

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní
techniky

Diplomová práce

Biometrická analýza oční duhovky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 12. května 2013

Alois Auerbach

Abstract

Biometric analysis of a human iris is relatively new and fast developing field of science, which is used primary for identification of persons. Identification based on human iris is known for long time, but full usage of this method in praxis was allowed with the development of cheap digital cameras with usable resolution.

Purpose of this thesis is introduce reader to methods of procesing and capturing images of human iris. Those methods consists of a few steps, which can be used in general image processing. Typical iris recognition system take a picture of human iris and part of face. After image enhancing and normalization system detect iris area and cut it from the picture. Extracted iris is transformed into two dimensional vector from which can we compute unique biometric signature. At the end we compare computed signature with templates stored in our database.

Every iris matching algorithms use this five steps scheme. Difference between algorithms is in way how they behave in those steps.

In second chapter of this thesis you can find introduction to biometry types of biometric traits and their usage in human recognition. Third chapter contains description of iris capture devices. Fourth chapter is focused on description of each step of iris recognition algorithm and types of sub-algorithm we can use in those steps. In chapter five are hardware parameters of one specific iris detection device, which was used for practical part of this thesis. Chapter six contains description of practical part of this thesis-implementation of iris detection software based on mentioned methods. Results of tests and description of test can you find in chapter seven. And in chapter eight is evaluation of test results and suggestions for improvements. Conclusion of this thesis is in chapter nine.

Obsah

1	Úvod	1
2	Biometrie	2
2.1	Historie biometrie	2
2.2	Biometrické systémy	3
2.3	Otisky prstů	5
2.4	Geometrie dlaně	6
2.5	Žilní systém dlaně	7
2.6	Obličej	7
2.7	Písmo	9
2.8	Sítnice oka	9
2.9	Oční duhovka	10
2.10	Další možnosti	11
3	Snímání oční duhovky	12
3.1	Metody snímání oční duhovky	12
3.1.1	S vědomím testované osoby	12
3.1.2	Bez vědomí dané osoby	13
3.2	Zařízení pro snímání oční duhovky	14
4	Zpracování a analýza oční duhovky	17
4.1	Anatomie oka a oční duhovky	17
4.2	Zpracování snímků oční duhovky	19
4.3	Předzpracování snímku	20
4.3.1	Normalizace šedotónové variace	21
4.3.2	Ekvalizace snímku a redukce úrovně jasu	21
4.4	Segmentace	23
4.4.1	Sobelův detektor hran	24
4.4.2	Canneho detektor hran	24
4.4.3	Houghova transformace	25
4.4.4	Daugmanův operátor	27

4.4.5	Metody rychlé detekce	28
4.5	Normalizace	29
4.5.1	Daugman rubber sheet	30
4.6	Extrakce příznaků	30
4.6.1	Gaborův filtr	31
4.6.2	Gaussův filtr	32
4.6.3	Vlnková transformace	32
4.7	Porovnání příznaků	33
4.7.1	Hammingova vzdálenost	34
4.7.2	Korelace signálu	34
4.8	Metody analýzy oční duhovky	35
4.8.1	Daugmanova metoda	35
4.8.2	Wildesova metoda	36
4.8.3	Maova metoda	37
5	Použité snímací zařízení	38
5.1	Použitá kamera	38
6	Zvolené řešení	41
6.1	Pořízení snímku	41
6.2	Implementace	43
6.2.1	Předzpracování snímku	45
6.2.2	Segmentace	46
6.2.3	Extrakce příznaků	47
6.2.4	Uložení dat	48
6.2.5	Porovnání příznaků	49
7	Dosažené výsledky	50
7.1	Průběh experimentu	50
7.2	Vlastnosti implementace	52
7.3	Spolehlivost systému	53
7.4	Ilustrační příklad	54
8	Zhodnocení výsledků	57
9	Závěr	59
A	Použité zkratky	60
B	Programová dokumentace	61
B.1	Popis tříd	62

C	Uživatelská příručka	65
	C.1 Instalace	65
	C.2 Použití	67

1 Úvod

Biometrická analýza oční duhovky je relativně nový a rychle se rozvíjející obor, který je využit především pro jednoznačnou identifikaci osob. Identifikace osob na základě oční duhovky je sice známa poměrně dlouho, její plné nasazení v praxi bylo však možné až s rozšířením kvalitních digitálních snímačů.

Cílem této práce je prozkoumat několik nejznámějších metod zpracování snímku oční duhovky, na jejich základě navrhnout a implementovat metody použitelné pro automatické zpracování a vyhodnocení snímku. Výsledek spolehlivosti a efektivity takto implementovaného řešení otestovat na reálných datech získaných od dostatečně velké skupiny osob.

V druhé kapitole této práce naleznete stručné seznámení s biometrií, její použitelnosti v oblasti rozpoznávání osob a typy použitelných biometrických příznaků. Třetí kapitola obsahuje popis technologií pro snímání obrazu oka. Čtvrtá kapitola je určena pro seznámení s procesem zpracování snímku oční duhovky a popis několika nejznámějších a nejpoužívanějších metod. Pátá kapitola obsahuje popis snímacího zařízení zapůjčeného pro účely této práce, jeho nevýhody a technické parametry. Šestá kapitola obsahuje popis implementace zvoleného řešení. V kapitole sedmé naleznete dosažené výsledky a jejich vyhodnocení. Osmá kapitola je věnována zhodnocení celé práce a návrhům na možné vylepšení stávajících nedostatků. Výsledky dosažené v celé práci jsou shrnuty v deváté kapitole.

2 Biometrie

V této kapitole naleznete stručný úvod do biometrie jako vědy, používané k identifikaci a verifikaci osob (dále jen rozpoznávání osob) [bio]. Jsou zde uvedeny pojmy, spjaté s biometrickými systémy, a souhrn jejich obecných vlastností. Druhá polovina kapitoly je věnována popisu používaných biometrických vlastností (části lidského těla, které jsou použitelné).

Definice biometrie, potažmo biometrického systému, je komplikovaná a neustálená. Záleží na kontextu dané definice a vztahu ke konkrétní aplikaci. Ve všech definicích se opakují slova biologický, měřitelný, příznak, rozpoznávání. Shrnutím všech definic by se biometrický systém dal označit jako: "Automatické měření a vyčíslení biologických charakteristik za účelem získání kvantitativních příznaků, které jednoznačně identifikují konkrétní osobu" [mart].

2.1 Historie biometrie

Biometrické vlastnosti využívá lidstvo pro rozpoznání konkrétních jedinců, aniž by si toho byli lidé vědomi [biom]. Nikomu nepřichází zvláštní rozpoznat někoho podle jeho tváře, hlasu, charakteristických rysů chůze. Tyto rysy můžeme označit za základní biometrické vlastnosti člověka. Pro jejich reprodukci však potřebujeme dokonalé záznamové zařízení. První dochované záznamy použití biometrie (počátky 14. století) jsou otisky prstů na keramice, značící patrně důkaz o autorství. Můžeme se však dohadovat, jestli se nejednalo pouze o nešikovnost tvůrce takového výrobku.

Průkaznější důkaz o využití biometrických vlastností pochází z počátků 19. století. Konkrétně se začaly používat otisky prstů v kriminalistice a identifikace ngramotných osob místo podpisu. Koncem 19. století se zavedla do praxe *antropometrie* – obor zabývající se měřením a zpracováváním tělesných rozměrů. Na jejím základě byla navržena komplexní metoda identifikace člověka na základě jedenácti tělesných rozměrů (Bertillionáž) [drah]. Tyto dvě základní metody jsou používány dodnes. S rozšířením výkonných počítačů a levných záznamových zařízení, se po 50. letech 20. století začal seznam použitelných metod dále rozšiřovat.

V dnešní době se využívá rozsáhlá množina biometrických charakteristik, pomineme-li experimentální metody zatím nenasazené do praxe, jedná se o tyto vlastnosti:

- DNA
- tvář
- otisk prstu/dlaně
- oční duhovka/sítnice
- tvar dlaně/prstu
- žilní systém dlaně/prstu
- termální snímek tváře/dlaně
- dentální snímek
- tvar ucha
- hlas
- podpis
- dynamika chůze
- dynamika psaní na klávesnici

2.2 Biometrické systémy

V úvodu kapitoly byly zmíněny pojmy identifikace a verifikace osoby. Tyto pojmy však mají odlišný význam [drah]. *Identifikace* znamená, že na základě získaných údajů zkusíme zjistit, jestli jsou data o daném jedinci uložena v naší databázi (jestli jej známe). *Verifikace* je proces, kdy ověřujeme, jestli je osoba opravdu tou, za kterou se vydává (kontrola hesla, klíče atp.). Oba tyto procesy jsou založeny na jednoduchém principu. Buď něco známe (heslo, tajný kód), něco vlastníme (klíč, občanský průkaz) nebo něčím jsme (biometrické vlastnosti).

Využití biometrie se jeví jako uživatelsky nejpřívětivější. Uživatel si nemusí nic pamatovat, nemusí se bát o ztrátu identifikačního prostředku, stačí mu pouze existovat. Navíc odrazuje většinu podvodníků a znemožňuje popření identity. Bohužel biometrie není dokonalé řešení. Analýza a někdy i samotné snímání biometrických vlastností je komplikovaný proces, výstup navíc není jednoznačný. Dostaneme pouze pravděpodobnost úspěchu (ta se u nejrozšířenějších systémů pohybuje přes 99%). Kvůli pokusům o podvod je nutné během snímání zároveň detekovat živost (nejčastější typy útoků jsou pomocí maket nebo modelů dané části těla), v případě napadení systému je nemožné nebo velice nákladné změnit biometrické vlastnosti, a samozřejmě nastává i problém zachování soukromí.

Každá biometrická vlastnost se posuzuje podle několik měřítek. Následující hodnocení je převzato z literatury [drah]. Porovnání těchto charakteristik je uvedeno v tabulce 2.1:

1. univerzalita – každá osoba by tuto vlastnost měla mít
2. jedinečnost – nesmí existovat dvě osoby se stejnou vlastností
3. konstantnost – vlastnost je neměnná s časem
4. získatelnost – vlastnost je kvantitativně měřitelná
5. výkonnost – změna vlastnost (nepř. vlivem stárnutí), nesmí mít vliv na spolehlivost systému
6. akceptace – ochota lidí nechat si danou vlastnost sejmout
7. odolnost proti falšování – obtížné vytvoření falzifikátu
8. nákladnost – celkové náklady na pořízení systému

Pro objektivní srovnání využitelnosti jednotlivých biometrických systémů (tj. využití konkrétního příznaku a konkrétního zpracovávajícího systému) se zavádí statistické veličiny popisující selhání daného systému [drah]. Tato veličina má čistě informativní charakter a má smysl ji používat pouze na porovnávání algoritmů pracujících se stejným typem biometrických příznaků. Základní veličinou je míra **chybného přijetí** (False Acceptance Rate–FAR), která je definována jako poměr úspěšně (správně) přijatých dat k celkovému počtu zpracovávaných dat.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Obličej	+	-	±	+	-	+	-	-
Otisk prstu	±	-	+	±	+	±	+	-
Geometrie ruky	±	±	±	+	±	±	±	±
Žilní systém ruky	±	±	±	±	±	±	+	±
Oční duhovka	+	+	+	±	+	-	+	+
Oční sítnice	+	+	±	-	+	-	+	+
Podpis	-	-	-	+	-	+	-	-
Hlas	±	-	-	±	-	+	-	-
Termogram	+	+	-	+	±	+	+	+

Tabulka 2.1: Charakteristiky biometrických vlastností (+ vysoká, - nízká, ± střední), převzato z literatury [drah].

Obdobně můžeme využít veličinu **chybného odmítnutí** (False Rejection Rate–FRR), která tvoří doplněk k FAR. Veličina FAR je využívána pro vyjádření bezpečnosti daného systému (čím nižší, tím je lepší), a také určuje netolerantnost systému vůči poruchám při zpracování či snímání dat. FRR je oproti tomu využívána jako hodnocení uživatelské pohodlnosti systému (čím je hodnota nižší, tím je vyšší tolerantnost vůči chybě dat).

2.3 Otisky prstů

Každý člověk má na povrchu prstů papilární linie (plastické reliéfy na pokožce), jejichž tvar je unikátní (od počátků využívání této biometricky nebyly zjištěny dvě osoby se stejnou sadou otisku prstů). Na základě obrazce, který vytvářejí, můžeme jednoznačně identifikovat konkrétního jedince [dakt]. Metody identifikace pomocí otisku prstu byly používány již ve starověku (otisky nalezené na archeologických artefaktech, používané jako obchodní značka výrobce). První snahu o jejich klasifikaci projevila *Nehemian Grew* koncem 17. století. Rozkvět tento obor biometrie zažil v 19. století, kdy byly zavedeny klasifikační třídy a významné body (markanty) otisku.

V dnešní době jsou elektronické snímače otisku prstů levné a dostupné, jsou součástí velké množiny přístrojů (osobní počítače, mobilní telefony...), kde slouží např. jako ekvivalent hesla pro vstup do systému. V komerční sféře se využívají spíše méně, nejvíce v kriminalistice a pro vstup do chrá-

něných pracovišť. Při snímání otisku prstu je možné ověřit živost prstu (na základě měření teploty a srdečního pulsu) a eliminovat tak podvody s falešnými modely prstů.

Mezi výhody použití otisku prstů patří vysoká míra přijatelnosti této metody mezi lidmi, spolehlivá, léty prověřená technologie snímání a zpracování. Pro vývojáře softwaru provádějícího biometrickou analýzu otisku prstu je výhodou existence velkého množství volně dostupných snímků, je snadné tedy ověřit funkčnost výsledného algoritmu.

Mezi nevýhody patří citlivost na nečistoty a dočasné poškození pokožky prstu. Fyzický kontakt mezi prstem a snímačem zase časem zapříčiní znečištění snímače a postupné zhoršování získaných snímků. Existuje také nemalá množina lidí, která má díky použití otisku v kriminalistice odmítavý postoj k této metodě.

2.4 Geometrie dlaně

Identifikace na základě geometrie dlaně je používána od počátků 80. let 20. století [drah]. V současné době je nasazována v provozech, kde není možné používat jiné biometriky (např. otisk prstu, obraz duhovky oka atp.) z důvodů ochrany osobních informací nebo nemožnosti instalace citlivých snímačů v industriálním prostředí (prach, hluchnost, vlhkost atp.). V praxi se dnes využívá 2D obraz, technologie 3D snímání doposud není natolik vyspělá (a levná), aby mohla být masově nasazena.

Rozpoznání na základě geometrie dlaně je založeno na základě několika charakteristik:

- délka prstů
- šířka prstů
- výška prstů
- zakřivení a další anomálie

Hlavní výhodou těchto systémů je jejich nízká pořizovací cena, snadná použitelnost a obecně kladné přijímání těchto systémů lidmi. Další výho-

dou je odolnost proti rušení způsobenému vnějšími vlivy. Bohužel nevýhodou je velká chybovost v důsledku jakýchkoliv změn ruky vlivem zranění. Komplikace také tvoří šperky jako prsteny, které upravují geometrii dlaně. Jednodušší systémy bez detekce živosti lze také oklamat použitím jednoduše vytvořitelného modelu. Velikost detekčního zařízení je někdy na obtíž, znemožňuje nasazení této technologie u menších mobilních zařízení.

2.5 Žilní systém dlaně

Vzor vytvářený žilním systémem v dlani nebo prstu lze také využít pro rozpoznání [palm]. Žilní systém je pro každého jednotlivce unikátní a po většinu času je neměnný. Žíly jsou uvnitř dlaně, proto je není možné padělat. Fyzikální vlastnosti krve (konkrétně krevního barviva–hemoglobinu) lze použít pro snadné ověření živosti.

Obraz je vytvořen prosvětlením horních vrstev kůže infračerveným světlem, když je dlaň nasvícena (nebo prosvícena zdrojem světla s větším výkonem) a následně vyfotografována pomocí CCD kamery. Odkysličený hemoglobin pohlcuje infračervené světlo, kdežto kůže jej odráží, žíly se projeví jako linie tmavší barvy.

Výhodou tohoto systému je jeho vysoká spolehlivost a odolnost proti falšování, přičemž náklady na pořízení snímače patří mezi nižší. Bohužel mezi veřejností tento systém není přijímán zrovna kladně, je náchylný na šum a přesnost zpracování.

2.6 Obličej

Obličej je patrně nejznámější biometrická vlastnost. Intuitivně jej používáme každý den pro rozpoznání okolních jedinců, pro počítačové rozpoznávání osob je jeho využití komplikovanější. Moderní systémy mají vysokou míru odmítnutí osob (kolem 10%) a existuje i nenulová možnost chybné akceptace (kolem 1%) [face]. Přesto se může jednat o vhodný a rychlý detekční systém.

Základní systémy rozpoznávání na základě obličeje můžeme rozdělit na následující kategorie podle použitých algoritmů:

- porovnávání křivek
- porovnávání šablon
- porovnávání pozic význačných bodů
- využití termálního snímku

Algoritmy porovnávající obličej podle křivek patří mezi nejstarší a nejméně spolehlivé. Jak již z názvu vyplývá, pro zpracování obličeje používají klasické postupy pro analýzu 2D snímku, ve snímku hledají shodné hrany a křivky, které se porovnávají s databází. Ve většině případů selhávají pro fotografie pořízené z jiných úhlů, existuje možnost je snadno obelstít pomocí masek nebo fotografií.

Algoritmy porovnávající obličej podle šablon (template matching) potřebují pro svou funkčnost velké množství vstupních dat. Na základě více snímků osoby (typicky přední a boční pohled) si vytvoří sadu šablon, jejichž smyslem je vystihnout pro konkrétní obličej jeho typické rysy (tvar brady, tvar nosu atp.). Získané šablony testujeme na shodnost s daty uloženými v databázi. Tyto algoritmy eliminují nevýhodu předchozích, dokáží spolehlivěji rozpoznat i snímek pořízený pod jiným úhlem než byl pořízen vzor. Bohužel vyžaduje několikanásobně větší databázi vzorů.

