podobnosti dvou množin příznaků je každý bod z první množiny porovnáván se všemi body ve druhé množině. Pro každý bod se spočítá jeho euklidovská vzdálenost ke všem bodům druhé množiny a vyhledá se nejbližší bod. Pokud je tato minimální vzdálenost menší než zvolený práh, považuje se bod za shodný. Jelikož zarovnání nemusí být vždy zcela přesné a sítnice může mít lehce změněné měřítko, je hodnota prahu zvolena na 20, což se může jevit jako dosti vysoká hodnota, avšak stoprocentní přesnost detekce optického disku a fovey taktéž není zaručena a je ji třeba vykompenzovat zvýšením těchto parametrů. Počet všech shod je zaznamenáván a následně se vypočítá podobnost jako podíl počtu shod a celkového počtu bodů v menší z obou množin. Výsledkem je hodnota podobnosti v intervalu od 0 do 1, kde vyšší hodnota značí vyšší míru shody mezi oběma množinami příznaků.

Manhattanská vzdálenost je daná vztahem:

$$d_M(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n |q_i - p_i| \quad (5.4)$$

kde  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)$  a  $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_n)$  jsou body v  $n$ -rozměrném prostoru. Výpočet podobnosti mezi dvěma množinami příznaků probíhá tak, že pro každý bod z první množiny se

spočítají Manhattanovy vzdálenosti ke všem bodům z druhé množiny. U každého bodu se hledá jeho nejbližší soused na základě minimální hodnoty této vzdálenosti. Pokud je nalezená minimální vzdálenost menší než zadaný práh (threshold), bod je považován za shodný. Celková podobnost je poté určena jako poměr počtu nalezených shod k počtu bodů v menší ze dvou množin. Výsledná hodnota opět leží v intervalu od 0 do 1, kde vyšší hodnota značí vyšší stupeň shody mezi dvěma sadami příznaků.

## Kapitola 6

# Testování a návrh vylepšení

Testování programu je nedílnou součástí ověření správné funkcionality celého systému. Pokud by některá základní operace, například v rámci předzpracování, nefungovala správně, byl by tím přímo ovlivněn výsledek celého systému — bez ohledu na kvalitu ostatních částí implementace by celková funkčnost byla na velmi nízké úrovni.

V rámci experimentování s různými přístupy k jednotlivým operacím byly tyto varianty průběžně testovány na sadě přibližně 104 snímků. Testy probíhaly manuálně formou vykreslení snímků po provedení příslušné operace. Jednotlivé části systému byly testovány samostatně, nezávisle na výsledcích jiných operací, aby bylo možné získat objektivní hodnocení jejich funkce.

Tato kapitola se nejprve věnuje testování jednotlivých součástí systému izolovaně, a následně testování systému jako celku. Výsledky jednotkového testování jednotlivých operací umožňují lépe pochopit celkovou přesnost a robustnost implementovaného řešení.

Veškeré testy byly prováděny manuálně, především prostřednictvím vizuální kontroly aktuální podoby snímků a dalších generovaných dat. Závěrečná část kapitoly se zabývá návrhy možných vylepšení a shrnutím schopností implementovaného systému plnit požadované funkce.

### 6.1 Testování operací

U mnoha operací prováděných v rámci systému je prakticky nemožné provést plnohodnotné testování, jelikož často slouží pouze k vytvoření meziproduktů, které jsou dále zpracovávány dalšími kroky. Vyhodnocení kvality těchto meziproduktů je z lidského hlediska obtížné a jejich klasifikace jako „vyhovující“ či „nevyhovující“ není triviální.

Další skupinu operací, které nebyly samostatně testovány, tvoří standardní zpracování obrazu, jako je například oddělení zeleného kanálu, převod do odstínů šedi nebo běžné matematické výpočty. Tyto operace jsou již dostatečně prověřené běžnou praxí.

Naopak mezi operace, které byly podrobeny testování, patří ořez, detekce oblasti sítnice včetně výpočtu středu a poloměru, detekce optického disku a fovey. Operace jako segmentace, vyplnění děr a detekce příznaků jsou vzhledem k jejich povaze obtížné kvantitativně vyhodnotit, proto je jejich funkčnost popsána slovním komentářem, který shrnuje pozorované výsledky a případné nedostatky.

Následující tabulka 6.1 shrnuje procentuální úspěšnost jednotlivých testovaných operací, vyjádřenou jako poměr snímků označených jako vyhovující vůči celkovému počtu testovaných snímků. Testování bylo provedeno na sadě 104 snímků.

Tabulka 6.1: Úspěšnost jednotlivých operací na testovací sadě 104 snímků.

