



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**EXTRAKCIA PODROBNÝCH INFORMÁCIÍ
Z ODTLAČKOV DLANE**

EXTRACTION OF DETAILED INFORMATION FROM PALMPRINT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JÁN FOLENTA

VEDOUĆÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce



Student: **Folenta Ján, Bc.**
Program: Informační technologie a umělá inteligence
Specializace: Vývoj aplikací
Název: **Extrakce podrobných informací z otisku dlaně**
Extraction of Detailed Information from Palmprint
Kategorie: Zpracování obrazu
Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se rozpoznávání podle otisku prstu a otisku dlaně, soustřeďte se na metody zpracování papilárních linií. Seznamte se se vznikem a vývojem papilárních linií na rukou v průběhu života.
2. Navrhněte aplikaci pro získávání podrobných informací o otisku dlaně. Zejména se jedná o detekci flekčních rýh, triradií, hlavních linií, dále pak hustoty, šířky a směru papilárních linií. Získané informace aplikace vhodně graficky znázorní, umožní jejich export a statisticky zpracuje.
3. Navrženou aplikaci z předchozího bodu implementujte.
4. Otestujte funkčnost implementované aplikace na alespoň malé ručně anotované databázi. Zhodnoťte zda existují rozdíly v extrahovaných datech mezi jednotlivými osobami (např. podle věku, pohlaví, rasy, apod.).
5. Dosazené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná rozšíření vašeho řešení.

Literatura:

- Drahanský, M.: *Hand-Based Biometrics: Methods and technology*, IET 2018, p. 430, ISBN 978-1-78561-224-4.
- U.S. Department of Justice: *The Fingerprint Sourcebook*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, p. 428. ISBN 978-1502828422.
- Zhang, D. D.: *Palmprint Authentication*, Springer 2004, p. 253, ISBN-13: 978-1402080968.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 a 2.

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

Vedoucí práce: **Kanich Ondřej, Ing., Ph.D.**
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2021
Datum odevzdání: 18. května 2022
Datum schválení: 3. listopadu 2021

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá získavaním informácií z odtlačkov dlane. Jej hlavným cieľom je extrahovať z odtlačku dlane informácie o lokálnej orientácii, frekvencii a šírke papilárnych línií, detegovať flekčné ryhy a trirádiá a sledovať priebeh hlavných línií vrátane určenia indexu hlavných línií. Výsledkom tejto práce je aplikácia s grafickým užívateľským rozhraním, ktorá okrem získania informácií z odtlačku dlane tieto informácie graficky zobrazí, štatisticky spracuje a umožní ich export. Testovanie a vyhodnotenie prebehlo na dátovej sade poskytnutej Ústavom antropológie Prírodovedeckej fakulty Masarykovej univerzity v Brne, na ktorej dosiahla detekcia trirádií úspešnosť 84,8 %, úspešnosť určenia ukončenia hlavných línií dosiahla hodnotu 85,38 % a určenie indexu hlavných línií dosiahlo úspešnosť 78 %.

Abstract

This master's thesis deals with obtaining information from palmprints. Its main goal is to extract information from the palmprint about the local orientation, frequency and width of the papillary lines, to detect principle lines and triradii and to track main lines, including the determination of the main line index. The result of this work is an application with a graphical user interface, which, in addition to obtaining information from the palmprint, graphically displays this information, statistically processes it and enables its export. Testing and evaluation took place on a data set provided by the Department of Anthropology, Faculty of Science, Masaryk University in Brno, where detection of triradii achieved a success rate of 84.8 %, main line tracking reached success rate of 85.38 % and main line index determination reached success rate of 78 %.

Klíčové slová

odtlačok dlane, odtlačok prsta, papilárne línie, flekčné ryhy, trirádium, hlavné línie, index hlavných línií

Keywords

palmprint, fingerprint, ridges, principal lines, triradius, main lines, main line index

Citácia

FOLENTA, Ján. *Extrahovanie podrobných informácií z odtlačkov dlane*. Brno, 2022. Diplomová práca. Vysoké učenie technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich, Ph.D.

Extrakcia podrobných informácií z odtlačkov dlane

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Ondřeje Kanicha, Ph.D. a uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....

Ján Folenta
16. mája 2022

PodĎakovanie

Touto formou by som sa chcel poďakovať pánovi Ing. Ondřejovi Kanichovi, Ph.D. za jeho cenné rady a odborné vedenie práce a svojej rodine za neustálu podporu.