V dnešní době se používá algoritmus porovnání význačných bodů. Na obličej si označíme význačné body (oči, nos, ústa, uši), a změříme vzdálenosti a relace mezi nimi. Toto opakujeme pro fotografie z různých úhlů, kvůli zpřesnění měření. Význačné body nám vytvoří 3D graf vzoru, podle kterého porovnáváme testovaný snímek pomocí grafových algoritmů.

Termální snímek obličeje patří mezi nejmodernější metody. Bylo zjištěno, že snímek obličeje pořízený termokamerou je unikátní pro každou osobu. Je to zapříčiněno rozdílným prokrvením tváří, rozložením svalové a tukové tkáně. Bohužel termální snímek není stabilní v čase a je závislý na okolních teplotních podmínkách. Je tak využitelný pouze pro krátkodobou identifikaci v rozmezí několika let.

Identifikace osob na základě snímků obličeje patří mezi veřejností nejlépe přijímané metody, a to díky její podobnosti s mechanismy běžně užívanými lidmi a nenáročnosti snímací technologie.

2.7 Písmo

Identifikace pomocí psaného projevu patří dodnes mezi jednu z nejvíce používaných možností ve světě. Prakticky neexistuje obor, ve kterém by podpis nebyl brán jako potvrzení, že osoba souhlasí s daným dokumentem. Vlastnoruční podpis můžeme vnímat jako výsledek více vlivů, konkrétně geometrie ruky a jedinečných vlastností jednotlivce. Pro možnosti biometrického zpracování můžeme rozlišovat mezi statickým a dynamickým podpisem.

Statická forma podpisu zaznamenává pouze výsledek celého procesu psaní. Porovnává se vzory klasickými algoritmy zpracování 2D snímků. Oproti tomu dynamická forma podpisu nám popisuje změnu přítlaku pera v závislosti na konkrétním bodu v prostoru. Vyžaduje ale speciální zařízení [bio01].

Ačkoliv se v praxi používá více analýza statické formy podpisu (je společensky přijatelnější), je ji možno snáze zfalšovat. Můžeme také podpis v tomto směru vnímat spíše jako autentizaci prostřednictvím znalostí, které nám může někdo odcizit podobně jako heslo. Dynamická forma podpisu je v tomto směru bezpečnější, při pokusu o falšování není takřka možné napodobit dokonale celý proces.

2.8 Sítnice oka

Sítnice oka (část oka se světlocitlivými prvky) je vyživována soustavou cév, které tvoří unikátní obraz. Tento obraz je stálý a během života člověka se nemění. Je proto vhodný pro identifikaci jednotlivců [ret]. Bohužel stále není jednoduché pořídit snímek sítnice levnou a dostupnou technologií. Základy metody pro snímání obrazu sítnice tvoří tzv. retinoskop–lékařský nástroj používaný při vyšetření oka. Vlastní snímek je pořízen podobně jako při pořizování obrazu žilního systému ruky, sítnice je nasvícena in-

fračerveným světlem o nízké intenzitě (abychom předešli zdravotním následkům), obraz žilního systému sítnice je vyfotografován digitální kamerou.

Zpracování obrazů se provádí technikami zpracování 2D a 3D snímků. Vlastní snímek je ve většině případů zkonvertován do podoby dvourozměrného grafu, který je vhodnější pro rychlejší porovnávání. Využití jiných technik je vzácnější.

Vzhledem k vlastnostem sítnice se jedná o jeden z nejbezpečnějších biometrických příznaků na lidském těle, je téměř nemožné vytvořit model oka, nebo použít mrtvou tkáň pro oklamání systému. Systémy identifikace jedince založené na obrazu žilního systému oka jsou využívány od 60. let 20. století. Ve svých počátcích byla využívána převážně ve vojenských objektech pro zajištění autentizace osob. V dnešní době se od tohoto systému ustupuje kvůli vysokým nákladům na snímač a samotný porovnávací systém.

2.9 Oční duhovka

Metody rozpoznávání založené na analýze snímku oční duhovky patří mezi relativně nové, rozvoj zaznamenaly v 80. letech 20. století a rozvíjejí se dodnes [drah]. Oční duhovka se formuje ještě před narozením člověka spolu s okem. Duhovka je tvořena kolagenovými vlákny, ve kterých můžeme detekovat určité obrazce. Ty se po dobu života nemění a zachovávají podobnost i po mechanickém poškození rohovky (vrstvy kryjící oko). Ve vlastním obrazu můžeme detekovat 266 příznaků, jedná se tak o přístupnou a vhodnou biometrickou vlastnost.

Metoda snímání oční duhovky je daleko jednodušší než v případě snímání sítnice. Duhovka je přístupná bez použití složitých snímacích technologií, stačí pouze snímač s pevnou ohniskovou vzdáleností. Podobně jako u identifikace na základě obličeje je možno získat biometrický příznak bez kooperace snímané osoby a vyhledávat tak jedince v davu. Na rozdíl od využití biometrie obličeje je biometrie duhovky daleko spolehlivější s menší šancí chybného odmítnutí/zamítnutí. Co se možností podvrhu týče, během pořizování snímku je možné provést klasické testy živosti oka, test pomocí infračerveného světla a test na části sítnice, viditelné skrz zřítelnici.

Snímání oční duhovky pro účely identifikace je mezi veřejností vnímáno kladně, podobně jako snímání otisků prstů. Zařízení na pořizování snímků je ve srovnání s ostatními technologiemi levnější a menší. Tato metoda identifikace se pozvolna rozšiřuje i v korporátní sféře jako náhrada zaměstnaneckých čipových karet.

2.10 Další možnosti

Mezi další biometrické vlastnosti můžeme zařadit dynamiku stisku kláves, tvar ucha, struktura nehtu, analýza DNA, pohyb rtů, pachy, snímek zubů a další. Tyto metody nejsou zatím natolik rozšířené nebo je potřebné snímací zařízení příliš nákladné, než aby umožnilo masivní nasazení v komerčním prostředí.

V dnešní době rozšíření osobních počítačů nabývá důležitosti např. dynamika stisku kláves, která může nahradit přihlašování pomocí hesla [key]. Každý člověk má unikátní dynamiku při psaní na klávesnici. Ta se sice v průběhu času mění (v závislosti na zkušenosti v psaní a na únavě), ale jde použít pro rozpoznání. Její výhodou je, že ji ve svojí podstatě nelze falšovat.

Snímek zubů je již delší dobu používán policií pro identifikaci těl [drah], které vlivem rozkladu nebo jiných podmínek ztratily většinu klasických identifikačních znaků. Při pořizování je tělo vystaveno dávce rentgenového záření, které je sice minimální, ale vícenásobné pořizování snímků by znamenalo pro testovanou osobu zdravotní komplikace (např. nemoci z ozáření).

Analýza DNA je sice stoprocentně účinná, ale opět není vhodná pro běžnou identifikaci [drah]. Nejkratší doba, za kterou lze z řetězce DNA extrahovat příznaky je příliš dlouhá (desítky hodin). Také by nastaly komplikace u jednovaječných dvojčat. Tato metoda je tak stále využitelná jen pro identifikaci, kde nezáleží na době zpracování.

3 Snímání oční duhovky

V této kapitole uvedeme metody pro snímání oční duhovky a v době vypracování práce aktuální technologie pro pořizování snímků oční duhovky. V kapitole je uvedeno pouze teoretické porovnání podle parametrů udávaných výrobcí a normy, které tyto zařízení musí splňovat.

3.1 Metody snímání oční duhovky

Metody pro pořizování snímků oční duhovky můžeme rozdělit na dvě hlavní skupiny. K první patří metody, kdy si daná testovaná osoba je vědoma snímání. Takto můžeme uvažovat např. zaměstnance identifikujícího se na vrátnici, cizince na pasové kontrole atp. Jedná se o přímý postup, který nevyžaduje příliš drahé zařízení s vysokou kvalitou pořízeného snímku.

Oproti tomu druhá skupina metod umožňuje získat obraz oční duhovky bez vědomí dané osoby. Tyto metody nacházejí své uplatnění při detekci jedinců v davu a při utajeném sledování.

3.1.1 S vědomím testované osoby

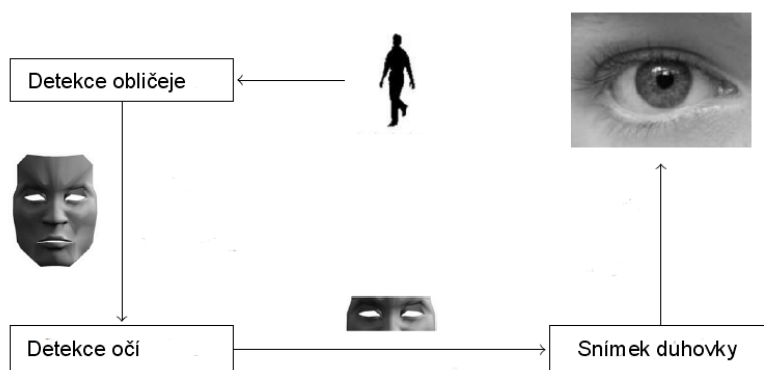
Jde o metody kooperativní. Testovaná osoba ví, kde se snímač nachází, a chce, aby byl snímek pořízen. Příkladem může být kontrola přístupu do určitých oblastí [auth]. V případě chybného pořízení snímku je snadné opakování celého procesu a pořízení nového snímku.

Je možno používat větší snímače s horšími technickými parametry. Výstupem bude vždy snímek podle potřeb použitých zpracovávajících metod (viz další kapitoly). Pro usnadnění uživatelské přístupnosti celého systému tvoří snímač často celek společně s fixátorem hlavy (anatomicky tvarovaný výřez nebo jen místo na přiložení hlavy), který zajistí minimální pohyb během pořizování snímku a přesnou lokaci snímaného oka na výsledném snímku.

Celý proces je jednodušší a výsledný snímek může být připraven přesně podle potřeb zpracovávajícího algoritmu, a to v nejvyšší možné kvalitě.

3.1.2 Bez vědomí dané osoby

Pořizování snímků oční duhovky bez kooperace dané osoby je náročnější. Komerční využití této metody je v době psaní tohoto dokumentu pouze v experimentální fázi, má sloužit pro identifikaci osob v davu [sung]. Při chybném pořízení snímku nemůžeme proces opakovat, oko není správně orientováno na snímač (nedívá se do kamery) a snímek je často pořizován z velké vzdálenosti. Schéma procesu naleznete na obrázku 3.1, který je převzat z literatury [mart].



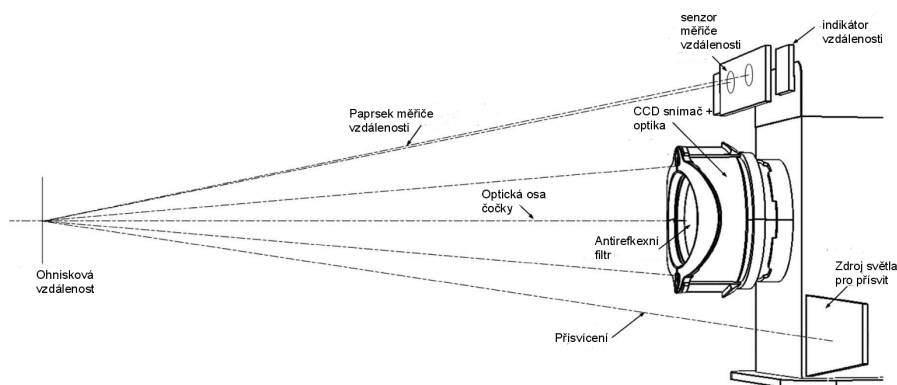
Obrázek 3.1: Schéma pořizování snímků oční duhovky bez vědomí snímání osoby. Převzato z [mart].

Tato metoda je poměrně nová. Její využití je totiž podmíněno existencí CCD snímačů o velkém rozlišení (řádově stovky mega pixelů). Základní myšlenka vychází z rozvinutí metod detekce obličeje (viz kapitola úvodu do biometrie). Algoritmy zpracování snímků obličeje jsou schopny detekovat jednotlivé části obličeje (viz druhá kapitola), z těchto částí je možno separovat snímky oční duhovky a ty následně využít pro identifikaci .

3.2 Zařízení pro snímání oční duhovky

Snímač oční duhovky je velice jednoduché zařízení. Ve své podstatě se jedná pouze o jistou modifikaci digitálního fotoaparátu, který přenáší získanou obrazovou informaci okamžitě do počítače [cap]. Z důvodů detekce živosti oka, usnadnění následného zpracování a zajištění stabilního okolního osvětlení jsou pořízené snímky pouze šedotónové, vytvořené snímáním v infračerveném spektru. Většina snímačů podporuje alespoň primitivní detekci oka a zřítelnice, na jejímž základě se snaží snímky centrovat vzhledem ke středu duhovky. Automatické pořizování snímků se již bere jako samozřejmost. Základní snímač oční duhovky obsahuje následující komponenty (schéma snímače naleznete na obrázku 3.2, převzatého z literatury [irc]):

- CCD snímač s odpovídající optikou.
- Zdroj infračerveného světla.
- Modul zpracovávající snímek a detekující oko (často se nachází mimo vlastní snímač).



Obrázek 3.2: Schéma snímače oční duhovky. Převzato z [irc] a upraveno.

Ačkoli se jedná již o poměrně známou a rozšířenou technologii, snímače pořád představují téměř polovinu nákladů na detekční systém. Druhou polovinu tvoří samotná instalace zařízení, software a jeho provoz. Je to dáno malou konkurencí firem vyrábějících tyto snímače. V obě tvorby této práce by malý domácí systém pro biometrickou identifikaci (třeba pro použití místo klasických klíčů na domovních dveřích) vyšel řádově kolem sta tisíc¹, což je pro fyzickou osobu pořád vysoká částka.

Aby mohlo být zařízení pro snímání oční duhovky použito v průmyslu či jiných profesionálních aplikacích, je nutné, aby splňovalo normu **ISO 19794-6**² a další normy podle typu umístění snímače v prostředí. Dále je nutné zařízení certifikovat pověřenou autoritou na ověření následujících parametrů [irspc]:

1. Optické a obrazové vlastnosti
 - (a) Optické rozlišení
 - (b) Rozlišení snímku
 - (c) Poměr signál–šum ve snímku
 - (d) Vlastnosti přisvitu (vlnová délka, rozložení spektra)
2. Hardwarové a softwarové vlastnosti
 - (a) Ohnisková vzdálenost
 - (b) Čas expozice
 - (c) Rychlost pořízení snímku
 - (d) Barevná hloubka, typ snímače
 - (e) Napájení
 - (f) Propojení s jinými zařízeními (dostupné porty a jejich typy)
3. Fyzické vlastnosti
4. Odolnost

Pro testování jednotlivých parametrů existují dohledatelné ISO normy. Pro koncového uživatele je důležité pouze dodržení části normy pro zachování spolehlivosti zpracovávajících algoritmů (viz následující kapitola). Jedná se o tyto parametry (výťah ze zmiňovaných norem):

¹Cena odhadnuta na základě cen zařízení od výrobců a jimi nabízeného software.

²Formáty biometrických dat.

- Rozlišení snímku $\geq 640 \times 480$ pixelů.
- Barevná hloubka ≥ 8 bitů na jeden pixel.
- Doba expozice ≤ 33 ms.
- Minimální citlivost na vlnovou délku 700 nm.
- Odstup signál–šum ≥ 40 dB
- Úroveň optického přiblížení ≥ 12.4 pixelů na milimetr čtverečný.

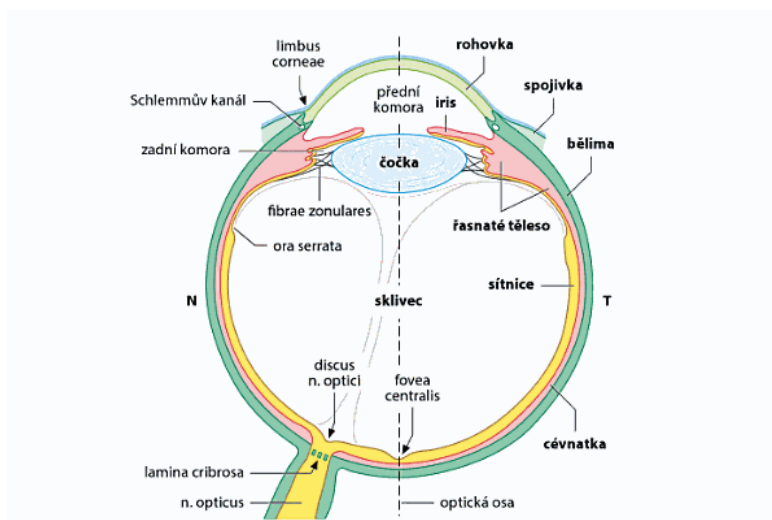
Dodržení těchto parametrů není v době psaní této práce nijak komplikované, proto by neměl být problém sestavit snímač oční duhovky do slova na míru jakéhokoliv projektu. Vysoká cena prodávaných snímačů je spíše než nákladnou technologií dána nákladnými certifikačními testy a malou mírou konkurence v této oblasti.

4 Zpracování a analýza oční duhovky

Tato kapitola obsahuje popis procesu vlastního zpracování a analýzy oční duhovky. Dále zde naleznete popis každého kroku, včetně alternativ. Závěr kapitoly je věnován několika vybraným metodám, které si zaslouží naši pozornost ať už svým užitím v komerční sféře nebo svým postavením v historii vývoje analýzy oční duhovky.

4.1 Anatomie oka a oční duhovky

Lidské oko je orgán kulového tvaru, který nám umožňuje vidět. Oko patří mezi nejsložitější orgány v lidském těle a je nejvíce využíváno pro interakci s okolním světem (zrakem vnímáme okolo 90% všech smyslových vjemů). Základní funkce oka je stejná jako u každého detektoru záření. Záření (světlo) projde přes optickou soustavu, je zachyceno detektory, transformováno na signál a ten je následně odeslán do části mozku, která jej interpretuje jako obraz. Řez okem je vyobrazen na obrázku 4.1, který je převzat z literatury [hist].



Obrázek 4.1: Řez okem. Převzato z [hist].