Testovaná operace	Správné	Chybné	Úspěšnost (%)
Detekce oblasti sítnice a ořez snímku	104	0	100
Výpočet středu a poloměru sítnice	102	2	98,07
Detekce optického disku	87	17	83,65
Detekce fovey	92	12	88,46

Velký podíl chybně detekovaných nebo vůbec nedetekovaných optických disků byl způsoben rušivými odlesky světla, které výrazně znehodnotily některé snímky a vytvořily tak velmi neoptimální podmínky pro detekci. Stejný problém se vyskytoval také při detekci fovey. Část snímků navíc trpěla extrémně nízkou kvalitou obrazu — buď byly příliš tmavé, nebo naopak obsahovaly silné odlesky, což vedlo k tomu, že struktury nezbytné pro detekci nebyly ani běžným okem jednoznačně identifikovatelné.

Segmentace cév představuje nejkompexnější operaci z hlediska vyhodnocení její úspěšnosti. Při segmentaci je klíčové nalézt optimální nastavení jednotlivých parametrů tak, aby byly zachovány potřebné detaily cévního řečiště, a zároveň aby byly eliminovány oblasti obsahující rušivé elementy. Parametry použité v rámci implementace vedou ke slušným výsledkům, avšak s určitými omezeními — jemné cévy často nejsou segmentovány dostatečně přesně, průběh cév může být narušen v oblastech s výrazně proměnlivým kontrastem a občas dochází k nesprávné segmentaci tmavších míst, která jsou mylně interpretována jako cévy. Výsledné segmentované snímky tak někdy obsahují nežádoucí artefakty připomínající cévy. Přes tyto nedostatky však většina hlavních cév bývá zachycena v přiměřené kvalitě a rozsahu. Nepřesnosti ve výsledné segmentaci mírně ovlivňují celkovou přesnost systému, nicméně implementované řešení dosahuje solidní úrovně výkonu vzhledem k náročnosti segmentace sítnicových snímků. Kvalitnější implementace procesu segmentace jistě povede k výraznému zvýšení přesnosti celého systému.

Vyplnění děr představuje klíčovou operaci, která významně přispívá ke zkvalitnění výsledků následných procesů, jako je například detekce příznaků. Účinnost implementované metody závisí zejména na šířce jednotlivých děr. Parametry byly nastaveny tak, aby spolehlivě vyplnily menší otvory, což přispívá k zachování spojitosti cév. Segmentované snímky však často obsahují i podstatně větší díry, jejichž přítomnost výrazně narušuje kontinuitu cévního průběhu. Navýšení parametrů výplňové operace by sice umožnilo zacelit i větší mezery, avšak zároveň by vedlo k nežádoucímu spojování blízkých, avšak nesouvisejících objektů. Implementované řešení tedy efektivně vyplňuje menší otvory, zatímco v případě větších defektů jeho účinnost klesá.

Detekce příznaků založená na metodě průsečíků vykazuje velmi dobré výsledky. Testování probíhalo za příznivých podmínek díky využití manuálně segmentovaných cév z databáze *DRIVE*. Výsledky ukazují, že detekce na těchto referenčních datech dosahuje vysoké přesnosti. Lze tedy předpokládat, že na kvalitně segmentovaných snímcích, které neobsahují rušivé prvky ani výrazné chyby segmentace, bude spolehlivost této metody rovněž vysoká. V případě, že snímky obsahují rušivé elementy, mohou být detekovány i další body, které ve skutečnosti nejsou místem příznaků. Tento problém však nevychází z chyby v samotné detekci příznaků, nýbrž z nedostatků v předchozí fázi segmentace, která poskytla nepřesná vstupní data.

I přes identifikované nedostatky v některých dílčích operacích, zejména v oblasti segmentace menších cév a vyplňování větších defektů, vykazuje implementovaný systém jako celek

solidní úroveň funkčnosti. Detekce příznaků na kvalitně segmentovaných snímcích dosahuje vysoké přesnosti, což potvrzuje vhodnost zvolených metod pro danou úlohu.

Zjištěné slabiny jednotlivých kroků poukazují na konkrétní oblasti, kde by budoucí práce mohla vést ke zvýšení přesnosti a robustnosti celého systému. Celkově lze říci, že implementace splňuje požadované cíle, přičemž většina operací vykazuje dostatečnou spolehlivost pro praktické použití.

## 6.2 Testování celkové funkcionality

Pro testování celého systému bylo využito několik sad snímků sítnice. Každá sada obvykle obsahovala snímky obou očí jedné osoby, přičemž pro každé oko byly pořízeny přibližně tři snímky. Z hlediska zajištění spolehlivosti výsledků byly tyto sady následně filtrovány tak, aby obsahovaly pouze snímky s dostatečnou kvalitou pro odpovídající zpracování. Ze souboru byly odstraněny pouze snímky s extrémními vadami, jako je výrazné světelné znečištění, vážné zkeslení kontrastu nebo jiné výrazné defekty, které by mohly zásadně ovlivnit detekci a následné operace. Mírné vady snímků, jako například mírné rozmazání nebo lokální ztráta kontrastu, byly naopak ponechány, aby bylo možné ověřit i robustnost systému při běžně se vyskytujících problémech.