Obsah

1	Úvod	3
2	Odtlačky prsta a dlane	4
2.1	Biometrické systémy	4
2.2	Štruktúra kože	5
2.3	Papilárne línie	5
2.4	Odtlačok prsta	7
2.5	Odtlačok dlane	10
2.6	Rozpoznávanie podľa odtlačkov prsta a dlane	15
3	Spracovanie papilárnych línií	17
3.1	Lokálna orientácia papilárnych línií	18
3.2	Lokálna frekvencia papilárnych línií	20
3.3	Vylepšovanie obrazu odtlačku	21
3.4	Binarizácia	23
3.5	Stenčovanie papilárnych línií	23
3.6	Extrakcia markantov	24
4	Návrh	26
4.1	Segmentácia	26
4.2	Orientácia papilárnych línií	28
4.3	Detekcia flekčných rýh	29
4.4	Detekcia vrások	31
4.5	Frekvencia a šírka papilárnych línií	32
4.6	Detekcia singulárnych bodov	33
5	Implementácia	36
5.1	Blokové spracovanie	36
5.2	Segmentácia odtlačku dlane	36
5.3	Automatické očíslovanie okraja odtlačku	38
5.4	Určenie lokálnej orientácie papilárnych línií	41
5.5	Detekcia trirádií	43
5.6	Sledovanie hlavných línií	44
5.7	Určenie frekvencie a šírky papilárnych línií	45
5.8	Grafické užívateľské rozhranie	47
5.9	Export dát	48
6	Vyhodnotenie	50

6.1	Dátová sada	50
6.2	Vyhodnotenie úspešnosti detekcie trirádií	50
6.3	Vyhodnotenie úspešnosti sledovania hlavných línií	53
6.4	Vyhodnotenie úspešnosti určenia indexu hlavných línií	54
6.5	Porovnanie frekvencie a šírky papilárnych línií medzi pohlaviami	54
7	Záver	57
	Literatúra	58

Kapitola 1

Úvod

V súčasnej dobe sa biometrické metódy pre identifikáciu a verifikáciu osôb stávajú čoraz pevnejšou súčasťou našich životov. Vďaka svojim jedinečným vlastnostiam postupne nahradzujú tradičnejšie spôsoby identifikácie, medzi ktoré patria napríklad heslá alebo identifikačné karty.

Medzi najrozšírenejšie a najpoužívanéjšie biometrické charakteristiky v súčasnosti patrí biometria ruky, ktorá zahŕňa odtlačky prstov a dlane. Jej história siaha už do 14. storočia, kedy sa v Číne na keramike nachádzali odtlačky prstov, ktoré mohli slúžiť ako dôkaz autorstva [9]. Dnes sa s rozpoznávaním podľa odtlačkov stretávame najmä pri mobilných telefónoch, ktoré obsahujú čítačky odtlačkov prstov používané k odomknutiu telefónu. Významnú úlohu zohrávajú odtlačky prstov a dlane v kriminalistike, kedy je možné získať z miesta činu odtlačok, prípadne jeho časť a pomocou neho následne identifikovať páchatela. Odtlačky nachádzajú uplatnenie aj v antropológii, ktorá mimo iného skúma vlastnosti odtlačkov a ich vývoj. Podľa vlastností odtlačkov, ako je napríklad hustota papilárnych línií alebo ich hrúbka, je možné odhadnúť vek alebo pohlavie človeka, ktorý je vlastníkom odtlačku.

Cieľom tejto práce bude navrhnúť a implementovať systém pre extrakciu podrobných informácií z odtlačku dlane. Konkrétne sa jedná o určenie smeru, hustoty a šírky papilárnych línií. Systém by mal tiež detegovať flečné ryhy a trirádiá a určiť zakončenie hlavných línií, ktoré vychádzajú z detegovaných trirádií. Získané informácie budú následne graficky znázornené a bude umožnený ich export pre ďalšie spracovanie.

Pred samotným popisom návrhu a implementácie systému pre extrakciu podrobných informácií z odtlačku dlane bude čitateľ v kapitole 2 oboznámený s teoretickým základom, ktorý je potrebný pre pochopenie jednotlivých častí systému, zahrňujúci popis papilárnych línií a ich vývoja, popis odtlačkov prsta a spôsobov ich získavania alebo popis odtlačkov dlane a jednotlivých útvarov, ktoré sa na nich nachádzajú. V kapitole 3 bude popísaný proces rozpoznávania podľa odtlačkov, vrámci ktorého budú popísané jednotlivé metódy používané pri spracovaní papilárnych línií, ako napríklad metódy získania lokálnej orientácie a frekvencie papilárnych línií, metódy vylepšenia obrazu odtlačku alebo metódy extrakcie markantov. Kapitola 4 bude popisovať návrh aplikácie a výber metód pre riešenie jednotlivých dielčích častí systému. Kapitola 5 obsahuje popis implementácie jednotlivých častí aplikácie vrátane popisu grafického užívateľského rozhrania. V kapitole 6 sú na základe anotovaných dát vyhodnotené získané informácie z odtlačkov dlane a sú porovnané mužské a ženské odtlačky dlaní z hľadiska frekvencie a šírky papilárnych línií. Záverečná kapitola 7 obsahuje zhrnutie výsledkov a možné rozšírenie riešenia.