Oko je mírně protáhlá koule o průměru asi 25mm. Přední část oka je kryta odolnější vrstvou – **rohovkou**, pod kterou se nachází **přední oční**

komora vyplněná očním mokem. Za ní nalezneme oční **duhovku**, která funguje jako clona s proměnnou velikostí od cca 2mm do 6mm. Těsně za duhovkou se nachází oční **čočka** s proměnnou ohniskovou vzdáleností, řízená dvěma svaly.

Vnitřní část oka je vyplněna **sklivcem**, rosolovitou substancí s nízkým indexem lomu světla, která slouží pro udržení hladkého povrchu sítnice a stálého nitroočního tlaku. Nitrooční tlak udržuje kulový tvar oka. V nejvzdálenější části oka se nachází jeho nejdůležitější část – **sítnice**. Ta je složena z velkého množství světlocitlivých prvků – **tyčinek** a **čípků** (cca 120 milionů tyčinek a 6 milionů čípků). Tyčinky jsou citlivější, nejvíce jsou využity za zhoršených světelných podmínek, nedokáží však rozlišit frekvenci dopadajícího světla (barvu). Na tu reagují pouze čípky.

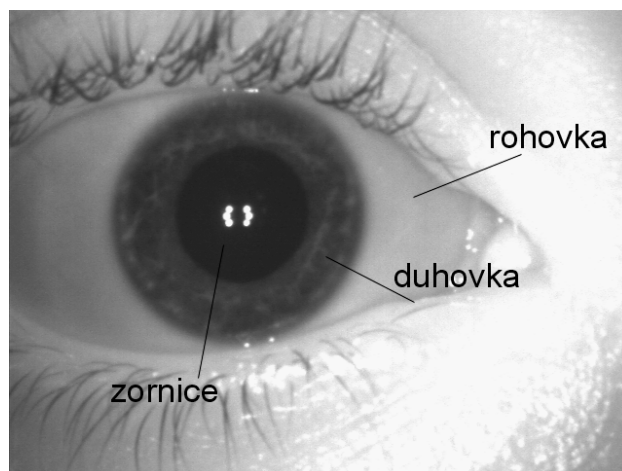
Místo největší hustoty čípků na sítnici (a tedy i místo, kde vidíme nejostřeji) se nazývá **žlutá skvrna**, nachází se v optické ose čočky. Nervové spojení všech tyčinek a čípků se spojuje do **očního nervu**, který opouští sítnici v místě **slepé skvrny**, na jediném místě sítnice, které neobsahuje žádné tyčinky ani čípky.

Pro účely biometrické analýzy oka jsou nejdůležitější příznaky, kterých můžeme dosáhnout bez fyzického poškození oka. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, jedná se o snímek oční duhovky a snímek sítnice (potažmo snímek cév v sítnici se nacházejících). Vzhledem k zaměření této práce se budeme podrobněji zabývat anatomii duhovky.

Ilustrační snímek duhovky můžete nalézt na obrázku 4.2. Jak může čtenář vidět, jedná se o kruhovou část oka s vláknitou strukturou. Viditelná přední část je tvořena předním listem (stromou), který se sestává z kolagenních, elastických a svalových vláken protkaných cévami. Uspořádání vláken odpovídá uspořádání cév a je protkáno prohlubněmi – lakunami a kryptami [hist].

Uprostřed duhovky se nachází průhledné místo – zornice (zřítelnice, panenka, pupila). Její průměr je řízen dvěma svaly musculus sphincter iridis (zmenšující průměr) a musculus dilatator iridis (zvětšující průměr), v závislosti na intenzitě dopadajícího světla. Ke změnám průměru zornice dochází reflexivně nebo při požití omamných látek.

Struktura duhovky je formována během třetího měsíce vývoje a je ukončena v osmém měsíci vývoje. Během života se nemění, je snadno přístupná a není ovlivněna vnějšími vlivy (mechanické poškození zasáhne většinou



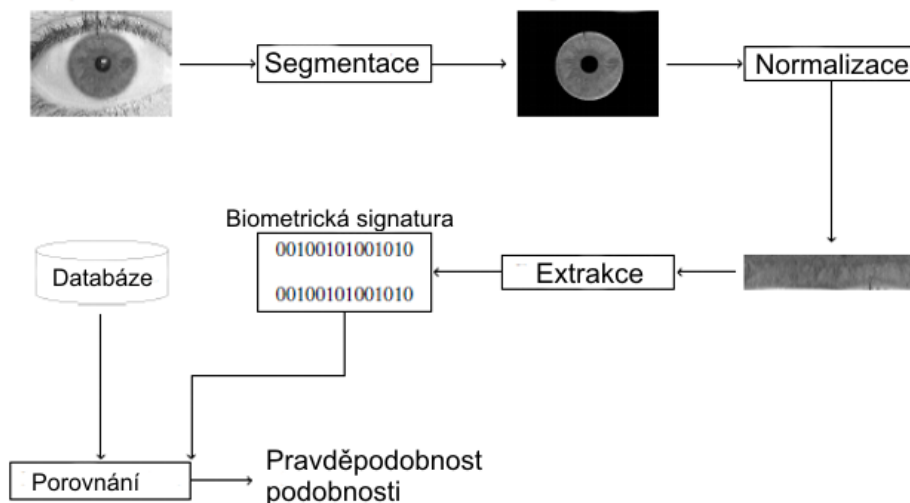
Obrázek 4.2: Přední část oka.

jen rohovku). Studie zabývající se využitím duhovky jako biometrického příznaku uvádějí 266 pozorovatelných příznaků a entropii 3,2 bitu na čtverečný milimetr duhovky [daug1].

4.2 Zpracování snímků oční duhovky

Analýza oční duhovky je komplexní proces sestávající typicky ze čtyř částí: segmentace, normalizace, extrakce příznaků a porovnávání příznaků (viz obrázek 4.3). Podobně jako u rozpoznávání jiných objektů (písma, hlasu atp.) se jednotlivé metody liší implementací zmíněných kroků zvolených pro dosažení optimálních výsledků.

Každá z těchto částí vyžaduje aplikaci speciálních metod a postupů. Kombinací různých postupů vzniklo několik nejznámějších komplexních metod pro analýzu oční duhovky, které se používají v komerční sféře. Kupodivu se stále používají původní postupy vyvinuté Daugmanem [daug] na počátku 80. let 20. století.



Obrázek 4.3: Postup při biometrické analýze oční duhovky. Převzato z literatury [mart] a upraveno.

4.3 Předzpracování snímku

Snímek získaný ze snímače obsahuje množství artefaktů (šum, barevná nejednotnost, rozmazání), které ztěžují následný proces zpracování snímku. Některé zdroje nepovažují předzpracování za část zpracovávajícího řetězce, předpokládají ideální snímek bez jakýchkoliv chyb. Vhodná úprava snímku v počáteční fázi však může zvýšit spolehlivost celého systému.

Prvním krokem, pokud snímač vytváří barevné snímky, je převod barevného obrázku do šedotónové palety. Tímto krokem zmizí drobné odchylky v barevných tónech, způsobené CCD snímačem. Jednotlivé světlocitlivé prvky nikdy nezaznamenají stejný odstín, i když jsou zaměřeny na stejný bod. Dále pro efektivnější zvýraznění hran je nutno normalizovat barevné spektrum snímku (nezaměňovat s jinou sekcí této kapitoly nazvanou taktéž normalizace).

4.3.1 Normalizace šedotónové variace

Pro normalizaci šedotónové variace [proc] (rozptyl hodnot obrazových bodů od jejich průměru) nepracujeme s celým snímkem, ale s nepřekrývajícími se bloky, na které musíme snímek rozdělit. Celý snímek nemusí mít stejnou strukturu, jsou na něm místa s malou variací (nejčastěji pozadí) a místa s velkou variací (hledané objekty).

Pro každý blok o velikost W ze snímku Im si spočteme průměrnou hodnotu jasu M a variaci V podle vztahů:

$$M = \frac{1}{W^2} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{W-1} Im(i, j)$$

$$V = \frac{1}{W^2} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{W-1} (Im(i, j) - M)^2$$

Normalizovaný obraz poté vypočteme podle vztahu

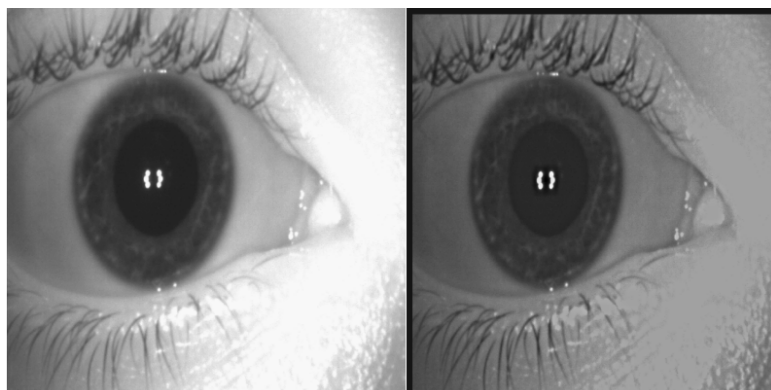
$$N(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{V_0}{V}}(Im(i, j) - M)^2; & \text{pro } Im(i, j) > 0 \\ M_0 - \sqrt{\frac{V_0}{V}}(Im(i, j) - M)^2; & \text{jinak} \end{cases}$$

kde $N(i, j)$ je normalizovaná šedotónová hodnota pixelu (i, j) , $Im(i, j)$ je hodnota pixelu v původním snímku, M střední hodnota v daném bloku, V variace daného bloku, M_0 požadovaná střední hodnota a V_0 je požadovaná variace. Na obrázku 4.4 je ukázka výsledku celého procesu. Vlevo původní snímek, vpravo po provedení šedotónové normalizace.

4.3.2 Ekvalizace snímku a redukce úrovní jasu

Metoda sestávající se z dvou kroků, která dosahuje dobrých výsledků ve zvýrazňování hran objektů. Prvním krokem je ekvalizace histogramu snímku, abychom docílili rovnoměrného rozložení hodnot jasů. Druhým krokem je redukce počtu jasových úrovní ve snímku.

Ekvalizace histogramu snímku [russ] je používána pro zvýšení lokálního kontrastu, pokud máme ve snímku blízké hodnoty jasu. Celý proces



Obrázek 4.4: Ukázka snímku po provedení metody normalizace šedotónové variace. Vlevo je původní snímek, vpravo upravený.

je jednoduchý a výpočetně nenáročný. Vycházíme z histogramu snímku, který není rovnoměrně rozložený a jeho hodnoty jsou v rozsahu $< 0; 1 >$. Z něj si vypočteme histogram kumulativní:

$$c(i) = \sum_{j=0}^i p(x_j),$$

kde $p(x_j)$ je hodnota sloupce histogramu pro jas s indexem j . Dále potřebujeme funkci transformující stávající hodnotu jasu tak, aby byl histogram nově vzniklého snímku co nejrovnoměrněji rozložen. Díky malému počtu jasových úrovní se tato funkce definuje nejčastěji tabulkou, jejíž hodnoty určíme podle vztahu:

$$y_i = c(i)$$

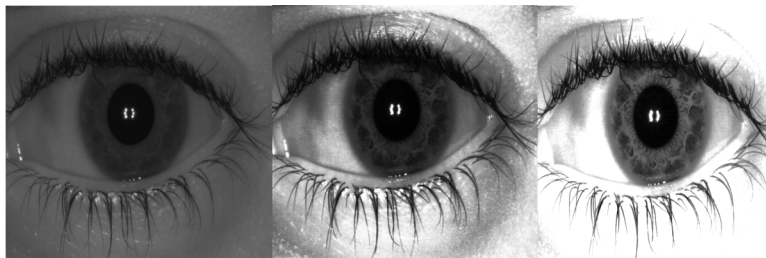
Nakonec transformujeme hodnotu jasu z hodnot o rozsahu $< 0; 1 >$ do plného rozsahu jasů (rozsah $< min; max >$) užitím vztahu:

$$\hat{y}_i = y_i(max - min) + min$$

Tímto postupem získáme snímek s rovnoměrně rozloženými hodnotami jasů a s vyšším kontrastem. Jako druhý krok snížíme počet úrovní jasů. Tento postup je jednoduchý, určíme si pouze počet úrovní a metodu redukce. Pro počet úrovní p a metodu redukce k nižšímu prahu získáme novou hodnotu jasu dle vztahu:

$$\hat{y}(x, y) = floor\left(\frac{IM(x, y)}{p}\right)$$

Na obrázku 4.5 je zobrazen výsledek celého procesu. Vlevo je původní snímek, uprostřed naleznete snímek po provedení metody ekvalizace histogramu a vpravo se nachází výsledek celého procesu.



Obrázek 4.5: Výsledky jednotlivých kroků předzpracování. Vlevo je původní snímek, uprostřed naleznete snímek po provedení metody ekvalizace a vpravo se nachází výsledek celého procesu.

4.4 Segmentace

Účelem segmentace je zjistit, kde se nachází duhovka a zřítelnice. Kvůli aplikaci výpočetně složitých transformací se jedná o jednu z nejpomalejších částí analýzy. Pro vlastní zjištění, kde se nachází duhovka (popřípadě zřítelnice), musíme zjistit všechny hrany nacházející se v obrázku. Pro detekci hran existuje několik algoritmů, použitelných pro zpracování obrazů v reálném čase. Nejpoužívanější jsou Canneho a Sobelův detektor hran, oba jsou založeny na zkoumání gradientu sousedních pixelů. Canneho detektor lze lépe nastavit pro konkrétní případy, Sobelův oproti tomu detekuje spolehlivěji ale je citlivější na šum.

Jakmile vyhledáme ve snímku hrany, aplikujeme postupy pro detekci jednoduchých geometrických obrazců ve snímku. Většina těchto postupů prochází postupně všechny nalezené hrany a testuje, jestli jejich kombinace nevytvářejí daný obrazec. Pro výpočetní náročnost takového postupu jsou v praxi využívány jejich modifikace, založené na heuristických postupech.

4.4.1 Sobelův detektor hran

Jeho fungování je založeno na Sobelovu operátoru [im], který tvoří dvě matice. Tento operátor lze chápat jako gradientní přechod zleva doprava a shora dolů. Vlastní operátor tvoří dvě matice rozměru 3x3, které jsou zpracovávány pomocí konvoluce s původním obrázkem. Jedná se o tyto dvě matice

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A; G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * A,$$

Kde G_x je matice pro aproximaci derivace v ose x (směr zprava doleva), G_y matice pro aproximaci derivace v ose y (směr shora dolů), a A je matice původního obrázku. Pro každý bod obrázku můžeme vypočítat gradient podle vztahu:

$$\Phi = \arctan \frac{G_y}{G_x}$$

Hodnoty tohoto gradientu v jednotlivých bodech nám posléze udávají možnost výskytu hrany; čím je hodnota větší, tím je přechod ostřejší a opačně. Pro případné citlivější nastavení je nutné nastavit jiné hodnoty v maticích Sobelova operátoru, které tak budou zkoumat větší úhel gradientu. Obecně je tento detektor citlivější na šumy a ruchy v obrázku, které může způsobit zařízení digitalizující obraz (scanner, digitální fotoaparát).

4.4.2 Canneho detektor hran

Princip Canneho detektoru hrany byl poprvé publikován matematikem Johnem F. Cannyem v roce 1986 [canny]. Detektor je podobně jako předchozí Sobelův založen na zkoumání gradientů vedle sebe ležících pixelů. Na rozdíl od Sobelova operátoru filtruje matici obrázku lépe nastavitelným operátorem, založeným na první derivaci Gaussovy funkce. Tím by měl ignorovat drobné šumy v obrázku a detekovat pouze hrany. Změnou šířky jádra Gaussovy funkce navíc můžeme regulovat pravdivost (jestli je získaná hrana opravdu hranou a ne jen šumem) získané hrany, tj. porovnáme gradient u většího počtu sousedů a získáme větší jistotu o existenci hrany.

Matice s hodnotami první derivace Gaussovy funkce je použita jako filtr, který je pomocí konvoluce zpracován s původním obrázkem. Pro příklad matice o rozměru 5x5 pro Gaussovu funkci s jádrem $\sigma = 1,4$ vypadá následovně:

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} * A$$

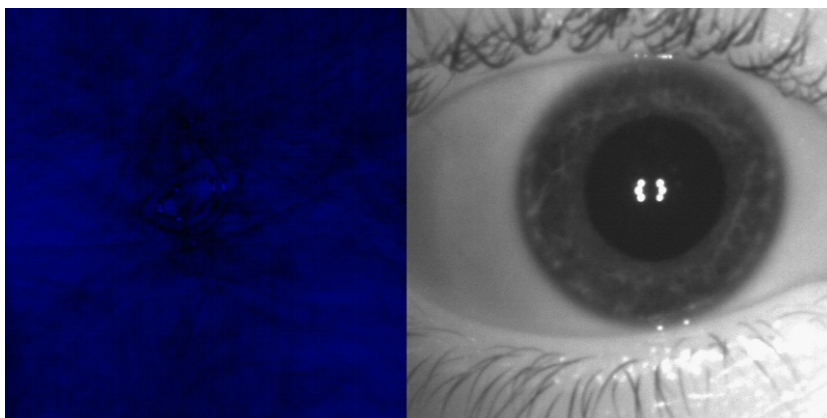
Protože gradient může směřovat v rozličných směrech, používá Canneho detektor hran čtyři filtry, každý pro detekci v horizontálním, vertikálním a po obou diagonálních směrech. Výsledkem je bitová mapa gradientů, tedy potenciálních hran. Pro vyhodnocení výsledku je možné použít prahování s hysterezí. Větší rozsah získaných gradientů umožňuje lépe zvolit vhodnější hrany. Určí se konstanty určující horní a dolní hranici hystereze (číselné hodnoty gradientů) a do výstupu se použijí pouze ty hodnoty, které se nachází mezi hodnotami těchto konstant. Bohužel určení těchto hodnot a hodnot pro Gaussov filtr není triviální. Zároveň je to však mocný nástroj, který činí Canneho detektor hran mnohem použitelnějším, pokud se podaří experimentálně nastavit správně jeho parametry.