Testování tedy probíhalo na datech odpovídajících reálným podmínkám, přičemž byly prováděny jak porovnání snímků od stejné osoby, tak i mezi různými osobami. Tím bylo možné hodnotit nejen schopnost systému spolehlivě identifikovat shody, ale také jeho odolnost vůči nesprávnému přiřazení snímků cizích osob. Výsledky tak odrážejí nejen přesnost a spolehlivost implementovaného systému za optimálních podmínek, ale i jeho schopnost zvládat běžné odchylky kvality vstupních dat.

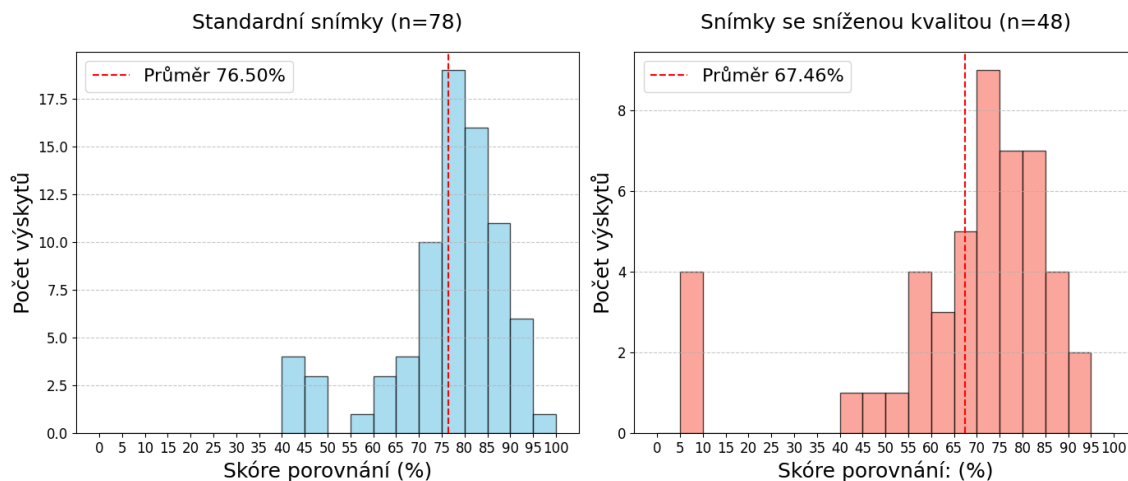
### Testování verifikace

Testování verifikace probíhalo na celkem deseti sadách snímků. Každá sada obsahovala přibližně 6 až 7 snímků sítnice od jedné osoby, typicky ve složení 3 až 4 snímky pravého oka a 3 snímky levého oka. Snímky bývaly většinou mírně transformovány (posunuty či rotovány), což výrazně přispělo k testování robustnosti systému. Sedm sad obsahovalo snímky standardní až vyšší kvality, s minimálním výskytem rušivých elementů. Zbylé tři sady byly zvoleny tak, aby obsahovaly výraznější nedostatky — například rozsáhlé tmavé oblasti, světelné odlesky nebo další rušivé jevy, které mohly významně ovlivnit výsledky.

Testování spolehlivosti verifikace probíhalo tak, že pro každou sadu byl nejprve jeden snímek jednoho oka zaregistrován a následně byl porovnáván s ostatními dvěma (výjimečně třemi) snímky ze stejné sady. Tímto způsobem byly otestovány všechny možné kombinace snímků obou očí v rámci každé sady.

Konkrétní výsledky testování jednotlivých sad při použití euklidovské vzdálenosti jsou uvedeny v příloze A. Nezapočítáme-li případy, kdy byl porovnáván snímek sám se sebou (v tabulce označeno jako 100 %), pak skóre verifikace pro kvalitnější snímky v prvních sedmi sadách (celkem 78 hodnot) dosahovalo nejčastěji rozmezí 75–80 %, přičemž průměr činil 76,5 %. U méně kvalitních sad (48 hodnot) bylo nejčastější skóre v rozmezí 70–75 % a průměr činil přibližně 67,46 %. Rozložení hodnot je přehledně znázorněno v histogramech na obrázku 6.1.