Kapitola 2

Odtlačky prsta a dlane

Odtlačok prsta patrí v súčasnosti medzi najpoužívanejšie biometrické charakteristiky pre rozpoznávanie osôb. S rozpoznávaním podľa odtlačku dlane sa síce v živote až tak často nestretávame, ale napríklad v kriminalistike pri získaní odtlačkov z miesta činu zohráva rozpoznávanie podľa odtlačku dlane významnú úlohu. Pred tým, ako bude vysvetlené, ako funguje rozpoznávanie podľa odtlačkov je potrebné oboznámiť sa so štruktúrou a vlastnosťami odtlačku prsta a dlane, zoznámiť sa podľa čoho sa odtlačky rozlišujú a ako sa počas života formujú.

V tejto kapitole bude v jej úvode stručne popísaná biometria, biometrické systémy a ich vlastnosti. V ďalšej časti bude popísaná štruktúra kože, papilárne línie, vývoj papilárnych línií v jednotlivých mesiacoch embryonálneho života a markanty, na základe ktorých prebieha rozpoznávanie odtlačkov. Ďalej bude čitateľ oboznámený s odtlačkami prstov, ich klasifikáciou a budú popísané spôsoby získavania odtlačkov prsta spolu so stručným popisom niektorých senzorov, ktoré sa pre získavanie odtlačkov používajú. Následne budú popísané typy odtlačkov dlane a jednotlivé útvary formované papilárnymi líniami, ktoré sa na odtlačku dlane nachádzajú. Na konci kapitoly budú stručne popísané triedy metód používaných pre rozpoznávanie podľa odtlačkov.

2.1 Biometrické systémy

Biometria je veda, ktorá sa snaží určiť alebo overiť identitu jednotlivca na základe jeho fyzických alebo behaviorálnych vlastností. Medzi fyzické vlastnosti patrí napríklad odtlačok prsta, odtlačok dlane, dúhovka, tvár alebo DNA. Ku behaviorálnym vlastnostiam radíme hlas alebo chôdzu. Výhodou týchto vlastností je to, že by mali byť pre každého človeka unikátne a časovo výrazne nemenné. [21] [39]

Hlavnou úlohou biometrického systému je identifikácia a verifikácia osoby na základe jeho biometrickej vlastnosti. Identifikácia slúži k zisteniu identity osoby, kedy dochádza k porovnaniu vstupného vzorku s celou databázou vzoriek. Niekedy sa jej tiež hovorí porovnanie 1:N. Úlohou verifikácie je overenie identity osoby, kedy je v databázi nájdený jej záznam a s ním je následne porovnaná vstupná vzorka. Verifikácii sa preto hovorí aj porovnanie 1:1. [11] [22]

Každý biometrický systém má svoje výhody a nevýhody a vhodnosť jeho použitia sa môže líšiť naprieč jednotlivými aplikáciami. Pre výber konkrétneho biometrického systému sa môžeme rozhodnúť na základe nasledujúcich vlastností: [45]

- **Univerzalita** – každá osoba by mala mať danú charakteristiku.

- **Jedinečnosť** – žiadne dve osoby by nemali mať rovnakú charakteristiku.
- **Stálosť** – charakteristika by sa nemala počas dlhšieho obdobia výrazne meniť.
- **Merateľnosť** – charakteristiku by malo byť možné kvantitatívne odmerať.
- **Výkon** – presnosť a rýchlosť identifikácie.
- **Prijateľnosť** – miera, do akej sú ľudia ochotní patričný biometrický systém akceptovať vo svojom živote.
- **Bezpečnosť** – obtiažnosť oklamania biometrického systému.

2.2 Štruktúra kože

Pred popisom odtlačkov prsta a dlane, papilárnych línií a spôsobu ich formovania je potrebné oboznámiť sa so štruktúrou kože. Koža je najväčší orgán ľudského tela a tvorí približne 15 % hmotnosti dospelého človeka [26]. Medzi základné funkcie kože patrí ochrana proti vonkajším fyzickým, chemickým a biologickým vplyvom [26]. Koža je zložená z troch vrstiev: pokožky, zamše a podkožného väziva [15].