4.4.3 Houghova transformace

Houghova transformace (dále jen HT), prvně publikována v roce 1959 [hough], tvoří nejobecnější postup, jak najít v obrázku geometrická primitiva (čáry, kruhy atp.). Pro účely analýzy oční duhovky popíše kruhovou HT, která, jak z názvu vyplývá, detekuje kružnice.

Základní princip této metody spočívá v průchodu celým obrazovým prostorem a porovnáváním tam se nacházejících bodů s určitým obrazem vzoru, který chceme najít (kružnicí). Z takto nalezených množin bodů vybírá maxima, která značí největší pravděpodobnost výskytu daného obrazce (kružnice), v případě vykreslení výsledné transformace (viz obrázek 4.6) představují tato místa výskytu nejtmaší body.

V případě kruhové HT hledáme kružnice definované vztahem $x^2 + y^2 - r^2 = 0$. Pokud však hledáme nejpravděpodobnější výskyt všech kruž-



Obrázek 4.6: Vlevo je vykreslen Houghův prostor, vpravo se nachází původní snímek. Tmavé body v levém snímku značí pravděpodobný výskyt kružnice.

nic o všech možných poloměrech, je složitost tohoto algoritmu $O(n^3)$. Detekce je však spolehlivá a funguje i pro části kružnic. Bohužel výpočetní složitost ztěžuje nasazení této metody na starších a pomalejších strojích. Tento nedostatek jde v dnešní době částečně kompenzovat masivní paralelizací tohoto výpočtu, např. přenesením výpočtu na GPU.

Dalším problémem kruhové HT je výpočet bodů kružnice, která je vyhledávána. Klasický přístup s výpočtem souřadnic pomocí goniometrických funkcí je příliš pomalý pro výpočet a zvyšuje složitost výpočtu až k $O(n^4)$. Proto se v tomto případě často používají Bresenhamovy algoritmy [bres], navíc jejich použití zaručí možnost využít HT i pro jiné tvary bez újmy na obecnosti. Bresenhamovy algoritmy popisují každý bod v pravoúhlém rastru všech matematicky popsatečných křivek (kružnice, čára, Bezierova křivka, atp.). Vycházejí z matematických rovnic těchto křivek a jejich případné symetrie (v případě kružnice jsou všechny čtyři kvadranty vykreslovány najednou).

Na Bresenhamových algoritmech je založen algoritmus pro rychlé vykreslování kružnic, tzv. Midpoint algorithm, a defacto všechny algoritmy pro vykreslování elips a Bezierových křivek. Celý kód pro zjištění všech bodů kružnice vypadá následovně (v jazyce C++):


```

int x = -r, y = 0, err = 2-2*r;
do {
  getPixel(xm-x, ym+y); /* I. Kvadrant */
  getPixel(xm-y, ym-x); /* II. Kvadrant */
  getPixel(xm+x, ym-y); /* III. Kvadrant */
  getPixel(xm+y, ym+x); /* IV. Kvadrant */
  r = err;
  if (r > x) err += ++x*2+1;
  if (r <= y) err += ++y*2+1;
} while (x < 0);

```

4.4.4 Daugmanův operátor

Daugmanův operátor je vlastně speciální případ Houghovy transformace. Byl navržen přímo pro Daugmanovu metodu rozpoznávání [daug]. Kvůli citlivosti Houghovy transformace na šum v obrázku (množina náhodných bodů tvořících šum se může tvářit jako body kružnice). Operátor je definován jako

$$\max_{r, x_0, y_0} |G_\sigma(r) * \frac{\delta}{\delta r} \int_{r, x_0, y_0} \frac{l(x, y)}{2\pi r} ds|,$$

kde $l(x, y)$ je matice tvořící obrázek, r poloměr vyhledávané kružnice, $G_\sigma(r)$ Gaussova funkce a s množina bodů tvořícího kruh zadaný parametry r, x_0, y_0 .

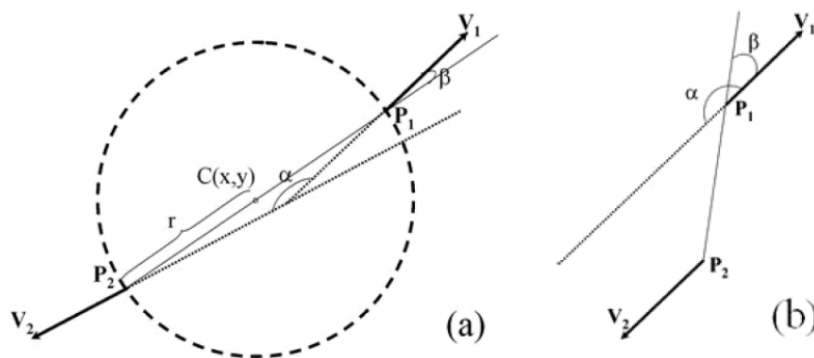
Na rozdíl od Houghovy transformace pracuje s informací první derivace pro nalezení obrazových bodů. Netrpí proto takovou citlivostí na šum jako Houghova transformace. Bohužel pracuje také s hodnotou určitého integrálu, který jde sice vypočítat přesně aplikací numerických metod, avšak tento výpočet je poměrně náročný. Hledání kružnice tak může dosahovat při prohledávání celého obrazového prostoru složitosti $O(n^5)$, protože numerický výpočet integrálu má složitost $O(n^2)$, prohledávání celého obrazového prostoru $O(n^3)$. Jde však optimalizovat snáze než Houghova transformace, z toho důvodu je také využíván v některých metodách analýzy oční duhovky (viz dále).

4.4.5 Metody rychlé detekce

Oba výše zmíněné algoritmy založené na HT jsou však pro většinu snímků nepoužitelné kvůli jejich výpočetní náročnosti. Bylo zveřejněno několik metod, zabývajících se problémem snížení výpočetní náročnosti HT, při zachování (nebo ještě lépe zvýšení) stávající spolehlivosti. Jako nejelegantnější se jeví využití metody gradientního páru vektorů [fcm].

Základní myšlenka této metody rychlé detekce kružnic užitím gradientního páru vektorů (dále jen FCD) vychází z vlastností gradientních vektorů bodů nacházejících se na obvodu kružnice. Pokud uvažujeme tmavý vyplněný kruh na světlém pozadí, tak gradientní vektory směřují vždy ze středu kružnice. Známe-li gradientní vektory (označme si je v_1 a v_2), můžeme určit střed kružnice, pokud dodržíme následující podmínky (pro lepší představu viz obrázek 4.7, který je převzat z [fcm]):

- Úhel svírající (α) v_1 a v_2 je blízký 180 stupňům
- Úhel svírající spojnice základen (β) v_1 a v_2 (tj. průsečíky s kružnicí) by měl být blízký 0 stupňům

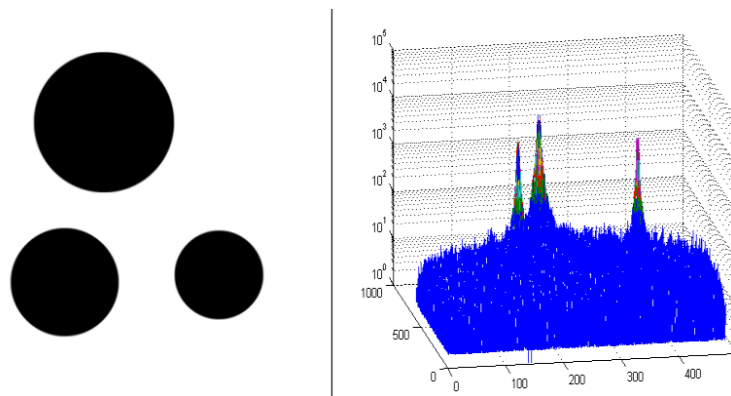


Obrázek 4.7: Podmínky které musí zachovávat vektory v_1 a v_2 . Na obrázku a) jsou podmínky splněny, na b) nikoliv. Převzato z [fcm].

Samotný algoritmus se sestává ze tří kroků (předpokládáme že již máme vytvořen gradientní snímek); nejprve si vytvoříme všechny možné kom-

binace nalezených vektorů tak, aby byly zachovány výše uvedené podmínky. Dále pro každý takovýto pár stanovíme odhadovaný střed kružnice (podle definice by jej měl tvořit průsečík vektorů) a odhadovaný poloměr (ten vypočteme pomocí odhadovaného středu). V této fázi si můžeme dovolit další filtraci zdrojových pokud známe požadovaný poloměr kružnice.

V poslední fázi obdobně jako u HT musíme zvolit kružnici s největší pravděpodobností. Můžeme použít metodu hrubé síly jako u HT, což znamená hledání maxima ve trojrozměrné matici, nebo můžeme uchovávat pro každou dvojici vektorů v_1 a v_2 příznakový vektor obsahující souřadnice středu kružnice a její poloměr. Nejčastěji se vyskytující hodnoty uvažujeme jako kružnici. Ukázku nalezeného prostoru, ve kterém hledáme kružnici, naleznete na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: Vlevo je původní snímek, ve kterém hledáme kružnice. Vpravo naleznete vykreslenou pravděpodobnostní hodnotu nalezených kružnic.

4.5 Normalizace

Je dokázáno, že oční duhovka a zřítelnice nemusí být soustředné [daug]. Toto může být způsobeno samotnou fyziologií člověka nebo vlivem optické deformace, pokud se snímané oko nenachází v optické ose snímače. Nesoustřednost však ztěžuje normalizace získaného obrazu do použitelného vektoru příznaků. V případné existenci soustřednosti by stačilo pouze převodem kartézských souřadnic na polární získat dvourozměrný vektor

libovolné přesnosti, bohužel je třeba použít mírně komplikovanějších metod založených na převodu do jiného souřadného systému. Základní přepis souřadnic je definován jako

$$l(x(r, \Phi), y(r, \Phi)) \rightarrow l(r, \Phi),$$

kde $x(r, \Phi)$ a $y(r, \Phi)$ jsou souřadnice bodu obrázku v kartézských souřadnicích, $l(r, \Phi)$ je souřadnice stejného bodu v polárních souřadnicích. Jednoduchý přepočet lze definovat jako

$$r = (x_0 + r_0 \cos(\Phi_0)); \Phi = (y_0 + r_0 \sin(\Phi_0)),$$

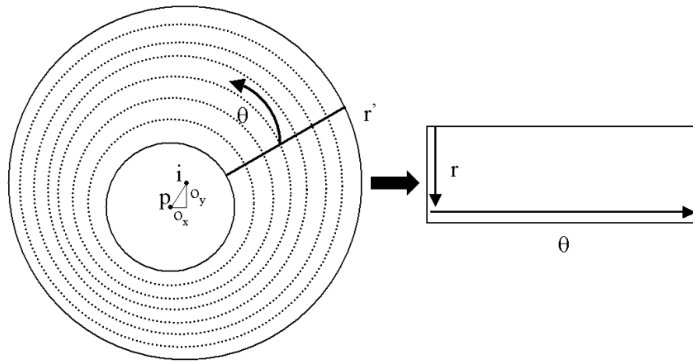
kde Φ_0 je z intervalu $(0; 2\pi)$, r_0 je právě zpracovávaný poloměr. R a Φ jsou výsledné polární souřadnice.

4.5.1 Daugman rubber sheet

Jedna z nepoužívanějších metod normalizace duhovky navržená přímo pro Daugmanovu metodu analýzy oční duhovky byla poprvé publikována v roce 1990 [daug]. Základním principem je převod kruhové oční duhovky z kartézského souřadného systému do polárního souřadného systému, přičemž si poradí i s nesoustředností duhovky a zřítelnice. Tímto krokem získáme z nepoužitelné kruhové oblasti použitelnou pravoúhlou dvourozměrnou matici. Daugman navrhl metodu, která rozdělí duhovku na několik (10) pásů (viz obrázek 4.9). Tyto pásy nejsou soustředné, jejich střed se pohybuje na spojnici střed zřítelnice – střed duhovky. Následným převodem těchto pásů do polárního souřadného systému získáme deset vektorů, které složíme v jednu normalizovanou matici příznaků.

4.6 Extrakce příznaků

Pro extrakci příznaků z normalizovaného vektoru se používají metody analýzy jednorozměrného signálu aplikované na dvourozměrný vektor. Smyslem těchto metod je odstranit šum, řasy a podobné rušivé znaky. Získáme tak jednoznačný vektor příznaků, unikátní pro každého jedince a oční duhovku. Jdou vesměs použít všechny známé metody určené pro zpracování signálu. Uvedená je základní myšlenka několika transformací, které jsou využity dále, v popisu některých komplexních metod analýzy oční duhovky.



Obrázek 4.9: Ukázka principu normalizace oční duhovky pomocí metody Daugman rubber sheet. Převzato z literatury [daug].

4.6.1 Gaborův filtr

Gaborovy filtry představují reprezentaci signálu v prostoru a v závislosti na frekvenci. Je vytvářen modulací sinových a cosinových vln s Gaussovou funkcí. Sinové vlny jsou totiž charakteristické pro frekvenci, použitím modulace Gaussovou funkcí získáme charakteristiku pro prostor. Pro zjednodušení zápisu těchto filtrů se používá exponenciální tvar komplexního čísla, pro příklad 2D-Gaborovy filtry použité pro extrakci příznaků v Daugmanově metodě (viz dále)

$$G(x, y) = e^{-\pi((x-x_0)^2/\alpha^2 + (y-y_0)^2/\beta^2)} e^{-2\pi i(u_0(x-x_0) + v_0(y-y_0))},$$

kde α, β jsou šířka a délka filtru, u_0, v_0 jsou specifikátory modulace a platí pro ně, že frekvence $w_0 = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}$. Ve většině případů se reálná část výše uvedeného komplexního tvaru Gaborových filtrů používá jako vlastní biometrický příznak, reálná část jako doplňující hodnota pro upřesnění v případě dvou podobných porovnávaných příznaků.

4.6.2 Gaussův filtr

Přesněji se jedná o Laplaceův operátor Gaussova filtru definovaného jako

$$F = -\frac{1}{\pi\sigma^4}\left(1 - \frac{\rho}{2\sigma^2}e^{\frac{\rho^2}{2\sigma^2}}\right),$$

kde σ je derivace Gaussovské funkce a ρ je vzdálenost bodu od středu filtru. Získaný normalizovaný vektor příznaků je iterativně segmentován pomocí dolní propusti na dva koeficienty, pro každou dimenzi jeden. Tato reprezentace je posléze použitelná jako jednoznačný biometrický identifikátor.

4.6.3 Vlnková transformace

Vlnková transformace (český překlad z anglického názvu wavelet transform, dále jen WT) je obdobně jako Fourierova transformace používána pro vytvoření frekvenčního popisu signálu s rozdílem, že jsme schopni popsat změnu frekvence v čase. Je tedy vhodná na zpracování nestacionárního signálu. Lze ji využít pro výpočet unikátního příznakového vektoru z biometrických dat oční duhovky [wav].

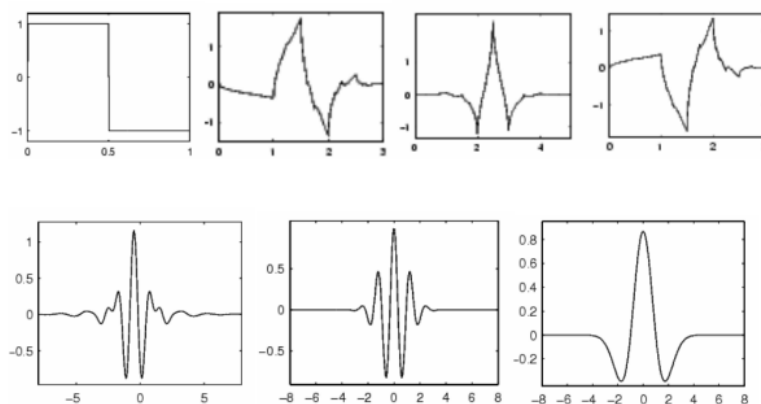
Myšlenkou WT je analýza signálu na jednotlivých úrovních, kde každá úroveň má větší vypovídací schopnost o menším úseku daného signálu a tím i vyšší lokální přesnost. Snažíme se vhodně měnit šířku okénka, abychom lépe zachytili časově-frekvenční změny. Toto proměnné okénko tvoří funkce nazývaná mateřská vlnka

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

kde měřítko (roztážení) je určeno parametrem a , posun je určen parametrem b . Na vlastní mateřskou vlnku jsou kladeny požadavky. Musí mít nulovou střední hodnotu a nenulovou hodnotu musí mít pouze v omezeném intervalu. Ukázky mateřských vlnek naleznete na obrázku 4.10 převzatém z literatury [wav01]

Vlnková transformace spojitého signálu $f(t)$ je definována jako:

$$W_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt.$$



Obrázek 4.10: Příklady mateřských vlněk použitelných vlnkovou transformací. Převzato z [wav01].

Postupnou aplikací tohoto vztahu získáme jednotlivé koeficienty vyjadřující časově–frekvenční popis signálu. Tyto koeficienty jsou dále použitelné jako příznakový vektor.

4.7 Porovnání příznaků

Porovnání příznaků je posledním krokem biometrického systému. Lidská duhovka má unikátní strukturu, kterou není možno zachytit vždy stejně (díky vlivu prostředí, šumu snímače, světelných podmínek, lidského faktoru atp.), počítače však porovnávají velmi přesně bit po bitu. Ačkoliv se snažíme příznakový vektor co nejvíce zobecnit (a neztratili přitom unikátnost pro každou osobu), nikdy nezískáme dvě naprosto stejné hodnoty a musíme se spokojit pouze s vysokou pravděpodobností podobnosti.

Pro porovnání příznaků lze použít několik metod. Efektivita a rychlost zvolené porovnávací metody se liší v závislosti na použité metodě extrakce příznaků. Pro některé metody extrakce stačí použít pouhé porovnání na základě Hammingovy vzdálenosti vektorů, pro další je zase třeba sofistikovanějších porovnávacích algoritmů.