Z výsledků testování lze pozorovat, že skóre při porovnání snímků není vzájemně symetrické — tedy hodnota porovnání snímku A vůči B se zpravidla liší od hodnoty porovnání B vůči A. Tato asymetrie je způsobena způsobem implementace samotné porovnávací ope-



Obrázek 6.1: Histogram zastoupení výsledků verifikačního skóre. Kvalitnější snímky (vlevo), snímky s nižší kvalitou (vpravo).

race, konkrétně části zajišťující překryv snímků. Překryv je vždy orientován vůči uživatelsky zadanému výchozímu snímku, přičemž ostatní snímky z databáze jsou transformovány tak, aby se co nejvíce překrývaly právě s tímto snímkem. Dalším faktorem je i výpočet euklidovské (či Manhattanské) vzdálenosti, která je rovněž prováděna jednostranně. Potenciální rozšíření systému o vzájemné porovnání ve směru opačném, a následné vyhodnocení vyšší dosažené hodnoty, by mohlo vést ke zvýšení přesnosti a celkové kvality systému.

Na základě provedeného testování byla stanovena prahová hodnota pro potvrzení identity na 70 %. Tato hodnota představuje kompromis mezi dostatečně vysokou přesností a tolerancí k menším odchylkám způsobeným například nepřesným překrytím obou sad příznaků. V závislosti na kvalitě vstupních snímků je možné uvažovat o navýšení této hodnoty, avšak s ohledem na aktuální kvalitu segmentace není doporučeno překračovat hranici 80 %. Stávající implementace segmentace totiž není zcela bezchybná — v některých případech může docházet ke ztrátě relevantních struktur nebo naopak k nesprávnému zařazení nerelevantních částí jako cévních oblastí.

Při takto zvolené prahové hodnotě systém správně rozpozná uživatele s pravděpodobností 80,77 % u snímků standardní kvality a 60,42 % u snímků obsahujících nedokonalosti. Celková úspěšnost rozpoznání tak činí 73,02 %, což naznačuje solidní funkčnost systému, přičemž kvalita vstupního obrazu má výrazný vliv na výsledek.

## Testování identifikace

Systém v identifikačním módu byl testován na stejných deseti sadách snímků, které byly použity u testování verifikace. Z každé sady byly zaregistrovány dva až tři snímky pravého oka a dva snímky levého oka, a následně započala samotná identifikace. Systém byl postupně spouštěn se vstupními snímky, které v dané sadě ještě nebyly využity, tedy nebyly součástí databáze, ale náležely stejné osobě.

Po každém spuštění byly analyzovány výstupy, které systém vygeneroval. Výsledkem identifikace je seřazený seznam nejpodobnějších nalezených vzorů spolu s procentuálním skóre podobnosti a identitou nalezené osoby. Výstupy byly generovány zvlášť pro Euklidovskou i Manhattanskou metriku. Ukázkové výsledky na obrázku 6.2 pro snímek osoby

john-doe-1123 ukazují, že identita byla úspěšně rozpoznána na prvních pozicích v obou metrikách s vysokým skóre podobnosti.

Tato metoda testování umožňuje ověřit, zda systém správně přiřazuje neznámý snímek k existujícím identitám v databázi a jak kvalitně rozlišuje mezi jednotlivými uživateli. Zároveň ukazuje i míru podobnosti k ostatním osobám v databázi, což je důležité pro detekci potenciálních chyb nebo nejednoznačností.

```
Top Euclidean matches:
 92.08%: john-doe-1123
 79.49%: john-doe-1123
 60.75%: peter-fox-1115
 55.72%: peter-fox-1115
Top Manhattan matches:
 85.42%: john-doe-1123
 71.86%: john-doe-1123
 47.20%: peter-fox-1115
 46.38%: peter-fox-1115
```

Obrázek 6.2: Ukázkový výstup testování identifikace v konzoli.

Celkem bylo porovnáno 19 očí, přičemž u 15 z nich systém úspěšně identifikoval správnou identitu jako jedinou, která dosáhla skóre převyšující stanovenou prahovou hodnotu 70 %. U zbývajících čtyř případů se vyskytly různé odchylky a chyby v rozpoznání. Například u sady 1105 sice levé oko dosáhlo skóre nad 70 %, avšak systém přiřadil snímek celkem ke šesti identitám překračujícím tuto hranici, přičemž správná identita se umístila až na třetím a šestém místě. Systém tak přiřadil vstupní snímek jiné osobě. Tento výsledek odpovídal skóre založenému na euklidovské vzdálenosti, při použití Manhattanské vzdálenosti byla hledaná identita sice na prvním a druhém místě, nicméně dosažené hodnoty podobnosti činily pouze 67,84 % a 66,50 %, tedy pod stanoveným prahem.

Obdobná situace nastala také u sady 1133, kde pravé oko vykazovalo zcela totožný výsledek. U levého oka ze sady 1150 byla sice správná identita vyhodnocena jako nejpravděpodobnější, a to s vysokými hodnotami 90,72 % a 82,11 %, avšak nad stanovený práh se zároveň dostaly i dvě další identity, což snižuje jednoznačnost rozhodnutí.