Pokožka

Pokožka (lat. *epidermis*) je najvrchnejšia časť kože. Obsahuje bielkovinu keratín, ktorá je nerozpustná vo vode a vďaka nej je koža odolná a relatívne nepriepustná pre vodu. Vrchné vrstvy pokožky postupne rohovatejú a odlupujú sa a bunky v nich sú nahradzované deliacimi sa bunkami zo spodných vrstiev. Zatiaľ čo na chodidlách a dlaniach je pokožka hrubšia, na ostatných častiach tela je relatívne tenká. Do pokožky nezasahujú krvné cievy ani nervové vlákna. [15] [26]

Zamša

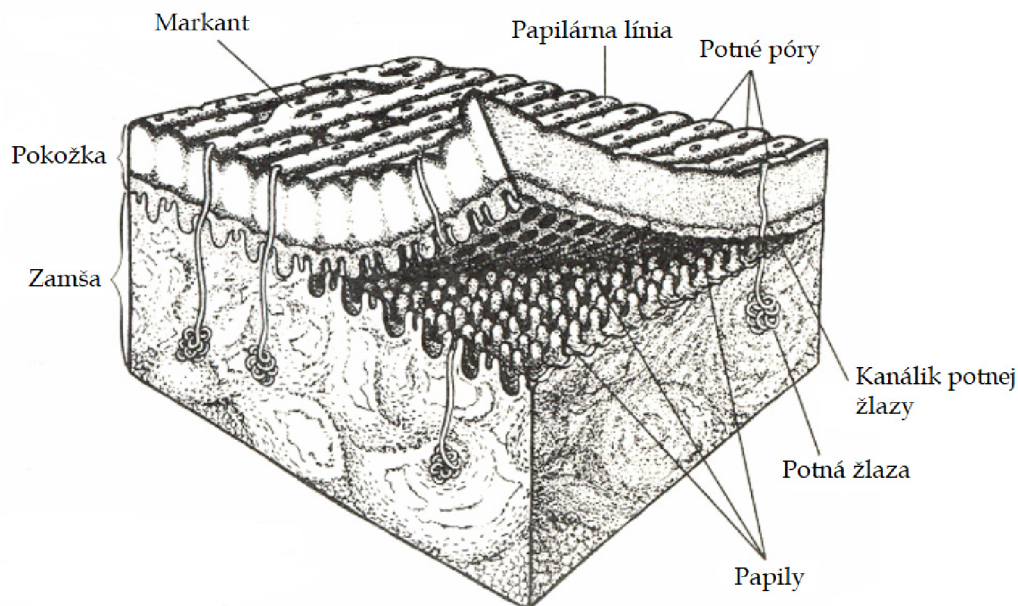
Zamša (lat. *dermis*) je strednou vrstvou kože, ktorá sa skladá z hustého spojivového tkaniva, ktoré poskytuje pevnosť a elasticitu. Je zároveň aj najhrubšou časťou kože. Jej vrchná vrstva nie je hladká, ale obsahuje výbežky, nazývané papily, ktoré zohrávajú dôležitú rolu pri tvorbe papilárnych línií. Zamša obsahuje krvné cievy, nervové vlákna a zakončenia a potné žľazy. [15] [26]

Podkožné väzivo

Podkožné väzivo (lat. *hypodermis*) je najvnútornejšou vrstvou kože. Je zložená zo spojivového tkaniva, ktoré ukladá tuk a poskytuje izoláciu. Hrúbka podkožného väziva sa v jednotlivých častiach tela líši. [15] [26]

2.3 Papilárne línie

Papilárne línie, nazývané tiež aj hmatové lišty alebo hrebene, tvoria vyvýšený reliéf kože [34]. Nachádzajú sa na vnútornej strane prstov, dlaní a chodidiel [22]. Ich výška sa pohybuje medzi 0,1 a 0,4 mm a šírka v rozmedzí 0,2 až 0,5 mm [9]. Jednotlivé papilárne línie od seba oddeľujú údolia, avšak môžeme sa stretnúť aj s pojмами ryha alebo brázda.



Obrázok 2.1: Grafické znázornenie štruktúry kože a papilárnych línií. Prevzaté a upravené z [15].

Papilárne línie sa vytvárajú už v strednej vrstve kože, teda v zamši. Pri ich tvorbe zohrávajú dôležitú úlohu papily – výbežky zo zamše do pokožky. Papily, obsahujúce nervové zakončenia a krvné cievy ukotvujú pokožku. Každá papilárna línia je tvorená dvomi radmi papíl, medzi ktorými prechádzajú kanáliky potných žliaz. Štruktúru papilárnych línií je možné vidieť na obrázku 2.1. [15] [34]

Štruktúra papilárnych línií je pre každého človeka jedinečná. Usporiadanie papilárnych línií je z 90 % podmienené geneticky a zo zvyšných 10 % je závislé na vonkajších podmienkach [34]. Počas života ostáva tvar papilárnych línií nemenný. Pri jemných poškodeniach, ako sú napríklad rezné rany sa po určitej dobe papilárne línie zregenerujú a vrátia do pôvodného tvaru. Ich tvar však ostáva trvalo poškodený pri zraneniach, ktoré prechádzajú do zamše alebo pri rôznych ochoreniach kože, ako napríklad atopický ekzém, psoriáza alebo dishydróza. V takom prípade už nie je možná regenerácia. [3] [10] [22]