4.7.1 Hammingova vzdálenost

Hammingova vzdálenost (dále jen HD) je nejjednodušší metoda, jak porovnat dva vektory a číselně určit jejich vzdálenost. Udává počet rozdílných prvků vektoru (nebo počet rozdílných bitů ve slově procesoru). Pro svou jednoduchost je HD užívána v řadě odvětví od kódování signálu až po porovnávání příznakových vektorů oční duhovky.

Pro aplikaci HD musí mít oba porovnávané vektory stejnou velikost a stejný datový formát. Dále v rámci zjednodušení výsledku budeme počítat procentuální rozdíl, vydělíme vypočtenou HD celkovým počtem prvků (N). Vzorec pro výpočet hodnoty bude vypadat následovně:

$$HD_{proc} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{porovnavany} XOR X_{vzor}$$

Pro užití v metodách porovnávání příznakových vektorů oční duhovky je HD upravena o posun vzorových vektorů. I když jsou algoritmy pro lokalizaci a normalizaci oční duhovky přesné, vlivem kvantizace a vnějších podmínek (natočení hlavy) mohou snadno vzniknout příznaky posunuté o několik bitů. Pokud bychom měli vektor 101010 posunout o jeden bit, výsledný vektor 010101 by dosahoval největší možné HD (6), i když by se jednalo o jeden a ten samý snímek. Jako možné řešení navrhl Daugman už ve své první publikaci zabývající se problematikou analýzy oční duhovky [daug] metodu založenou na rotaci porovnávaných příznaků.

Jedná se o víceřadkové porovnávání, kdy v každém kroku simulujeme otočení duhovky o dva stupně, celkem tedy 180 kroků na porovnání dvou příznakových vektorů, rotace je simulována bitovým posunem každého řádku příznakového vektoru. Pro jemnější rozlišení není prováděna rotace z důvodů výpočetní složitosti. Získali bychom algoritmus neřešitelný v reálném čase se složitostí $O(N^N)$.

4.7.2 Korelace signálu

Protože získanému příznakovému vektoru během jeho získávání často přistupujeme pomocí metod zkoumání signálu (Fourierova transformace, signálové filtry atp.), můžeme pro jeho porovnání taktéž použít metody, původně určené pro porovnání signálů. Nejpoužívanější je metoda korelace

signálu. Výsledkem korelace je číslo určující stupeň podobnosti dvou signálů, je definována jako:

$$R_{f,g}(t) = \int f^*(\tau)g(t + \tau)d\tau = \int f^*(\tau - t)g(\tau)d\tau,$$

kde proměnná t určuje časový posun signálu. Pro analýzu oční duhovky je dále využívána modifikace zvaná autokorelace[cor], která určuje periodicitu signálu (jak je signál podobný sám sobě) a pomůže nám určit rotaci vzoru oproti porovnávanému obrazu. Nejčastěji je využívána autokorelace prvního řádu (tj. první prvek s druhým, druhý se třetím atd.), autokorelaci k -tého řádu definujeme jako:

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

4.8 Metody analýzy oční duhovky

Na základě výše uvedených a popsáných kroků bylo vytvořeno mnoho metod řešících komplexní problematiku analýzy oční duhovky. Mnoho těchto algoritmů je použito v komerční sféře a není známa jejich konkrétní podoba (např. poslední objevy pana Daugamana jsou přísně střeženy). Pro přehled uvádím několik metod, které byly zveřejněny a které jsou v praxi využívány.

4.8.1 Daugmanova metoda

Daugmanova metoda je podrobně popsána v literatuře [daug]. Pro výše popsané části procesu zpracování snímku duhovky je využíván následující postup:

- Pro segmentaci duhovky navrhl autor vlastní integračně–diferenciální operátor, který hledá maximální diferenci mezi průměrnými hodnotami jasu. Tento operátor byl popsán výše.
- Po segmentaci duhovky a zřítelnice je pro normalizaci použit proces převodu z kartézských na polární souřadnice, známý jako Daugman rubber sheet method. Opět byl podrobněji popsán výše.

- Pro extrakci příznaků jsou použity Gaborovy dvourozměrné filtry.
- Pro porovnání vektorů příznaků je v této metodě zvolena Hammingova vzdálenost. Výpočet probíhá pomocí funkce XOR. Hledáme minimální hodnotu HD pro každé dva vektory, uložené v databázi pro porovnávání.

4.8.2 Wildesova metoda

Wildes popsal specifickou metodu [wild], vhodnou pro automatické zpracovávání, která je založena na třech částech – pořízení snímku, lokalizace duhovky a porovnání.

- Pořízení snímku považuje autor za nejnáročnější část celého procesu automatického rozpoznávání oční duhovky. Tuto obtížnost zdůvodňuje tím, že pro bezchybný chod potřebují rozpoznávací algoritmy snímky s dostatečným rozlišením, jasem a ostrotí. Pořízený snímek musí být vycentrován vzhledem ke středu duhovky, musí být potlačeny veškeré obrazové artefakty (světelné odrazy a optické deformace). Kvůli těmto podmínkám požaduje autor pořizování snímků co možná nejkvalitnější optikou s průměrem alespoň 80 mm a na vzdálenost maximálně 20 cm. Tyto hodnoty určil autor experimentálně.
- Lokalizaci duhovky autor rozdělil do dvou částí. Nejprve vytvoří binární mapu hran, založenou na zkoumání gradientu pomocí dvourozměrné Gaussovy funkce (metoda podobná Canneho detektoru hran). Pro detekci vlastního tvaru duhovky a zřítelnice je v této metodě použita Houghova kruhová transformace s metodou potlačení vlivu řas.
- Extrakce příznaků je provedena v několika krocích. Nejprve je vektor "zarovnán" vhodně zvolenými mapovacími funkcemi, pro potlačení změn způsobených translacemi a rotací jednotlivých markantů ve snímku, také je pomocí této funkce převeden kruh tvořící duhovku na dvourozměrnou matici příznaků. Následuje samotná extrakce příznaků pomocí Laplaceova operátoru Gaussova filtru popsaného výše.
- Porovnání příznaků je provedeno postupnou korelací mezi všemi položkami databáze a právě získaným příznakovým vektorem. Vý-

sledek, pravděpodobnost, je vyhodnocen užitím Fisherova lineárního diskriminantu jako odpověď ANO/NE.

4.8.3 Maova metoda

Jedna z novějších metod, navržena pány Li Maem, Tieniuem Tanem, Dexinem Zhangem, a Yunhongem Wangem [ma]. Jedná se o metodu poskládanou z již známých a osvědčených částí, které byly použity v metodách předchozích. Metody analýzy jsou následující:

- Lokalizace oka je podobně jako u výše popsané Widesovy metody založena na vytvoření binární mapy hran a následně na vyhledávání kružnic Houghovou transformací.
- Pro normalizační proces použili autoři stejnou metodu jako použil Daugman ve své metodě, Daugman rubber sheet method. Je použita primárně kvůli potlačení různého roztažení zřítelnice v závislosti na osvětlení a denní době.
- Čištění obrazu, v této metodě je použit mezikrok, který má sjednotit nejednotný jas a nízký kontrast získané duhovky. Pracuje na principu odečtení průměrného jasu pozadí pro malé bloky snímku (32x32 pixelů).
- Pro extrakci příznaků konstruuje autor množinu jednorozměrných signálů založených na WT.
- Pro porovnání příznakových vektorů je použita Hammingova vzdálenost.

5 Použité snímací zařízení

Pro potřeby této diplomové práce mi byla zapůjčena kamera VistaFA2 pro snímání oční duhovky. V této kapitole je uveden její stručný popis, jak technického vybavení, tak i k této kameře přiloženého programového vybavení.

5.1 Použitá kamera

Kamera VistaFA2 od výrobce a dodavatele **Vista Imaging Incorporated** (<http://www.vistaimaging.com>), patří ke kombinovaným zařízením umožňujícím snímat obličej nebo oční duhovku. Tato kamera patří k menším (9,4 x 9,4 x 5,4cm) a levnějším zařízením na trhu, pro účely snímání a následné analýzy duhovky však plně postačuje a je i podporována mnoha komerčními aplikacemi. Svým designem pláště (viz obrázek 5.1) je kamera určena především pro vestavbu do zdi, je však také vybavena normalizovaným závitem pro umístění na fotografický stativ. Podrobné technické specifikace naleznete v datovém listu dodávaného výrobcem¹.

Vlastní zařízení se po připojení k počítači chová jako klasická webová kamera obsahující dva režimy snímání (tvář a oko). Pro vlastní snímání obsahuje v jednom objektivu dva CCD snímače. Jeden s rozlišením 3M pixely (2048 x 1536) a možností snímat obrázek v 24 bitové barevné hloubce. Druhý snímač tvoří CCD snímač standardu VGA (640 x 480), který pořizuje snímky ve 256 stupních šedé. Pro účely snímání oční duhovky je používán druhý snímač. Oba snímače mají pevnou ohniskovou vzdálenost. S počítačem nebo jiným vyhodnocovacím zařízením komunikuje přes rozhraní USB, nalézajícím se na boku pláště kamery.

Pro usnadnění snímání umožňuje firmware kamery pořizovat snímky automaticky. Tento režim je však aktivovatelný jen v případě vyfotografování oční duhovky. Pro tyto účely obsahuje přední část kamery detektor vzdálenosti (viz obrázek 5.1), pro měření vzdálenosti. Vzdálenost oka od kamery se následně zobrazí tříbarevnou LED diodou. Modrá barva značí, že je oko od kamery příliš daleko, červená naopak označuje přílišnou blízkost oka ke kameře. Zelená barva určuje správnou vzdálenost a pozici oka

¹<http://www.vistaimaging.com/pdf/VistaFA2%20DATA%20BRIEF-I.pdf>

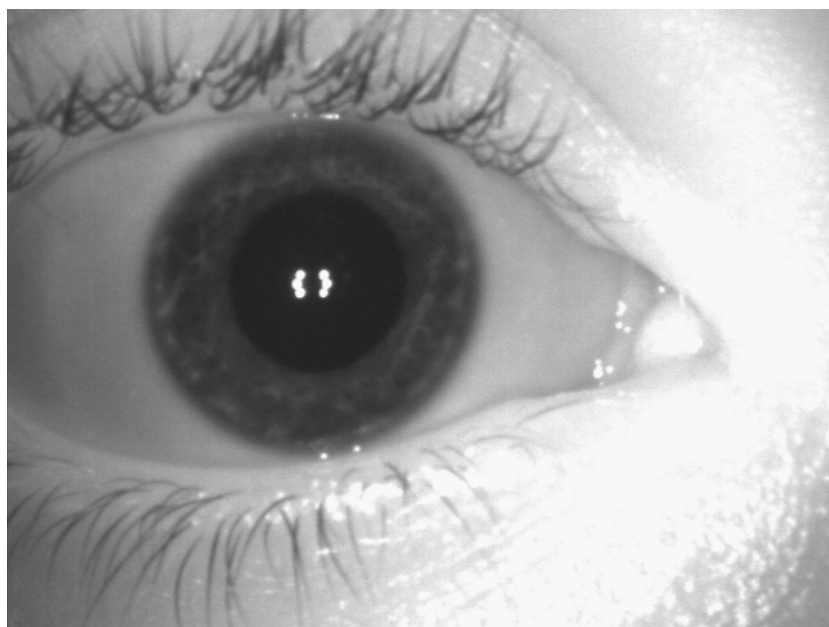


Obrázek 5.1: Přední část snímače oční duhovky. 1–Optika a vlastní CCD snímače 2–zrcátko 3–měřič vzdálenosti 4–Bílá LED dioda nahrazující blesk 5–Infračervené LED diody pro přísvit v módu snímání oční duhovky

vzhledem ke kameře; pokud snímaná osoba vydrží nehnutě po dobu kolem 250 ms v této vzdálenosti, je pořízen snímek oka a jeho nejbližšího okolí (viz obrázek 5.2).

Další prvky v přední části kamery tvoří zrcátko pro kontrolu pozice snímaného oka (mělo by být přibližně ve středu zrcátka), vysoce svítivá LED dioda nahrazující blesk v režimu snímání tváře a dva segmenty vyzařující infračervené světlo. Tyto dva segmenty svítící v rozsahu infračerveného spektra (IR) nahrazují blesk při pořizování snímku oční duhovky. IR osvětlení je použito jednak aby nebyla snímaná osoba oslepena a zadruhé tento způsob osvětlení zabezpečuje stabilní světelné podmínky při pořizování snímku a zabraňuje vzniku nechtěných odlesků.

V zadní části kamery se nachází pouze reproduktor (piezoměnič) reprodukcující maximální frekvenci 16KHz, který při focení vydává zvuk podobný závěrce fotoaparátu aby byl uživatel informován o pořízení snímku.



Obrázek 5.2: Snímek pořízený pomocí zapůjčeného snímače.

6 Zvolené řešení

V této kapitole je popsána implementace softwaru pro extrakci a vyhodnocení biometrických příznaků oční duhovky (dále jen biometrický systém). Celý systém je založen na metodách uvedených ve čtvrté kapitole, z nichž byly zvoleny takové, aby byl systém výkonný co se výpočetní náročnosti týče a aby minimalizoval FAR.

Funkce systému je rozdělena na několik kroků, jak je popsáno ve čtvrté kapitole. Jedná se o tyto kroky (jedná se o hrubý popis funkce, podrobnější popis naleznete v následujících podkapitolách):

1. pořízení snímku
2. zpracování snímku
3. volitelně – uložení do databáze
4. nalezení shody s daty uloženými v databázi

6.1 Pořízení snímku

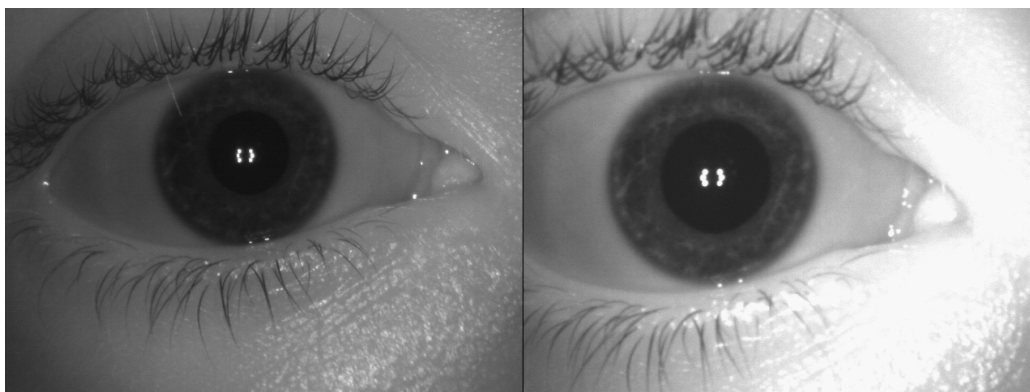
Podobně jako u výše zmíněné *Wildesovy metody* považujeme pořízení snímku za důležitý krok celého procesu analýzy oční duhovky, ale zároveň jsme si vědomi, že při automatickém pořizování bez kontroly operátora není možné dodržet všechny podmínky. Snímek pořízený kamerou má pevně dané rozlišení 640x480 pixelů, jeho další parametry (kontrast, jas atp.) jsou ovlivněny podmínkami, které byly stanoveny takto:

1. Předem daná vzdálenost oka od snímače
2. Předem daný minimální jas snímku
3. Předem daná pozice oka ve snímku

Ad 1: Dodržení tohoto kroku je umožněno snímačem použitým při této práci. Jak bylo zmíněno v páté kapitole, snímač obsahuje detektor vzdálenosti využívaný pro možnost automatického snímání. Tato vzdálenost

byla naměřena v rozmezí 30 – 40 cm a pro účely definice první podmínky byla stanovena na 35 cm od snímače. Definovaná vzdálenost zaručuje ostrost snímku a velikost duhovky v pevně daném rozmezí (experimentálně zjištěn poloměr 110 – 130 pixelů). Znalost přibližného poloměru umožňuje odladění algoritmů detekujících duhovku a zornici.

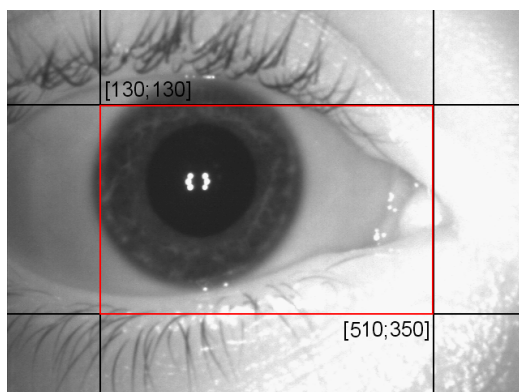
Ad 2: Tato podmínka je stanovena pro vytvoření nejlepšího možného kontrastu ve snímku. Použitý snímač sice obsahuje přísvit pomocí LED diod, bohužel intenzita tohoto osvětlení není dostačující. Pro účely této práce bylo sestaveno primitivní přisvětlení obsahující další LED diody vyzařující v infračerveném spektru, celkem 10 svítivých diod o celkovém výkonu 200mW s vlnovou délkou 940nm. Rozdíl v kontrastu pořízených snímků naleznete na obrázku 6.1, vlevo bez přísvitu, vpravo s přísvitom.



Obrázek 6.1: Vlevo je snímek pořízený bez dodatečného přísvitu, vpravo se nachází snímek přisvětlený dodatečnými LED diodami. V pravém snímku je pozorovatelný vyšší kontrast duhovky vzhledem k okolí.

Ad 3: Pro zvýšení spolehlivosti a snížení času potřebného na výpočet byla určena oblast, ve které se může nacházet oční duhovka. Tato oblast je stanovena vzhledem k podmínce č. 1, která nám určuje i její poloměr. Oblast tvoří výsek snímku o rozměrech 380x220 pixelů, viz obrázek 6.2.