Z uvedených výsledků vyplývá, že systém dosahuje poměrně vysoké spolehlivosti při identifikaci na základě kvalitních a dobře segmentovaných snímků. Ve většině případů je správná identita určena jako jediná nadprahová, a to s pravděpodobností 78,95 %. V případech chybného nebo nejednoznačného přiřazení je hlavní příčinou zhoršená kvalita segmentace, která nedokáže vytvořit dostatečně přesný obraz cévní struktury. To následně negativně ovlivňuje jak samotnou extrakci příznaků, tak i jejich porovnání. Výsledkem může být buď snížení skóre správné identity pod rozhodovací práh, nebo naopak zvýšení skóre jiných, nesouvisejících identit nad tuto mez. K dosažení konzistentnějších výsledků by proto bylo vhodné dále optimalizovat segmentační proces, případně rozšířit metodu porovnání o další podpůrné metriky nebo víceúrovňové rozhodování.

### 6.3 Souhrn možných vylepšení

Ačkoli byly v rámci vývoje systému zvoleny přístupy, které dosahovaly nejlepších výsledků z vyzkoušených možností, neznamená to nutně, že tyto postupy představují nevhodnější

nebo konečná řešení. V oblasti předzpracování snímků se ukázaly implementované metody jako spolehlivé a stabilní, proto se zatím nejeví jako nezbytné hledat jejich alternativy. Vhodnější bude zaměřit další vývoj na části systému, které vykazují nižší spolehlivost a mají výraznější vliv na celkové výsledky.

Nejvýraznější slabinou systému je segmentace cévní struktury sítnice, která zásadním způsobem ovlivňuje následné operace a tím i konečné skóre verifikace nebo identifikace. Potenciálně zásadním vylepšením by mohla být implementace segmentační neuronové sítě typu U-Net, která se pro tuto úlohu jeví jako velmi efektivní a zároveň je pro ni i široce uznávaná. Tato metoda ovšem vyžaduje značné výpočetní zdroje, především během procesu trénování, což může překročit možnosti běžného osobního počítače. Výhodou je dostupnost veřejných databází, jako například *DRIVE*, které obsahují kvalitní anotovaná data vhodná pro trénování podobných modelů.

V oblasti detekce optického disku (OD) by bylo vhodné rozšířit stávající metodu o validaci tvaru lokalizovaného objektu, např. ověřením jeho kruhovitosti či elipticity, což by mohlo výrazně snížit výskyt falešných detekcí. Podobně i detekce fovey by si zasloužila vylepšení. Současná metoda poskytuje uspokojivé výsledky, ale je silně závislá na úspěšné detekci OD. Do budoucna by bylo užitečné prozkoumat přístupy nezávislé na lokalizaci OD, případně tyto metody kombinovat a pomocí vhodné klasifikace rozhodnout, který výsledek je relevantní.

Fáze porovnávání by se mohla obohatit o nové metriky, které nejsou striktně závislé na perfektním geometrickém překrytí porovnávaných snímků. Takové metody by mohly lépe reflektovat podobnost i v případě mírně neodpovídajícího zarovnání a překrytí. Kromě toho by stálo za úvahu zavést obousměrné porovnávání – tedy provést překrytí snímku A na snímek B i naopak, a výsledky porovnání následně vyhodnotit podle vyšší dosažené hodnoty podobnosti. Obdobně by bylo vhodné rozšířit výpočet podobnosti samotných příznaků tak, aby zahrnoval nejen porovnání bodů A vůči bodům B, ale i v opačném směru – tím by bylo možné dosáhnout symetričtějšího a spolehlivějšího vyhodnocení.

Závěrem je vhodné zdůraznit, že současná implementace představuje funkční prototyp, který může sloužit jako kvalitní výchozí bod pro další vývoj spolehlivějšího a přesnějšího systému. Tato práce zároveň poskytuje přehled dostupných přístupů a technik, které se v oblasti zpracování a porovnávání sítnicových snímků dají použít. Mnohé z těchto metod mohou být dále optimalizovány, rozšířeny či zcela nahrazeny pokročilejšími přístupy. Výsledky a zkušenosti získané během vývoje mohou posloužit jako cenná zpětná vazba pro budoucí implementace – jak z hlediska volby vhodných algoritmů, tak i při rozhodování, na jaké části systému zaměřit pozornost a kde má vylepšení největší dopad na celkovou výkonnost.

# Kapitola 7

## Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a implementací biometrického systému pro rozpoznávání osob na základě snímků sítnice. V úvodních kapitolách byly rozebrány teoretické základy biometrických systémů, jejich charakteristiky, metody hodnocení výkonnosti a také anatomie lidského oka včetně zdravotních faktorů (onemocnění oka), které mohou proces identifikace ovlivnit. Následně byly představeny principy rozpoznávání na základě sítnice, přičemž důraz byl kladen na analýzu cévní struktury jako hlavního nositele identifikačních znaků.