2.3.1 Vývoj papilárnych línií

Papily v zamši a nad nimi sa klenúce papilárne línie pokožky sa vyvíjajú počas embryonálneho života dieťaťa. Ich vývoj začína približne v 3. mesiaci a končí v 6. mesiaci embryonálneho vývoja a prebieha nasledovne: [29] [34]

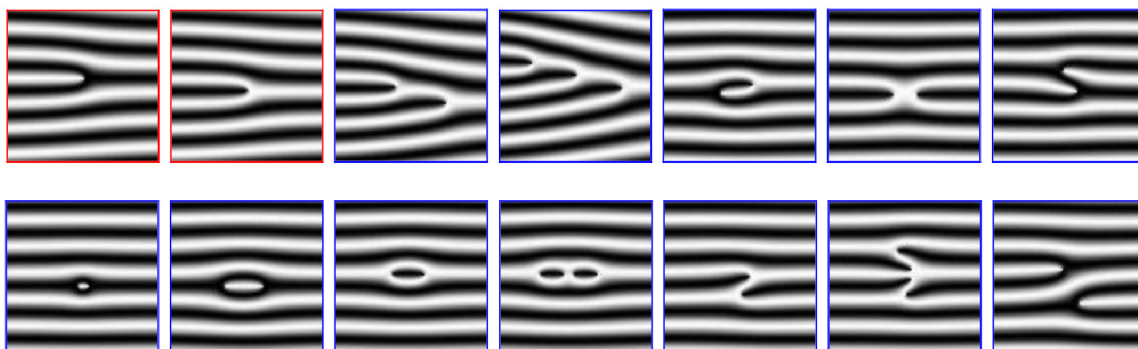
- **1. – 2. mesiac** – plocha na rozhraní epitelu a väziva zostáva úplne hladká.
- **3. mesiac** – bunky zárodočnej vrstvy pokožky sa začínajú intenzívne deliť. Novo vznikajúce bunky sa na určitých miestach vtlačujú do zamše a vzniká tak zvlčenie.

- **4. mesiac** – vznikajú záhyby spodnej vrstvy pokožky vzrastajúce do zamše. Zamša sa tvaruje a vysiela papily do pokožky. Epidermálne záhyby, ktoré sú neskôr makroskopicky vnímateľné ako hmatové lišty pokožky (papilárne línie) sa tvoria na poduške prstov. Stred pokožky zostáva zatiaľ voľný. Behom ďalšieho vývoja sa tvorí stále viac týchto líšt až pokým pokryjú celý povrch vankúšikov.
- **5. mesiac** – v zamši sa vytvárajú potné žľazy, ktorých vývody prerastajú do pokožky.
- **6. mesiac** – vývody potných žliaz sa objavujú na hrebeňoch hmatových líšt. V tomto období sa taktiež prehlbujú ryhy medzi lištami. V 6. mesiaci taktiež započne sekrécia potných žliaz a rohovatenie pokožky a tým je vývoj papilárnych línií ukončený.

2.3.2 Markanty

Pri rozpoznávaní podľa odtlačkov prsta a dlane zohrávajú významnú úlohu markanty. Markant je miesto, kde sa hrebeň objavuje, končí, rozdeľuje alebo spája s iným hrebeňom. Okrem pozície je markant charakterizovaný aj svojím smerom a typom. [22]

Poznáme 14 základných typov markantov, ktoré sú zobrazené na obrázku 2.2. V prvom rade zľava je možné vidieť ukončenie, jednoduchú vidličku (rozdzvojenie), dvojitú vidličku, trojitú vidličku, hák, kríženie a bočný kontakt. V druhom rade zľava sa nachádza bod, interval, jednoduchá slučka, dvojitá slučka, jednoduchý most, dvojitý most a priesečná línia. V daktyloskopických systémoch slúžiacich pre kriminalistické systémy sa používajú aj ďalšie typy markantov, ktoré sú odvodené zo základných typov. Pri automatizovanom rozpoznávaní sa však najčastejšie používajú iba dva typy, a to ukončenie a rozdzvojenie. [9]



Obrázok 2.2: Grafické znázornenie jednotlivých typov markantov. Prevzaté z [11].