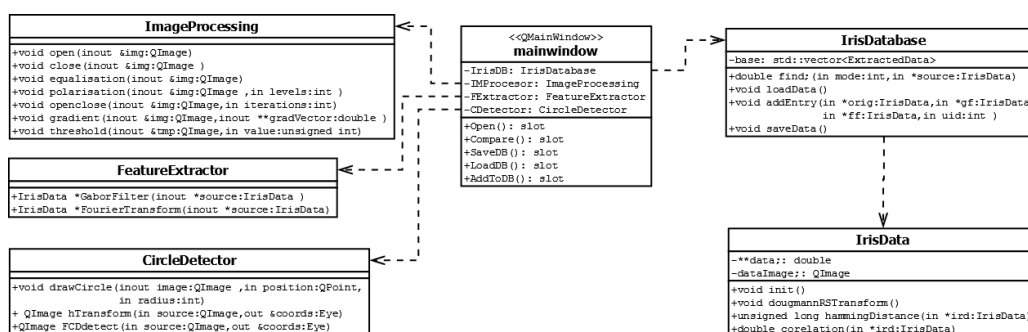
Na základě těchto hodnot je automaticky rozhodnuto o zpracování snímku. Splnění bodu jedna je záležitost umístění snímače, popřípadě obsluhy snímače. Plnění druhé podmínky je testováno během zpracování v prvním kroku analýzou histogramu snímku. Kontrola platnosti třetího kritéria probíhá při vyhledávání hranic duhovky.



Obrázek 6.2: Oblast, ve které se musí nacházet střed hledané duhovky, je zarámována červeně.

6.2 Implementace

Pro implementaci biometrického systému byl zvolen jazyk C++ kvůli snazším operacím s pamětí a dostupnosti rychlých knihovných funkcí pro Fourierovu transformaci. Výsledný program je rozdělen na několik modulů (tříd), které jsou určeny pro jednotlivé kroky analýzy oční duhovky, popsané ve čtvrté kapitole. Na obrázku 6.3 naleznete UML diagram implementovaného systému. Podrobná programátorská dokumentace včetně popisu atributů a metod tříd se nachází v příloze B.



Obrázek 6.3: UML diagram implementovaného biometrického systému.

Pro zpracování snímku byly zvoleny kroky, které snímek nejlépe připraví pro metodu FCD zmíněnou ve čtvrté kapitole. Kompletní řetězec zvolených metod je následující:

1. ekvalizace histogramu

2. snížení počtu jasových úrovní
3. prahování
4. otevření a uzavření
5. detekce hran (Sobelův operátor)
6. FCD (detekce okrajů duhovky)
7. prahování
8. otevření a uzavření
9. detekce hran (Sobelův operátor)
10. FCD (detekce zornice)
11. Daugamn rubber sheet
12. filtrace Gaborovými filtry
13. Fourierova transformace
14. výpočet korelačních koeficientů a jejich porovnání

Zmíněné metody jsou buď popsány ve čtvrté kapitole nebo jsou obecně známé. *Ekvalizace histogramu* nám pomůže sjednotit jas všech pixelů a následnou aplikací metody polarizace získáme vysoce kontrastní snímek, který v ideálním případě bude obsahovat pouze soustředné kružnice duhovky a zornice. Algoritmy otevření a uzavření (open and close) odstraní ve snímku většinu šumu a řasy.

Prahováním kontrast ještě zvýšíme a usnadníme tím detekci hran a následnou detekci kružnice užitím algoritmu FCD. Pro minimalizaci chyb zaviněných chybnou detekcí je zornice hledána uvnitř oblasti nalezené duhovky. Tato oblast je prahována na jinou hodnotu než při hledání duhovky pro zvýšení kontrastu a spolehlivosti algoritmu. Celá detekce není prováděna v jednom kroku kvůli nižší spolehlivosti, tj. pokud by nebyla chybně nalezená zornice uvnitř duhovky, vyžadoval by výpočet další iterace.

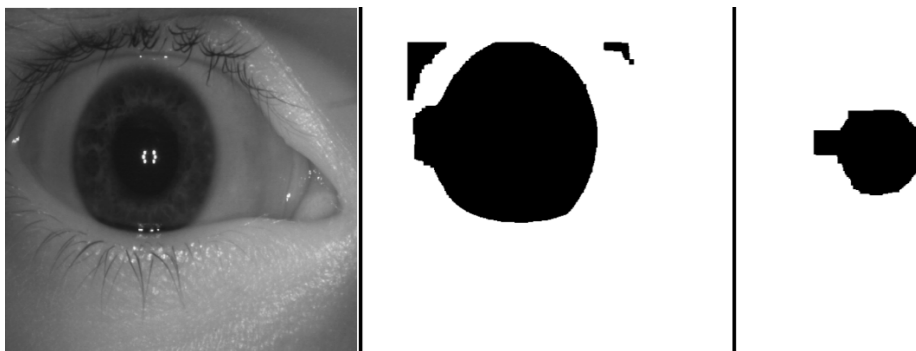
Užitím algoritmu *Daugman Rubber sheet* je nalezená duhovka normalizována na matici velikosti 256x64 hodnot, podobně jako u metody pana Daugmana (80x20), velikost extrahovaného příznaku je zvolena pro zvolenou metodu extrakce příznaků. Tato matice je filtrován Gaborovými filtry

a jako příznak je použito spektrum, které získáme dvoudimenzionální Fourierovou transformací, tj. matice o rozměrech 128x32 hodnot, které jsou vypočteny jako magnituda reálných a imaginárních koeficientů Fourierovy transformace, tj. $m = \sqrt{r^2 + i^2}$.

6.2.1 Předzpracování snímku

Předzpracování snímků bylo zvoleno záměrně tak, aby jednoznačně vynikly hledané objekty (zornice a duhovka). Na základě testů se osvědčil řetězec metod ekvalizace histogramu snímku, redukce jasových úrovní ve snímku, prahování a nakonec pro redukci řas a grafických artefaktů (vzniklých šumem ve snímku) otevření a uzavření snímku. Všechny tyto metody byly popsány ve čtvrté kapitole.

Pro snímky pořízené snímačem popsaným v páté kapitole se ukázala postačující redukce na 32 jasových úrovní. Zornice byla zvýrazněna na číselně nejnižší úrovni jasu, oční duhovka se oddělovala od pozadí při prahování na úrovni osmé. S takto upravenými snímky je systém schopen detekovat duhovku a zornici daleko spolehlivěji (viz sedmá kapitola). Ukázka předzpracování snímku je uvedena na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Předzpracování snímku ve vytvořeném biometrickém systému. Vlevo se nachází původní snímek, uprostřed je snímek předzpracovaný pro detekci duhovky, vpravo je snímek upravený pro detekci zornice.

6.2.2 Segmentace

Pro segmentaci byla zvolena modifikovanou metodu FCD, která je popsána ve čtvrté kapitole. Modifikace původní metody FCD spočívá v úpravě algoritmu vybírajícího jednotlivé dvojice vektorů. V původním návrhu FCD jsou vybírány pouze ty dvojice, které splňují podmínky vzájemné orientace a pozice (viz kapitola 4.4.5). Ukázalo se, že tato metoda selhává při pokusech detekovat nedokonalé a částečné kružnice.

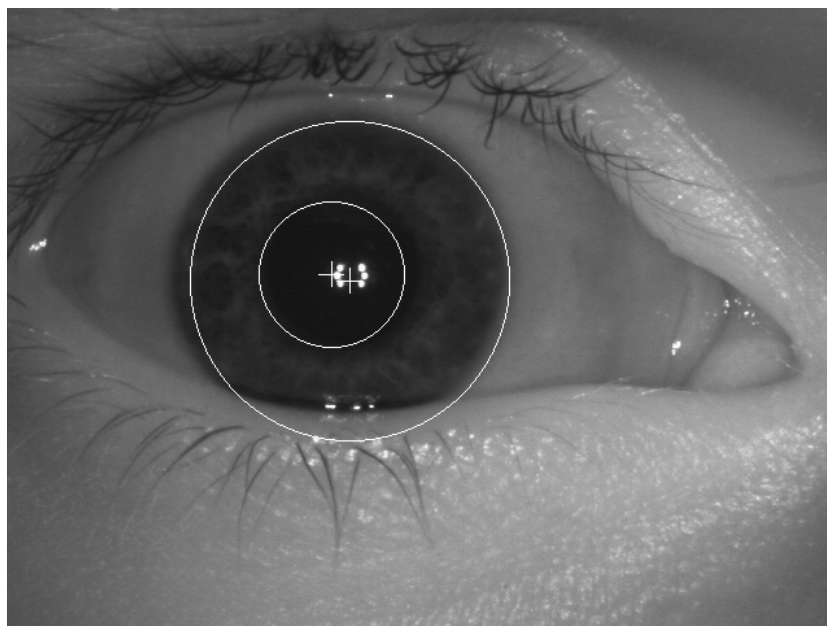
Pro účely implementace biometrického systému jsou generovány všechny kombinace dvojic vektorů, jejichž množství dále redukuje pro snížení výpočetní náročnosti dvěma metodami. První metoda redukce spočívá v použití šedesáti procent všech nalezených vektorů, v sedmé kapitole naleznete porovnání spolehlivosti a rychlosti detekce pro rozdílná množství použitých dvojic vektorů. Vektory jsou vyřazovány na základě generátoru náhodných čísel s rovnoměrným rozložením generovaných čísel.

Druhá metoda slouží pro redukcii generovaného prostoru možných kružnic. Tady musí nalezené kružnice splňovat několik podmínek:

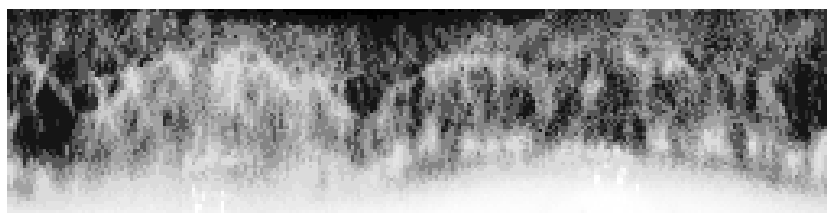
- Střed kružnice se nachází v oblasti definované v předchozí sekci (viz obrázek 6.2)
- Střed kružnice musí být v oblasti snímku s černou barvou
- Poloměr kružnice musí být v definovaném intervalu (podrobně v sekci o pořizování snímku)

Modifikace původní metody FCD, redukující množinu dvojic vektorů uvedenými metodami, vede ke zvýšení spolehlivosti detekce i pro neúplné kružnice aniž by bylo vykoupeno znatelným zvýšením výpočetní náročnosti. Ukázkou detekované duhovky a zornice naleznete na obrázku 6.5.

Po nalezení duhovky a zornice jsou užitím metody Daugman rubber sheet (viz kapitola 4.5.1) získána biometrická data. Metoda je implementována podle její definice. Získaná biometrická data je možno interpretovat jako obrázek o rozměrech 256x64 pixelů (viz obrázek 6.6).



Obrázek 6.5: Duhovka a zornice detekovaná modifikovaným algoritmem FCD.



Obrázek 6.6: Biometrická data získaná segmentací z oční duhovky.

6.2.3 Extrakce příznaků

Pro extrakci příznaků byla zvolena kombinace dvou metod, které jsou používány v Daugmanově a Wildesově metodě (viz čtvrtá kapitola). Filtrace Gaborovými filtry pro potlačení šumu a zvýraznění struktury oční duhovky je implementována podle definice (viz kapitola 4.6.1) jako filtrační matice o rozměrech 5×5 . Filtr je aplikován na získaná data, náběh filtru je řešen cyklickým doplněním v horizontálním směru (předpokládáme, že duhovka je souvislá) a doplněním na nuly v svislém směru.

Po filtraci jsou extrahovány příznaky užitím dvourozměrné Fourier-

rovy transformace (použité knihovny – QRealFourier¹).

6.2.4 Uložení dat

Pro uložení dat byl zvolen datový model podobný standardní lékařské databázi. Tu tvoří tři závislé datové vrstvy:

1. Získaná biometrická data.
2. Popis uložených biometrických dat.
3. Provázání získaných biometrických dat s osobními daty.

Implementace databáze je zjednodušená. Data v první vrstvě jsou uložena v samostatných souborech. Každý datový soubor obsahuje hodnoty vypočteného příznakového vektoru ve formě čistého textu, autokorelační koeficient tohoto vektoru a identifikátor osoby. Tento model byl zvolen pro jeho rychlost. Obsah jednoho souboru pro jeden snímek duhovky vypadá následovně (zkrácený výpis):

```
10.0 5.2 ... 1.21
.
.
.
5.0 1.2 ... 0.21 //biometrická data
1250 //autokorelační koeficient
1 //id osoby
```

Druhá vrstva obsahuje popis dat z první vrstvy. Opět je tvořena několika datovými soubory. Ty popisují strukturu datových souborů první vrstvy, ve které jsou uložena biometrická data. Pokud bychom změnili strukturu (změna dimenzí příznakového vektoru, změna datového typu příznakového vektoru atp.), pouze přidáme do této vrstvy další údaje. Obsah výsledného datového souboru vypadá následovně:

```
width=64 //šířka vektoru
height=16 //výška vektoru
acor=16 //řádek a koeficientem korelace
user=17 //řádek s id osoby
```

¹dostupné na <http://sourceforge.net/projects/qrealfourier>

Třetí a poslední vrstva spojuje osobní data (v rámci zachování osobních dat jsou to pouze identifikační čísla) jednotlivců, od kterých byla pořízena, s daty, která byla ze snímku získána. Tato vrstva se může zdát formální, avšak v případě reálného nasazení vytvořeného systému do praxe dovoluje pracovat se surovými daty i třetím osobám bez porušení zákona o ochraně osobních dat. Obsah jednoho záznamu třetí vrstvy vypadá následovně:

```
id=1 //id uživatele  
name="osoba 1" //jméno uživatele
```

6.2.5 Porovnání příznaků

Pro porovnání získaných příznakových vektorů s biometrickými daty uloženými v databázi byla zvolena metoda porovnání korelačních koeficientů pro její její univerzálnost a větší odolnost vůči posunu vektorů způsobeným natočením duhovky. Použití jednodušších metod jako je HD by komplikovalo a zpomalovalo výpočet, jak bylo zmíněno ve čtvrté kapitole.

Podle definice (viz čtvrtá kapitola) vypočteme korelační koeficient pro porovnávaný příznakový vektor a každý příznakový vektor z databáze, přičemž minimalizujeme tento korelační koeficient vzhledem k nejmenšímu možnému, který je uložen v databázi, abychom jej nemuseli počítat při každém průchodu. Pro každý záznam v databázi toto skóre normalizujeme a dále jej používáme jako pravděpodobnostní hodnotu shody.

Ze získané množiny pravděpodobnostních hodnot shody vybereme maximum a pokud splňuje následující podmínky, je uživateli oznámena shoda. Podmínky (určeny experimentálně) pro úspěšné přijetí obrazu a potvrzení shody jsou následující:

- Pravděpodobnost shody vyšší než 80%
- Odstup od dalších hodnot minimálně 10%

7 Dosažené výsledky

Následující kapitola obsahuje dosažených výsledků implementace programu na biometrickou analýzu oční duhovky. Testy obsahují časy běhů a spolehlivost části předzpracovávající snímky (je důležitá spíše rychlost, v případě neúspěchu můžeme opakovat postup s novým snímkem). Dále kapitola obsahuje metriky hodnotící spolehlivost vytvořeného biometrického systému (viz druhá kapitola).

Testy byly prováděny na osobním počítači následujících parametrů (jsou uváděny pouze parametry mající vliv na běh aplikace):

- OS – Windows 7, 64bit
- CPU – Intel Core i3 3110M, 2,4 GHz
- RAM – 4GB

7.1 Průběh experimentu

V této kapitole je uvedena struktura prováděného experimentu pro ověření parametrů vytvořeného biometrického systému. Jak bylo zmíněno v první kapitole, tvoří je dva oddělené kroky:

1. Tvorba databáze.
2. Ostrý provoz.

Během fáze tvorby databáze dochází k naplňování porovnávací databáze vlastními daty, jedná se o neautonomní fázi, během které musí být přítomen lidský operátor. Je pořízeno několik snímků oční duhovky, přičemž je ze strany testované osoby dodržováno několik podmínek pro získání snímku v největší možné kvalitě:

- Oko je umístěno ve středu snímku.
- Osa oka je kolmo na optiku snímače.

- Testovaná osoba sedí a má hlavu na opěrce.
- Testovaná osoba se nachází v předem dané vzdálenosti od snímače.

Zvolené podmínky ve fázi tvorby biometrické databáze byly zvoleny na základě předpokladů implementovaného biometrického systému (viz šestá kapitola). Umístění oka ve středu snímku zvýší přesnost detekce duhovky a zornice zvolenými algoritmy. Orientace osy oka vzhledem k ose snímače potlačí optické deformace sejmuté duhovky. Fixace hlavy testované osoby minimalizuje rozostření pořízeného snímku vlivem pohybu hlavy. Definovaná vzdálenost oka od snímače je rovna vzdálenosti, na kterou je snímač zaostřen, tak dosáhneme nejlepší možné ostrosti snímku.

Z pořízených snímků uživatel vybere ten nejlepší (nejkontrastnější, nejlépe detekovaná duhovka). Z něj je vypočten příznakový vektor a ten je uložen do databáze.

Fáze ostrého provozu slouží k ověření spolehlivosti systému a simuluje používání systému v běžném provozu. Vyžaduje databázi naplněnou vypočtenými příznakovými vektory. Během této fáze se snažíme získávat snímky co nejvíce odlišné od ideálních vzorů, abychom ověřili spolehlivost detekčních a porovnávacích algoritmů. Ze snímků získaných v této fázi následně testujeme:

- Spolehlivost detekce duhovky.
- Spolehlivost extrakce příznaků.
- Rychlost celého procesu.
- Rychlost jednotlivých fází procesu.
- Míra chybného přijetí.
- Míra chybného odmítnutí.
- Celkový ukazatel spolehlivosti systému.

7.2 Vlastnosti implementace

V této podkapitole jsou uvedeny výsledky testů rychlosti implementovaného algoritmu a spolehlivostní metriky detekce duhovky. Pro srovnání zde naleznete i hodnoty rychlosti/spolehlivosti naivní implementace (detekce pomocí HT) a modifikace metody FCD.