Na základě získaných poznatků byl navržen a implementován systém, který se zaměřuje na detekci bifurkačních a křížících bodů cévního řečiště. V praktické části byly otestovány různé metody předzpracování, segmentace a extrakce příznaků, přičemž cílem bylo najít efektivní kombinaci postupů, které povedou ke stabilnímu a spolehlivému rozpoznávání. Vývoj probíhal iterativně, s důrazem na experimentování a ověřování zvolených řešení.

Výsledný systém byl otestován na reprezentativním vzorku snímků zahrnujícím různé úrovně kvality obrazu. Testy potvrdily, že při dostatečně kvalitním vstupním obrazu je systém schopen identifikovat osobu s vysokou přesností. Při testování verifikace (ověření identity) dosáhl úspěšnosti 73,02 %, a to i při proměnlivé kvalitě snímků. V případě identifikace (určení osoby ze skupiny) byla úspěšnost 78,95 %.

Největší slabinou se ukázala být fáze segmentace, která je velmi citlivá na kvalitu snímků a často vede k nepřesné extrakci cévních struktur, což může negativně ovlivnit další fáze zpracování. Přes tato omezení lze systém považovat za funkční důkaz konceptu, který dokládá životaschopnost biometrie založené na sítnici v oblasti identifikace a verifikace osob.

Do budoucna by bylo možné systém rozšířit o robustnější metody segmentace cévního řečiště a o využití pokročilejších metrik pro porovnávání příznaků, které by byly méně citlivé na přesnost překryvu. Zároveň lze zvažovat úpravy stávajících metod porovnání a překrytí tak, aby umožňovaly oboustranné sladění příznaků. Další možností je využití alternativních příznaků sítnice, například těch odvozených od optického disku, nebo návrh multimodálního systému, který by kombinoval více typů rysů a zvýšil tak celkovou spolehlivost rozpoznávání. Významným směrem dalšího vývoje je rovněž testování na rozsáhlejších databázích a nasazení systému do reálných podmínek s proměnlivou kvalitou snímků a různými úrovněmi šumu.

# Literatura

- [1] AKRAM, M. U.; TARIQ, A. a KHAN, S. A. Retinal recognition: Personal identification using blood vessels. In: *2011 International Conference for Internet Technology and Secured Transactions*. 2011, s. 180–184. ISBN 978-1-908320-00-1.
- [2] AYTON, L. *Ocular Toxoplasmosis*. 2025. Dostupné z: <https://plano.co/eye-conditions/other-eye-conditions/ocular-toxoplasmosis/>. [Datum přístupu: 22. leden 2025].
- [3] DRAHANSKÝ, M.; ORSÁG, F. et al. *Biometrie*. 1. vyd. Computer Press a.s., 2011. ISBN 978-80-254-8979-6.
- [4] ELAD, B. *Biometric Payment Authentication Statistics 2025: User Demographics, Market Dynamics, and Security Challenges* online. CoinLaw, 2025. Dostupné z: <https://coinlaw.io/biometric-payment-authentication-statistics>. [cit. 2025-04-25].
- [5] EYE, E. *Retinal Detachment*. 2025. Dostupné z: <https://eeye.com.hk/en/retinal-detachment/>. [Datum přístupu: 22. leden 2025].
- [6] EYEDOC. *Diabetic Eye Conditions*. 2025. Dostupné z: <https://eyedoc.sg/diabetic-eye-conditions/>. [Datum přístupu: 22. leden 2025].
- [7] FIALA, P.; VALENTA, J. a EBERLOVÁ, L. *Stručná anatomie člověka*. 1. vyd. Karolinum, 2015. ISBN 978-80-246-2693-2.
- [8] FISCHBARG, J. *The Biology of the Eye*. 1. vyd. Elsevier Science, 2006. ISBN 0-444-50925-9.
- [9] HÁJEK, J. a DRAHANSKÝ, M. *Recognition-Based on Eye Biometrics: Iris and Retina*. 1. vyd. Springer International Publishing, 2018. 37–102 s. ISBN 978-3-319-98733-0. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/research/publication/11498>.
- [10] HANES, E. *The Anatomy of the Retina* online. Verywell Health, 29. října 2024. Dostupné z: <https://www.verywellhealth.com/retina-anatomy-4800793>. [cit. 2024-12-23].
- [11] HÁJEK, J. *Biometrický systém pro rozpoznávání podle sítnice a duhovky oka*. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce DRAHANSKÝ, M. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=206376](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=206376).
- [12] JAIN, A. K.; FLYNN, P. a ROSS, A. A. *Handbook of Biometrics*. 1. vyd. New York: Springer New York, NY, 2008. ISBN 978-0-387-71040-2.