2.4 Odtlačok prsta

Odtlačok prsta je najpoužívanejšou biometrickou charakteristikou pre identifikáciu a verifikáciu osôb. Je tvorený vzorom papilárnych línií na vnútornej strane prsta. Odtlačok prsta je vďaka svojmu vzoru papilárnych línií a umiestneniu jednotlivých markantov pre každého človeka jedinečný a líši sa napríklad aj u identických dvojčiat. [34]

Okrem vzoru papilárnych línií a markantov sa môžu odtlačky u ľudí mierne líšiť aj hustotou alebo hrúbkou papilárnych línií. Na základe priemernej hustoty a hrúbky je potom možné približne odhadnúť vek alebo pohlavie vlastníka odtlačku. Hrúbka papilárnych línií sa líši viac medzi regiónmi, z ktorých osoby pochádzajú, ako medzi mužmi a ženami pochádzajúcimi z toho istého regiónu. [8]

2.4.1 Klasifikácia odtlačkov prstov

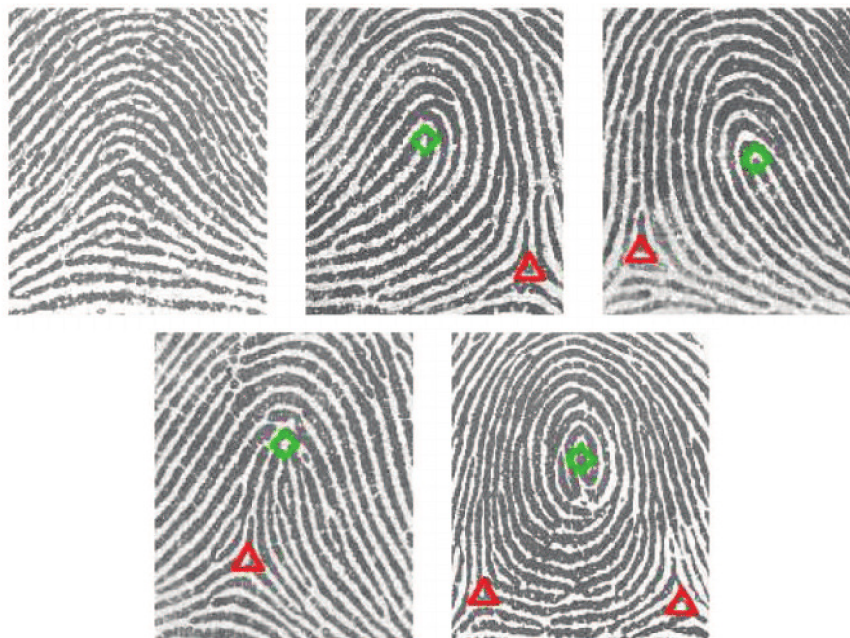
Identifikácia osoby vyžaduje porovnanie jej odtlačku so všetkými odtlačkami v prehľadávanej databázi, ktorá je zvyčajne pomerne rozsiahla. Z dôvodu urýchlenia identifikácie sú odtlačky delené do niekoľkých tried na základe svojich vlastností. [9] [31]

Prvú hĺbkovú štúdiu o klasifikácii odtlačkov prstov vykonal sir Francis Galton, ktorý rozdelil odtlačky na tri základné kategórie – oblúk, slučku a vír. Neskôr Edward Henry rozšíril klasifikáciu na päť tried, pričom rozdelil oblúk na jednoduchý a klenutý oblúk a slučku rozdelil na ľavú a pravú slučku. Táto klasifikácia sa používa aj v súčasnosti. Odtlačky sú rozdelené do jednotlivých tried na základe singulárnych bodov. [31]

Rozlišujeme dva druhy singulárnych bodov: deltu a jadro. Delta je miesto na odtlačku, kde sa papilárne línie rozbiehajú do troch smerov. Často sa nachádza na okraji odtlačku, pričom každý odtlačok môže obsahovať až dve delty. Jadro je stredom odtlačku, ktorý je definovaný ako najvnútornejší oblúk tvorený papilárnymi líniami alebo v prípade odtlačku patriaceho do triedy vír ako stred špirály. Aj napriek tomu, že jadro je definované ako stred odtlačku prsta, tento stred nemusí nutne zodpovedať stredu nasnímaného obrazu odtlačku. Triedy odtlačkov spolu s vyznačenými singulárnymi bodmi je možné vidieť na obrázku 2.3. [9] [23]

Odtlačok prsta patriaci do triedy oblúk neobsahuje žiadne singulárne body. Papilárne línie vstupujú z jednej strany, okolo stredu vytvárajú mierny oblúk a následne vystupujú druhou stranou odtlačku. Klenutý oblúk je podobný jednoduchému oblúku, avšak oblúk vytvorený papilárnymi líniami je ostrejší a vzniká tak jedno jadro a jedna delta. [22]

Slučka obsahuje minimálne jednu papilárnu líniu ktorá vchádza aj vychádza z rovnakej strany a podľa toho, z akej strany papilárne línie vchádzajú a vychádzajú je rozdelená na ľavú a pravú slučku. Sformovaná je jedna delta a jedno jadro. [22]



Obrázok 2.3: Klasifikácia odtlačkov prsta vrátane zobrazenia jadra (zelený kruh) a delty (červený trojuholník). Prevzaté z [18].