Časy běhů metod užitých ve fázi předzpracování snímku se nacházely na hranici měřitelnosti. Celý proces předzpracování byl dokončen do 700ms, přičemž časově nejnáročnější byly algoritmy odstraňující šum a řasy ve snímku (algoritmy open and close). V tabulce 7.1 jsou uvedeny časy potřebné pro vykonání jednotlivých kroků předzpracování.

metoda	čas běhu [ms]	odchylka [ms]
ekvalizace	20	3
redukce jasových úrovní	10	2
prahování	8	2
open and close	600	50

Tabulka 7.1: Časy potřebné pro vykonání jednotlivých kroků předzpracování.

V tabulce 7.2 jsou uvedeny porovnání časů běhu a spolehlivosti části detekující duhovku a zornici. Pro srovnání jsou zde také uvedeny jiné metody, naivní HT podle definice, upravená HT (redukce Houghova prostoru podle podmínek pozice duhovky a jejího rozměru) a implementace FCD s rozdílnými podmínkami redukce množství použitých vektorů (viz šestá kapitola). Test výkonnosti a spolehlivosti této části byl prováděn na množině 100 snímků rozdílné kvality pořízených ve fázi ostrého provozu. Časy potřebné pro předzpracování snímků byly v řádech stovek milisekund, neměly tak na celkovou dobu detekce podstatný vliv.

Extrakce biometrických dat z nalezené duhovky probíhala v neměřitelném čase ($< 1ms$) a byla vždy spolehlivá i pro nesoustřednou duhovku a zornici. Rychlost porovnání se odvíjela od množství uložených dat v databázi. Výpočet jednoho korelačního koeficientu pro dvojici porovnávaný příznak a příznak uložený v databázi trval $10 \pm 1ms$.

metoda detekce	střední doba detekce [s]	odchylka doby detekce[s]	úspěšně detekováno [%]
naivní HT	300	4	76
upravená HT	120	4	78
FCD(100)	14	2	85
FCD(80)	6,5	2,5	80
FCD(60)	5	0,5	75
FCD(40)	3,7	0,3	60

Tabulka 7.2: Srovnání spolehlivosti a rychlosti části detekující duhovku a zornici. Číslo v závorce u algoritmu FCD určuje kolik procent dvojic vektorů bylo použito při detekci.

7.3 Spolehlivost systému

Pro srovnání výsledků spolehlivosti vytvořeného biometrického systému je zapotřebí dvou doplňujících se metrik FRR a FAR, které jsou popsány v druhé kapitole. Pro porovnání jsou uvedeny tyto metriky pro další verze vytvořeného biometrického systému, konkrétně jsou uvedeny v tabulce 7.3.

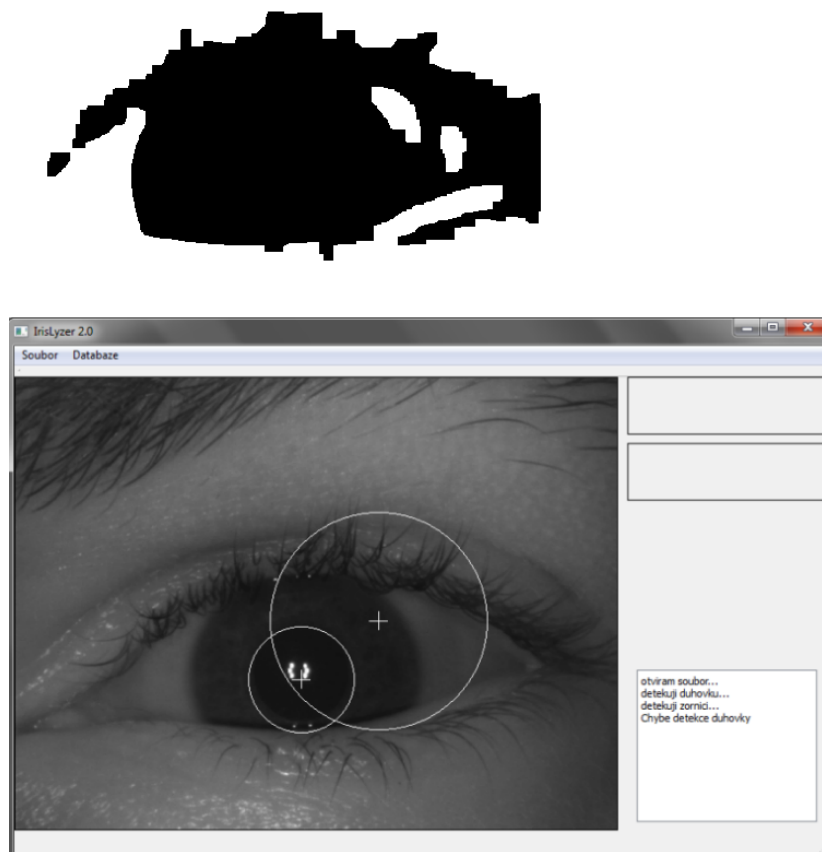
metoda	FRR [%]	FAR [%]
Daugmanova metoda	33	5
Wildesova metoda	25	8
vlastní implementace	30	10

Tabulka 7.3: Srovnání charakteristik FRR a FAR vytvořeného biometrického systému s jinými, naivně implementovanými systémy.

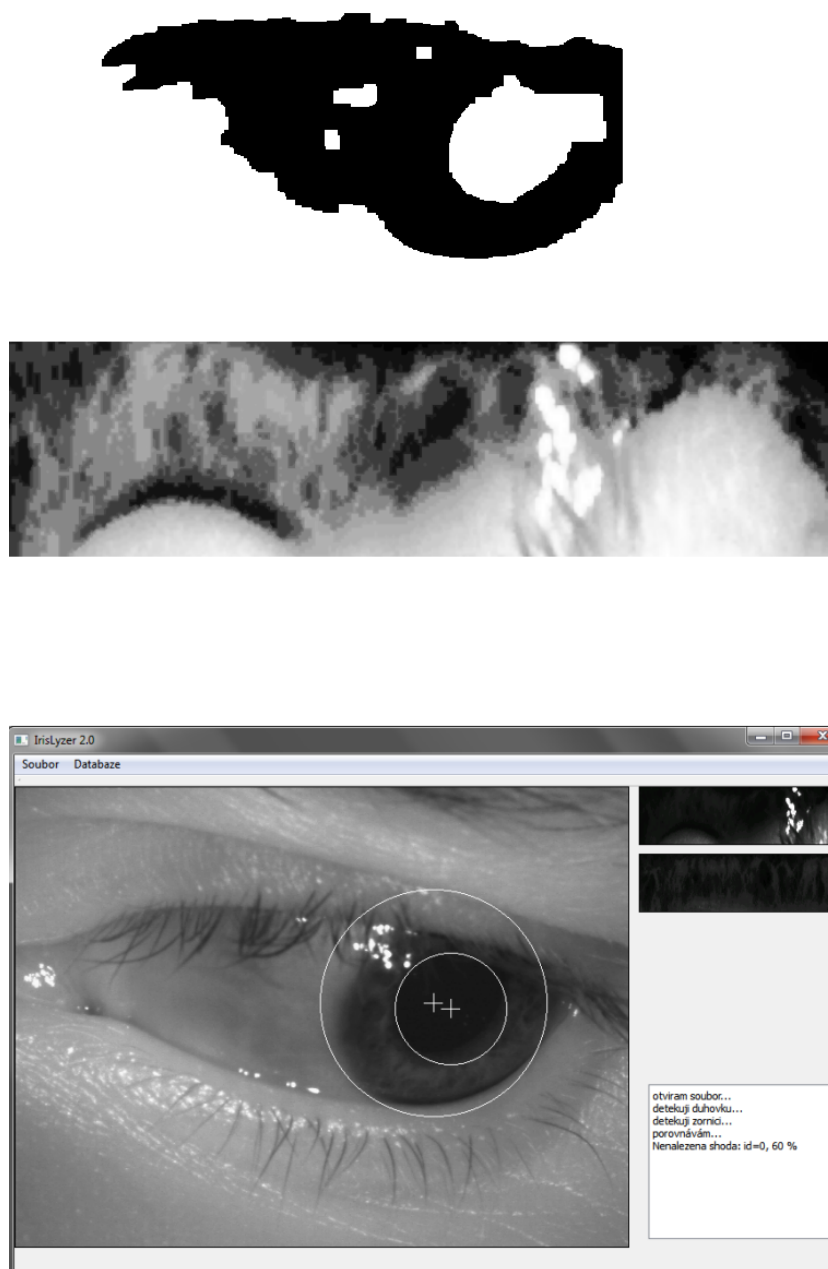
Spolehlivost systému lze na základě změřených charakteristik označit jako přijatelnou. FRR (odmítnutí správného snímku) o hodnotě třicet procent značí, že skoro v jedné třetině případů je uživatel nucen opakovat proces analýzy biometrických dat. Oproti tomu hodnota FAR (přijetí špatného snímku) deset procent představuje riziko chybné identifikace v jednom případě z desíti.

7.4 Ilustrační příklad

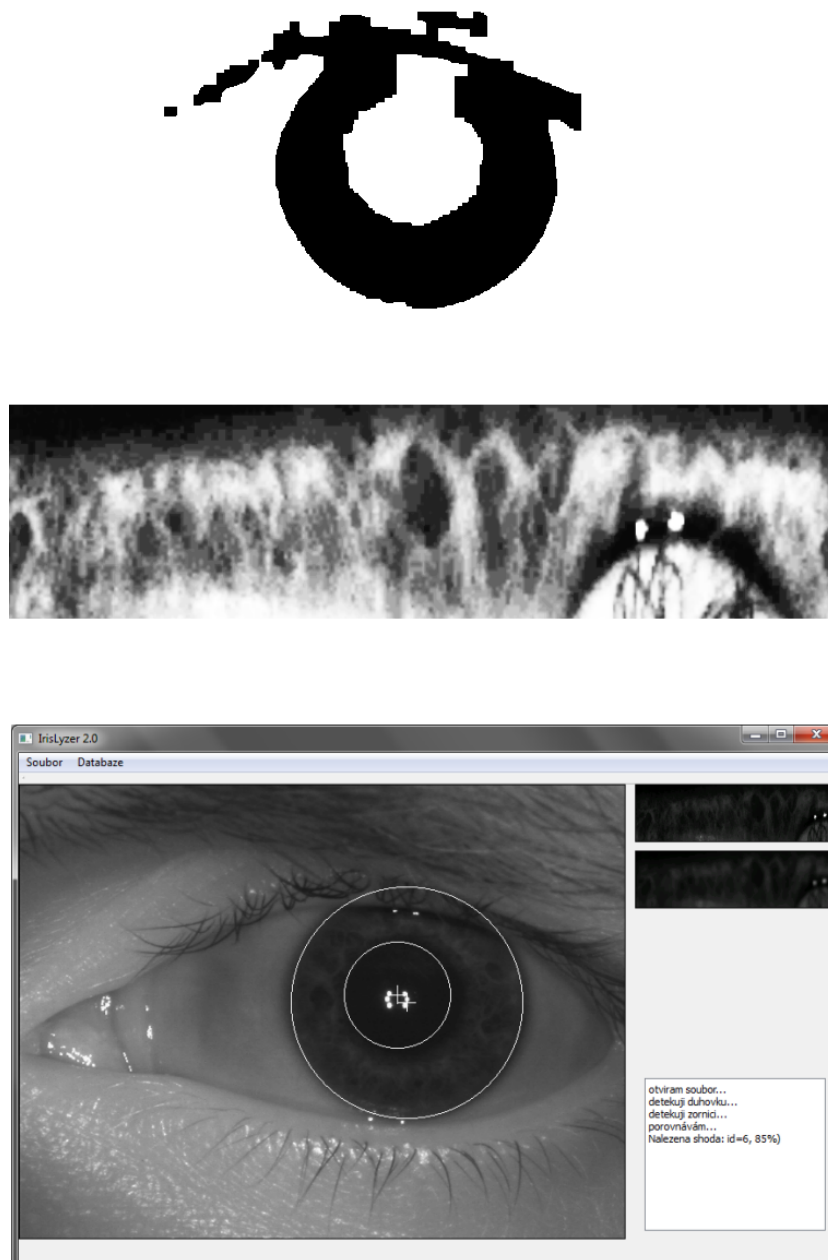
Tato podkapitola obsahuje ukázkou celého procesu získání biometrických dat ze snímku oční duhovky a jejich vyhodnocení. Dále se v podkapitole nachází tři ilustrační příklady chování vytvořené aplikace. V prvním příkladu (viz obrázek 7.1) je ilustrováno selhání detekce kružnice a následné pozastavení celého procesu. Druhý příklad (viz obrázek 7.2) ukazuje reakci systému na správně detekovanou duhovku, ale nepoužitelnou pro další porovnání (testovaná osoba má přivřené oko a nedívá se do snímače). Poslední příklad (viz obrázek 7.3) ilustruje správné vyhodnocení snímku a jeho porovnání.



Obrázek 7.1: Příklad chybně detekované duhovky. V horním snímku naleznete výsledek předzpracování, v dolním se nachází výsledek detekce a porovnání.



Obrázek 7.2: Ukázka správně detekované duhovky a zornice, extrahovaná biometrická data však nejsou použitelná. V horním snímku se nachází výsledek předzpracování, uprostřed jsou nalezená biometrická data, dole naleznete výsledek detekce a porovnání.



Obrázek 7.3: Ukázka správné detekce duhovky a úspěšného porovnání nalezených biometrických dat. V horním snímku se nachází výsledek předzpracování, uprostřed jsou nalezená biometrická data, dole naleznete výsledek detekce a porovnání.

8 Zhodnocení výsledků

Kvalita části systému detekující duhovku a zornici je srovnatelná s jinými metodami, uvedenými ve čtvrté kapitole. Většina jich je založena na HT, kterou jsem bral jako srovnávací kritérium, co se spolehlivosti týče. Oproti těmto metodám má metoda FCD kratší čas výpočtu a větší škálovatelnost. Jak vyplývá z testů, neoptimalizovaná metoda FCD je dokonce rychlejší a spolehlivější než upravená HT.

Spolehlivost upravené metody FCD je dostačující pro automatický provoz vytvořeného systému, rychlost zpracování je přijatelná. V případě chybné detekce by byl uživatel informován v přijatelném čase a byl by zajisté ochoten celý proces opakovat.

Biometrická data získaná nejdříve filtrací Gaborovými filtry a následnou aplikací Fourierovy transformace se ukázala lepší než využití samotných Gaborových filtrů. Vliv na spolehlivost může mít i použitý způsob porovnávání korelačních koeficientů.

Spolehlivost systému je dostačující pro další rozvoj této práce, pro nasazení v průmyslu by však bylo nutno zvýšit spolehlivost systému. Spolehlivost by mohly změnit např. jiné způsoby extrakce příznaků a způsob jejich porovnání. Jisté riziko aktuální implementace může představovat poměrně vysoká hodnota FAR, každá desátá osoba může být přijata systémem, aniž by byla uložena její biometrická data v databázi.

Základ vhodný pro spolehlivý a použitelný biometrický systém tato práce již obsahuje. Pro případnou další práci na tomto tématu bych doporučil tato vylepšení:

1. Vytvoření obecnější a lépe použitelné databáze biometrických dat.
2. Optimalizaci detekce duhovky paralelizací výpočtu (např. využitím procesoru grafické karty)
3. Otestovat další možnosti extrakce příznaků a jejich vliv na celkovou spolehlivost.
4. Zajistit přímou komunikaci se snímači oční duhovky.
5. Otestovat jiné snímače oční duhovky.

Ad 1: Použité schéma databáze lze zachovat, její implementace je však zbytečně komplikovaná. Do popisu dat by bylo vhodné pro účely dalších experimentů vložit další doplňující informace (např. věk, okolní světelné podmínky, případné oční vady, levé nebo pravé oko atp.). Přenesení dat na databázové servery by umožnilo rychlejší zpracování více dat oproti nynějšímu stavu, kdy jsou všechna data načtena v operační paměti.

Ad 2: Detekce duhovky je sice spolehlivá a dostatečně přesná, paralelizace výpočtu by ale snížila celkový čas výpočtu a zvýšila spolehlivost detekce duhovky (viz třetí řádek tabulky 7.2).

Ad 3: Na spolehlivost systému má vliv zvolený způsob extrakce příznaků. Implementované a porovnávané metody patří mezi ty základní a bylo by možno brát je jako etalon pro další porovnávání.

Ad 4: Vytvořený systém nekomunikuje se snímačem duhovky přímo, nýbrž pouze zpracovává pořízené snímky. Pro usnadnění obsluhy by bylo vhodné přímé ovládání a vyhodnocování v reálném čase.

Ad 5: Snímač oční duhovky, který je popsán ve třetí kapitole, je jednoduché zařízení. Pro účely dalších experimentů by bylo vhodné pořídit podstatně nákladnější zařízení poskytující kvalitnější snímky.

9 Závěr

V předložené diplomové práci byly shrnuty poznatky o metodách snímání oční duhovky a její analýzy. Tyto metody jsou většinou založeny na původních objevech pana Daugmana z konce 80. let 20. století. V posledních dvou letech se začaly objevovat další metody, všechny však využívají původní schéma čtyř kroků, které využívají v původním schématu jiný krok (většinou rozdílné metody segmentace nebo extrakce příznaků) a jsou upraveny pro konkrétní případy a nasazení.

Průmyslově vyráběné snímače jsou již dostupné a spolehlivé. Jejich cena je však pro fyzickou osobu příliš vysoká. V České republice se nenachází žádná firma zabývající se prodejem či distribucí biometrických systémů využívajících oční duhovku. V zahraničí je situace lepší, komplexní systém je však nákladný.

V rámci práce jsem implementoval systém umožňující porovnání osob na základě struktury oční duhovky. Tento systém není dokonalý a pro jeho nasazení v průmyslu by se musel upravit. Představuje však použitelný základ pro spolehlivý a použitelný biometrický systém. Metody nalezení okrajů duhovky jsou rychlé a spolehlivé. Databáze biometrických dat, část pro extrakci a porovnání příznaků dosahuje menší spolehlivosti.