- [13] JAIN, A. K.; ROSS, A. A. a NANDAKUMAR, K. *Introduction to Biometrics*. 1. vyd. New York: Springer New York, NY, 2011. ISBN 78-0-387-77325-4.
- [14] KAZILEK, C. a COOPER, K. *Rods and Cones* online. Arizona State University School of Life Sciences Ask A Biologist, leden 2010. Dostupné z: <https://askbiologist.asu.edu/rods-and-cones>. [cit. 2024-12-23].
- [15] KLIMEŠOVÁ, L. *Identifikace osob pomocí biometrie sítnice*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce ODSTRČILÍK, J. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=171671](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=171671).
- [16] NÁRODNÍ ZDRAVOTNICKÝ INFORMAČNÍ PORTÁL. *Diabetická retinopatie* online. Ministerstvo zdravotnictví ČR a Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR, prosinec 2021. ISSN 2695-0340. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/clanek/378-diabeticka-retinopatie>. [cit. 2024-12-23].
- [17] NÁRODNÍ ZDRAVOTNICKÝ INFORMAČNÍ PORTÁL. *Věkem podmíněná makulární degenerace* online. Ministerstvo zdravotnictví ČR a Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR, červenec 2021. ISSN 2695-0340. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/clanek/376-vekem-podminena-makularni-degenerace>. [cit. 2024-12-23].
- [18] NÁRODNÍ ZDRAVOTNICKÝ INFORMAČNÍ PORTÁL – STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV. *Toxoplazmóza* online. Ministerstvo zdravotnictví ČR a Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR, březen 2024. ISSN 2695-0340. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/clanek/792-toxoplazmoza>. [cit. 2024-12-23].
- [19] OPTOMED. *Oční onemocnění*. 2025. Dostupné z: <http://optomed.cz/ocni-onemocneni/>. [Datum přístupu: 22. leden 2025].
- [20] RAI, P. *Retinal Vessel Segmentation and Vessel Diameter Estimation* GitHub [repozitář]. 2021. Dostupné z: <https://github.com/pranjalrai-iitd/Retinal-vessel-segmentation-and-vessel-diameter-estimation>. [Datum přístupu: 5. května 2025].
- [21] RAK, R.; MATYÁŠ, V.; ŘÍHA, Z. et al. *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. Praha: Grada Publishing, 2008. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [22] RETINA, S. C. *Macular Degeneration*. 2025. Dostupné z: <https://southcarolinaretina.com/clinical-service/macular-degeneration/>. [Datum přístupu: 22. leden 2025].
- [23] SEMERÁD, L. *Theoretical and Experimental Determination of the Amount of Information in Human Ocular Biometric Characteristics*. Brno, 2022. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce DRAHANSKÝ, M. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=251105](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=251105).
- [24] SIMON, C. a GOLDSTEIN, I. A New Scientific Method Of Identification. *New York State Journal of Medicine*, 1935, sv. 35.
- [25] SYNEK, S. a SVORKOVSKÁ Šárka. *Fyziologie oka a vidění*. 2. vyd. Grada Publishing, 2014. ISBN 978-80-247-8944-6.

- [26] TOWER, P. The fundus oculi in monozygotic twins: report of six pairs of identical twins. *A.M.A. Archives of Ophthalmology*, 1955, sv. 54, s. 225–239.
- [27] VEENA, R. Retinal Image Analysis Using Fovea Detection using Unsymmetrical Trimmed Median Filter (MDBUTMF). *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Zář 2013, Volume 3, s. 263 –269.
- [28] ŠTĚPKOVÁ, M. *Vybrané oční poruchy a jejich vliv na různé aspekty života jedince*. Olomouc, 2021. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, Katedra optiky. Vedoucí práce NAJMANOVÁ, E. Dostupné z: <https://theses.cz/id/tyta7g/45094952>.

# Příloha A

## Výsledky testování

Postup testování je zmíněn v kapitole 6.2, tato příloha slouží pouze pro demonstraci skutečných hodnot získaných při testování celého systému na úspěšnost verifikační operace. Tabulky A.1 a A.2 obsahují výsledky testování na celkem 7 sadách snímků v optimální kvalitě a tabulka A.3 obsahuje výsledky testování na 3 sadách snímků s podstatně nižší kvalitou (např. neostrost, světelné odlesky, velké tmavé oblasti, atd.). Nedostatky jednotlivých sad jsou následující:

- 2\_P ze sady 1105 – OD je detekován s mírnou odchylkou, přesnost operace verifikace je tedy značně ovlivněna, při zvýšení prahu pro porovnání euklidovské vzdálenosti o hodnotu 10 pixelů se skóre podobnosti zvýší přibližně o 20%
- 1\_L ze sady 1113 – OD je špatně detekován, což je i z výsledku poznat, ale stále je viditelná pouze mírná odchylka
- 3\_R ze sady 1100 – OD nebyl vůbec detekován, operace překrytí a zarovnání tedy nebylo možné uskutečnit, což se projevilo na výsledcích o hodnotě podobnosti maximálně kolem 8%
- sada 1135 – snímky s hodně tmavými oblastmi
- sada 1150 – rušivé světlo na okrajích některých snímků

Hodnoty v tabulce vyjadřují skóre porovnání snímku daného řádku vůči záznamu registrovaného snímku z databáze uvedeného v záhlaví sloupce.