Na odtlačku triedy vír sa nachádza jedno jadro a dve delty a minimálne jedna papilárna línia obkruží stred odtlačku. [22]

Jednotlivé triedy nie sú medzi populáciou zastúpené rovnomerne. Najmenej rozšírený je oblúk, ktorý má iba 6,6 % populácie, vír má zastúpenie u 27,5 % populácie a slučku má až 65,5 % populácie. [3] [23]

2.4.2 Získavanie odtlačkov

Podľa toho, akým spôsobom bol odtlačok prsta získaný rozlišujeme tri základné druhy odtlačkov: rolovaný, pichaný a latentný. Tieto typy je možné vidieť na obrázku 2.4. [20]

Rolovaný odtlačok vzniká rolovaním prsta z jednej strany na druhú, vďaka čomu je zachytená celá plocha prsta. Pri pichanom odtlačku je prst iba položený na povrch. Výsledný odtlačok pokrýva menšiu plochu ako odtlačok získaný rolovaním. Latentný odtlačok sa získava z povrchu objektu, na ktorom ho osoba neúmyselne zanechala. Voľným okom je taký odtlačok zvyčajne neviditeľný alebo takmer neviditeľný a pre jeho získanie z povrchu objektu sa využívajú špecializované techniky s použitím napríklad chemických procesov. Oproti rolovanému a pichanému odtlačku má latentný odtlačok spravidla horšiu kvalitu. [20]

Prvé odtlačky prstov sa získavali takzvanou offline metódou. Na prst musela byť najprv nanosená vrstva čierneho atramentu a ten bol následne otláčený alebo rolovaný na papier podľa toho, či sa jednalo o pichaný alebo rolovaný odtlačok. Papier bol neskôr naskenovaný a vznikol digitálny odtlačok. Vzniknuté odtlačky však často obsahovali oblasti s chýbajúcimi informáciami v dôsledku nedostatočného alebo nadmerného množstva atramentu na prste alebo z dôvodu nedostatočného prípadne nadmerného tlaku prsta na papier. Ďalšou nepríjemnosťou bolo to, že po získaní odtlačku ostal prst špinavý od atramentu. [21] [31]

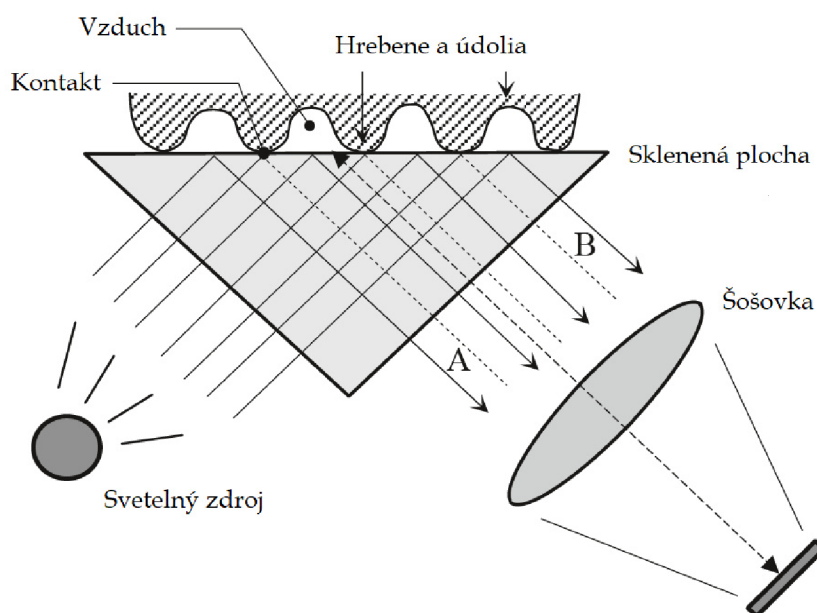
Neskôr sa začali používať online metódy využívajúce elektronické skenery odtlačkov. Skener prečíta vzor papilárnych línií z povrchu prsta a pomocou A/D prevodníka ho prevedie do digitálnej podoby [31]. Medzi dôležité parametre pri získavaní odtlačkov patrí rozlíšenie, skenovaná oblasť, počet bitov pre kódovanie farby, geometrická presnosť a kvalita obrazu [9].

V súčasnosti rozlišujeme viacero technológií senzorov, ktoré sa používajú na snímanie odtlačku. Patria medzi ne optické, kapacitné, ultrazvukové, elektrooptické, tlakové a termické technológie [9]. Optické technológie patria medzi najstaršie a najpoužívanejšie spôsoby snímania odtlačku prsta [21]. Snímaný prst je priložený na sklenenú plochu, ktorá je osvietená svetelnou diódou a následne je kamerou nasnímaný obraz. Lúč zo svetelného zdroja je od-



Obrázok 2.4: Typy odtlačkov prsta. Zľava: rolovaný, pichaný a latentný. Prevzaté z [5].