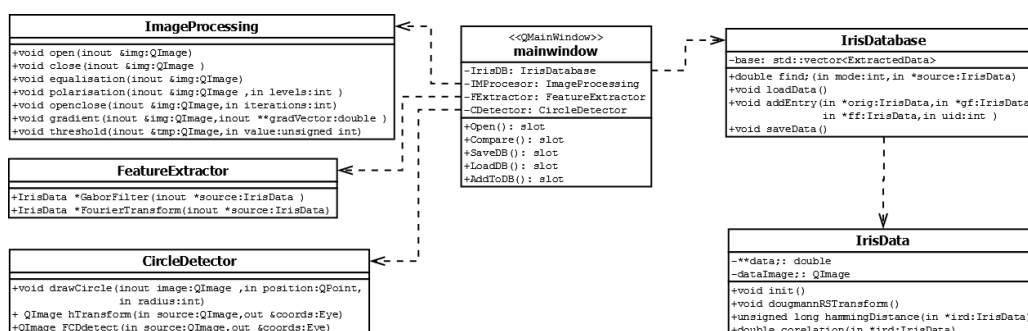
Dosažené výsledky mohou představovat dobrý začátek pro další výzkum biometrie a jejího nasazení v oblasti identifikace osob. Osobně věřím, že se tento obor bude v následujících letech stále více rozšiřovat a využívat.

A Použité zkratky

- CCD – Charge–coupled device, elektronické součástka pro snímání obrazu.
- FAR – False Acceptance Ratio, metrika pro porovnání biometrických systému, poměr přijetí nesprávných dat.
- FCD – Fast Circle Detection, algoritmus pro rychlou detekci kružnic ve snímku.
- FRR – False Rejection Ratio, metrika pro porovnání biometrických systémů, poměr odmítnutí správných dat.
- HD – Hamming distance, Hammingova vzdálenost, metrika porovnání dvou vektorů.
- LED – Light Emiting Diode, svítivá polovodičová dioda.
- WT – Wavelet transform, vlnková transformace.

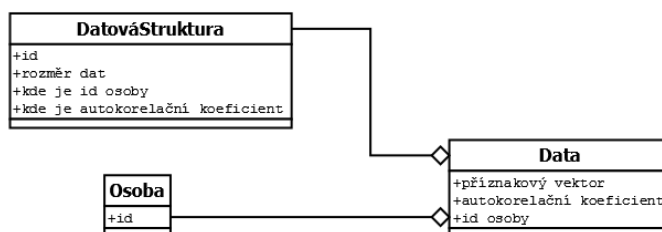
B Programová dokumentace

Jak bylo zmíněno v textu této práce, program je implementován v prostředí **Nokia Qt** kvůli zachování multiplatformnosti, jednoduchosti a rychlosti vývoje. Základní schéma programu kopíruje popsáný model analýzy oční duhovky (viz kapitola čtvrtá). Schéma programu, znázorněné UML diagramem naleznete na obrázku B.1. Podrobnější popis jednotlivých tříd naleznete v další části této přílohy.



Obrázek B.1: UML diagram implementovaného analyzátoru oční duhovky.

Pro model ukládání dat bylo již zmíněno využití modelu tří vrstev přístupu k datům (jak bylo popsáno v kapitole šesté). Na obrázku B.2 je tento model znázorněn pomocí ERA. Tento model je přímým popisem implementovaného schématu.



Obrázek B.2: ERA model použitého datového schématu.

B.1 Popis tříd

mainwindow

Hlavní třída celého projektu, která řídí celý proces analýzy, zobrazuje a obsluhuje grafické uživatelské rozhraní. Je vytvořena ze základní třídy QMainWindow, kterážto tvoří základ všech GUI aplikací frameworku Nokia Qt.

Metody označené v UML diagramu jako typ *slot* obsluhují události generované uživatelem. Atributy mají funkci předvytvořených nástrojů pro rychlejší a paměťově méně náročnější přístup k jednotlivým fázím zpracování oční duhovky. Jejich účel je následující:

- **IrisDB** – načtení databáze očních duhovek a jejich porovnávání.
- **IMProcessor** – přístup k jednotlivým fázím zpracování obrazu před samotnou detekcí, a jemné nastavení jejich parametrů.
- **CDetector** – nástroje pro detekci kružnice.
- **FExtractor** – metody pro extrakci příznakového vektoru a jeho filtraci.

IrisDatabase

Třída realizující databázi extrahovaných příznakových vektorů. Vlastní databáze je vytvořena pomocí množiny souborů (jak bylo popsáno v šesté kapitole), třída *IrisDatabase* obsahuje metody pro řízení báze dat, vyhledávání a další základní operace:

- **find** – pokusí se nalézt v databázi záznam s nejvyšší shodou pravděpodobnosti. Prohledávání je implementováno metodou porovnávání každého s každým.
- **loadData/saveData** – jak z názvu vyplývá, jedná se o metody pracující se soubory databáze. V průběhu práce je celá databáze načtena do operační paměti.

- **addEntry** – vložení nového záznamu do databáze a vytvoření příslušných datových souborů.

IrisData

Datová třída pro ukládání získaných příznakových vektorů. Kvůli úspoře paměti obsahuje také porovnávací mechanismy (korelaci a HT). Její atributy jsou:

- **data** – matice obsahující extrahované biometrické příznaky.
- **dataImage** – snímek duhovky pro případné další zpracování/porovnání/ukázkou.

A metody této třídy:

- **init** – inicializace statických metod.
- **DouglasPeucker** – metoda pro extrakci příznakového vektoru.
- **correlation** – korelace aktuální instance **IrisData** s jiným příznakovým vektorem, tato metoda je také použita v přetíženém operátoru porovnání (==).

ImageProcessing

Třída vytvořená jako kolekce nástrojů pro úpravu snímku. Třída má tyto metody:

- **open** – metoda otevření – zmenšení plochy černé barvy a zvětšení děr.
- **close** – metoda uzavření – zvětšení plochy černé barvy a zmenšení děr.
- **openClose** – kombinace metod open a close, slouží k eliminaci vlasových čar a děr ve snímku.

- **equalisation** – ekvalizace histogramu snímku.
- **polarisation** – snížení počtu jasových úrovní ve snímku.
- **gradient** – vytvoření gradientního (hranového) snímku užitím Sobelova operátoru.
- **threshold** – prahování snímku.

FeatureExtractor

Třída sloužící k extrakci příznaků z oční duhovky. Obsahuje pouze dvě metody pro Gaborovu filtraci a Fourierovu transformaci:

- **GaborFilter** – provede Gaborovu filtraci s předem definovanými parametry (úhel 90 stupňů).
- **FourierTransform** – provede Fourierovu transformaci a uloží do příznakového vektoru její magnitudu.

CircleDetector

Třída pro detekci a vykreslení nalezených kružnic do snímku.

- **drawCircle** – vykreslí do snímku kružnici zadaných parametrů.
- **hTransform** – detekce parametrů kružnice pomocí Houghovy transformace; pomalejší, ale snáze nastavitelná metoda.
- **FCDdetect** – detekce parametrů kružnice pomocí metody FCD.

C Uživatelská příručka

V následující příloze naleznete krátkou uživatelskou příručku pro ovládní programu vytvořeného v rámci této diplomové práce. Distribuční verze programu (naleznete na přiloženém DVD) je pro operační systém Windows pro verzi 32bitů. Pokud máte jiný operační systém či jinou konfiguraci, naleznete na DVD také soubory projektu pro vývojové prostředí **Nokia Qt**¹ a zdrojové soubory v jazyce C++.

C.1 Instalace

Instalace programu probíhá v několika krocích:

1. Instalace ovladačů snímače a obslužného zařízení.
2. Instalace knihoven potřebných pro obslužný software snímače.
3. Instalace vlastního programu analyzujícího oční duhovku.

První dva kroky závisejí na používaném snímači. Připojte snímač k počítači a podle pokynů výrobce jej instalujte.

Poté instalujte software vytvořený v rámci této práce. Pokud konfigurace Vašeho operačního systému odpovídá zkompileované distribuční verzi (Win 7, 32bit), pouze zkopírujte složku, ve které se distribuce nachází, na místo, kde máte povoleno čtení/zápis. Dále nastavte v souboru **setup.ini** v kořenové složce programu cestu k adresáři obslužného programu snímače a k souborům databáze.

Pokud máte jinou verzi operačního systému, musíte program zkompileovat z přiložených zdrojových souborů. Nejjednodušší postup je v použití integrovaného vývojového prostředí QtCreator² a otevření projektu *IrisLyzzer_2_0.pro* v tomto prostředí. Následně volbou `compile&run` si vytvoříte spustitelnou verzi pro Váš operační systém.

¹<http://qt-project.org/>

²opensource verze ke stažení na <http://qt-project.org/>

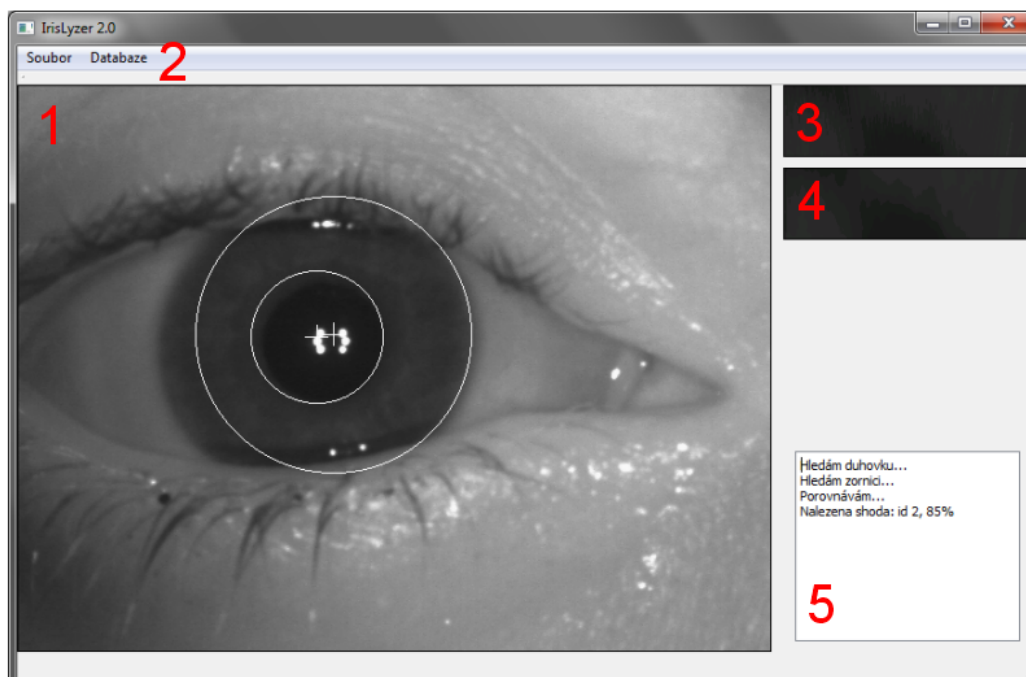
Pokud nechcete nebo nemůžete použít prostředí QtCreator, budete potřebovat následující programové prostředky:

- Překladač C++ (doporučeno mingw-4.4.0).
- Knihovní balíček nokia Qt (<http://qt-project.org/>).
- Cross compiler CMake (www.cmake.org/)

Jakmile máte tyto prostředky instalovány a nastaveny cesty v systémové proměnné path, zkompilujete připravíte program pro kompilaci příkazem *cmake* a následně vytvoříte spustitelnou verzi příkazem *make* spuštěným z adresáře se zdrojovými soubory programu.

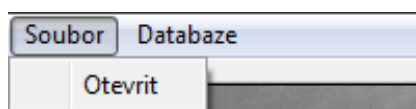
C.2 Použití

Program můžete ovládat přehledným grafickým uživatelským rozhraním (viz obrázek C.1).



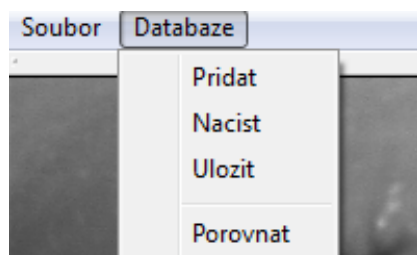
Obrázek C.1: Uživatelské rozhraní vytvořeného biometrického systému. 1–načtený snímek se značkami ohraničujícími nalezenou duhovkou, 2–menu pro ovládání funkcí aplikace, 3–biometrická data nalezené duhovky, 4–biometrická data duhovky s největší pravděpodobností shody, 5–konzole s výpisy akcí aplikace.

Veškeré akce jsou ovládány prostřednictvím menu v levém horním rohu aplikace. Menu **soubor** má jednu položku **otevřít** (viz obrázek C.2). Po kliknutí na tuto položku vám bude umožněno zvolit snímek pro analýzu. Ten bude následně načten a zpracován.



Obrázek C.2: Rozbalené menu **Soubor**.

Pro operace s uloženými biometrickými daty slouží menu **Databáze** (viz obrázek C.3). První tři položky (**Přidat**, **Načíst** a **Uložit**) slouží k manipulaci se záznamy databáze, poslední položka **Porovnat** provede porovnání načteného snímku se záznamy uloženými v databázi.



Obrázek C.3: Rozbalené menu **Databáze**.

Literatura

- [auth] A. Waqas, A. A Saad. Biometric Access Control System Using Automated Iris Recognition. *Asian journal of engeneering, scienceS & technology* vol. 1, 2011. s17-21.
- [bio] N. V. Boulgouris, K. N. Plataniotis, E. Micheli-tzankou: *Biometrics: Theory, Methods, and Applications*, John Wiley & Sons 2010, ISBN: 978-0470-24782-2
- [bio01] J. D. Woodward, C. Horn, J. Gatune, A. Thomas: *Biometrics: A Look at Facial Recognition*. RAND Corporation 2003, ISBN: 0-8330-3302-6.
- [biom] K. H. Hauptvogel, M. Ritzschke: *Biometrie um die jahrhunder-twende*, 2004. Humboldt Universität, Berlín.
- [bres] J. E. Bresenham: Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal* 4, 1965 s 25–30.
- [cap] W. R. Ives, J. R. Matey, J. Dormo. Design and Implementation of a Multispectral Iris Capture System. *IEEE Signals, Systems and Computers, 2009 Conference Record of the Forty–Third Asilomar Conference 2009*. s 380–384.
- [canny] J. Canny. A Computational Approach to Edge Detection. *n:IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, s 679–698, 1986.
- [cor] S.S. Kulkarni, G.H. Pandey, A.S.Pethkar, V.K. Soni, P.Rathod: An Efficient Iris Recognition Using Correlation Method, *International Journal of Information Retrieval*, Vol. 2, Suppl. Issue 1, 2009, s 31-40.
- [dakt] J. Straus, a kolektiv: *Kriminalistická daktyloskopie*. Praha: Policejní akademie ČR, 2005. ISBN: 80-7251-192-0

- [daug] J. Daugman: How iris recognition works. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 2004. s21–30. ISSN: 1051–8215
- [daug1] J. Daugman: Introduction of Iris recognition
- [daug2] J. Daugman. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, s 1148–1161, 1993.
- [drah] M. Drahanický, F. Orság a kolektiv: *Biometrie*. Computer Press a.s. 2011, ISBN: 978-80-254-8976-6
- [face] A.K. Jain: Face recognition: Some challenges in forensics. *IEEE Automatic Face & Gesture Recognition and Workshops (FG 2011)*, 2011. s 726-733
- [fcm] A. Ajdari Rad, K. Faez, N. Qaragozlou: Fast Circle Detection Using Gradient Pair Vectors. *Proc. VIIth Digital Image Computing: Techniques and Applications* s879-888 Dec. 2003, Sydney
- [hist] R. Lüllmann–Rauch: *Histologie*. Grada Publishing a.s., 2012, ISBN: 978-80-247-3729-4
- [hough] P.V.C. Hough: Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures, *Proc. Int. Conf. High Energy Accelerators and Instrumentation*, 1959.
- [im] W. Burger, M. J. Burge: *Digital image processing*. Springer 2008, ISBN: 978-1-84628-379-6
- [irc] Y.Gong, D.Zhang, P. Shi, J.Yan: High–Speed Multispectral Iris Capture System Design. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, s 1966-1978, 2012.
- [irspc] J. L. Cambier: *Certification of Iris Capture Devices*. Cross Match Technologies Inc. 2012.
- [key] M. Villani, C. Tappert, N. Giang, J. Simone, H.St.Fort, Cha Sung–Hyuk: Keystroke biometric recognition studies on long–text input under ideal and applicationoriented conditions. In *Proceedings of the 2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW06)*, 2006, s 39–47.
- [ma] L. Ma, T. Tan, D. Zhang, Y. Wang. Local intensity variation analysis for iris recognition. *Pattern recognition*, s 1287–1298, 2004.

- [mart] H. P. Martins. Towards Non-Cooperative Biometric Iris Recognition, Dissertační práce University of Beira Interior, 2006.
- [palm] Y. Zhang, Q. Li, J. You, P. Bhattacharya: Palm Vein Extraction and Matching for Personal Authentication. Advances in Visual Information Systems Lecture Notes in Computer Science Volume 4781, 2007, s 154-164
- [proc] R. C. González, R. E. Woods: Digital Image Processing. Prentice Hall 2007. ISBN 0-13-168728-0.
- [ret] G. K. Matsopoulos, Ni. A. Mouravliansky, K.K. Delibasis, K. S. Nikita: Automatic retinal image registration scheme using global optimization techniques. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 1999, s 47-60.
- [russ] J. C. Russ: The Image Processing Handbook: Fourth Edition, CRC 2002 ISBN 0-8493-2532-3
- [sam] J. Samek. Biometrická analýza oční duhovky. Bakalářská práce ZČU-FAV. 2011
- [sung] E. Sung. Towards non-cooperative iris recognition systems. Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002. 7th International Conference on 2002. s 990-995.
- [wav] C. Kun-Huei, S. Sheng-Wen, H. Chih-Ming: Personal identification technique based on human iris recognition with wavelet transform. IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005.: 18-23 March 2005 . s949-952
- [wav01] Sripathi, Deepika: Efficient Implementations of Discrete Wavelet Transforms Using FPGAs. Master thesis, The Florida State University, College of Engineering. 2003.
- [wild] R. Wildes. Iris recognition: an emerging biometric technology. Colloquium on Visual Biometrics, 2000.