Tabulka A.1: Výsledky testů verifikace na sadách různých snímků obou očí stejných osob (P = pravé oko, L = levé oko). Skóre porovnání představuje podobnost snímků v procentech (%).

Set	Reg/Verif	1_P	2_P	3_P	1_L	2_L	3_L
1103	1_P	100.00	60.90	61.48	-	-	-
	2_P	76.95	100.00	75.50	-	-	-
	3_P	73.76	87.45	100.00	-	-	-
1105	1_P	100.00	49.19	86.51	-	-	-
	2_P	47.78	100.00	43.73	-	-	-
	3_P	92.49	55.44	100.00	-	-	-
	1_L	-	-	-	100.00	87.96	82.09
	2_L	-	-	-	72.45	100.00	73.64
	3_L	-	-	-	81.60	97.66	100.00
1113	1_P	100.00	78.23	78.46	-	-	-
	2_P	87.66	100.00	80.18	-	-	-
	3_P	92.20	80.49	100.00	-	-	-
	1_L	-	-	-	100.00	43.43	47.79
	2_L	-	-	-	42.15	100.00	82.13
	3_L	-	-	-	43.30	81.59	100.00
1115	1_P	100.00	79.62	86.71	-	-	-
	2_P	89.94	100.00	87.17	-	-	-
	3_P	91.82	77.74	100.00	-	-	-
	1_L	-	-	-	100.00	76.49	73.69
	2_L	-	-	-	64.82	100.00	77.64
	3_L	-	-	-	82.42	86.68	100.00
1120	1_P	100.00	77.57	84.03	-	-	-
	2_P	84.54	100.00	77.79	-	-	-
	3_P	93.41	79.61	100.00	-	-	-
	1_L	-	-	-	100.00	72.57	75.47
	2_L	-	-	-	80.93	100.00	89.38
	3_L	-	-	-	71.41	72.50	100.00

Tabulka A.2: Pokračování tabulky A.1.

Set	Reg/Verif	1_P	2_P	3_P	1_L	2_L	3_L
1133	1_P	100.00	69.53	78.70	-	-	-
	2_P	83.33	100.00	83.66	-	-	-
	3_P	83.65	80.98	100.00	-	-	-
	1_L	-	-	-	100.00	74.74	69.24
	2_L	-	-	-	90.00	100.00	80.00
	3_L	-	-	-	79.15	72.34	100.00
1123	1_P	100.00	92.08	79.49	-	-	-
	2_P	76.70	100.00	69.41	-	-	-
	3_P	68.85	72.90	100.00	-	-	-
	1_L	-	-	-	100.00	76.49	77.21
	2_L	-	-	-	77.66	100.00	82.48
	3_L	-	-	-	85.27	85.27	100.00

Tabulka A.3: Výsledky testů verifikace na snímcích s nižší kvalitou či různými artefakty (P = pravé oko, L = levé oko). Skóre porovnání představuje podobnost snímků v procentech (%).

Set	Reg/Verif	1_P	2_P	3_P	4_P	1_L	2_L	3_L
1135	1_P	100.00	70.81	71.75	75.82	-	-	-
	2_P	66.13	100.00	42.26	64.19	-	-	-
	3_P	65.64	47.88	100.00	59.64	-	-	-
	4_P	71.53	56.77	63.98	100.00	-	-	-
	1_L	-	-	-	-	100.00	52.60	77.51
	2_L	-	-	-	-	67.61	100.00	69.37
	3_L	-	-	-	-	72.24	57.51	100.00
1150	1_P	100.00	85.00	82.43	72.09	-	-	-
	2_P	78.65	100.00	74.57	71.86	-	-	-
	3_P	82.43	87.45	100.00	66.51	-	-	-
	4_P	77.56	78.60	74.42	100.00	-	-	-
	1_L	-	-	-	-	100.00	90.72	82.11
	2_L	-	-	-	-	89.44	100.00	83.91
	3_L	-	-	-	-	83.78	89.54	100.00
1100	1_P	100.00	82.89	5.67	-	-	-	-
	2_P	75.66	100.00	6.09	-	-	-	-
	3_P	8.36	7.08	100.00	-	-	-	-
	1_L	-	-	-	-	100.00	79.76	72.69
	2_L	-	-	-	-	92.14	100.00	55.89
	3_L	-	-	-	-	83.89	63.70	100.00