rážaný hrebeňmi, ktoré sa dotýkajú skla a absorbovaný alebo rozptýlený údolia, ktoré sú v určitej diaľke od skla. Príklad optického senzora je možné vidieť na obrázku 2.5. Poznáme aj 3D optické senzory, kedy nie je nutné prikladať prst na plochu. Senzor využívajúci kapacitné technológie je zložený z malých vodivých plošiek, na ktorých je naparená vrstva nevodivého oxidu kremičitého. Jemnosť týchto plošiek je menšia ako jemnosť papilárnych línií. Po priložení prstu vzniknú nad plochami týchto plošiek kondenzátory, ktorých výstupom je hodnota odpovedajúca prekryvu plochy plošky. Ultrazvukové technológie sú založené na rotujúcom ultrazvukovom vysielacom, ktorý rotuje po kruhovej dráhe a sníma odtlačok prsta. Táto technológia môže odhaliť aj falšované prsty, keďže ultrazvukové vlny preniknú aj pod povrch kože. Tlakový senzor je zložený z troch vrstiev, pričom medzi elektrovodivými je vložený nevodivý gél. Priložením prsta na plochu senzoru dochádza k stlačeniu nevodivého gélu, pričom sa dotknú elektrovodivé vrstvy. Termické technológie sú založené na tepelnom žiarení a využívajú fakt, že papilárne línie majú vyššie vyžarovanie tepla ako údolia medzi nimi. [9] [31] [33]



Obrázok 2.5: Optický senzor pre snímanie odtlačkov. Prevzaté a upravené z [31].

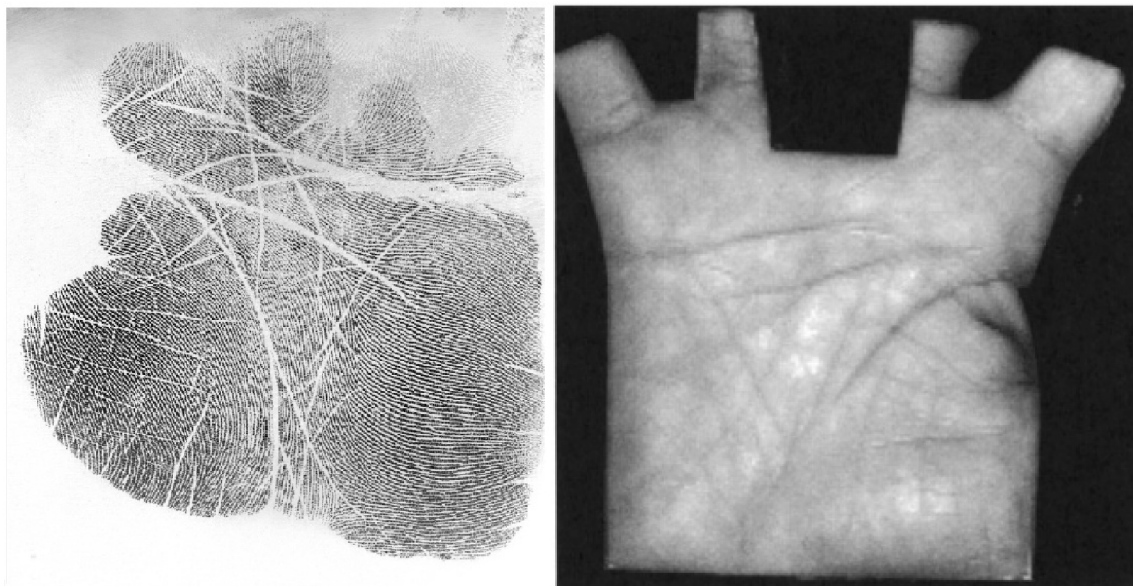
2.5 Odtlačok dlane

Dlaň môžeme definovať ako vnútorný povrch našej ruky od zápästia až po korene prstov. Odtlačok dlane je vzorom pokožky dlane, ktorá má unikátne vlastnosti tvorené fyzickými charakteristikami pokožky. Podobne ako odtlačok prsta aj odtlačok dlane je pre každého človeka jedinečný. Okrem toho, že odtlačok dlane pokrýva väčšiu plochu ako odtlačok prsta, má odtlačok dlane aj viac unikátnych vlastností, ako napríklad vzor flečných rýh, vzor vrások alebo geometrické vlastnosti ako je šírka, dĺžka a plocha odtlačku. [22] [45]

2.5.1 Typy odtlačkov dlane

Podobne ako pri odtlačkoch prstov aj odtlačky dlane môžeme získavať offline alebo online metódou. Odtlačok dlane získaný offline metódou, nazývaný tiež aj atramentový odtlačok sa získava rovnakým spôsobom ako odtlačok prsta získaný offline metódou, ktorý bol popísaný v kapitole 2.4.2. Offline odtlačky nachádzajú uplatnenie v kriminalistike a forenzných aplikáciách. [22] [45]

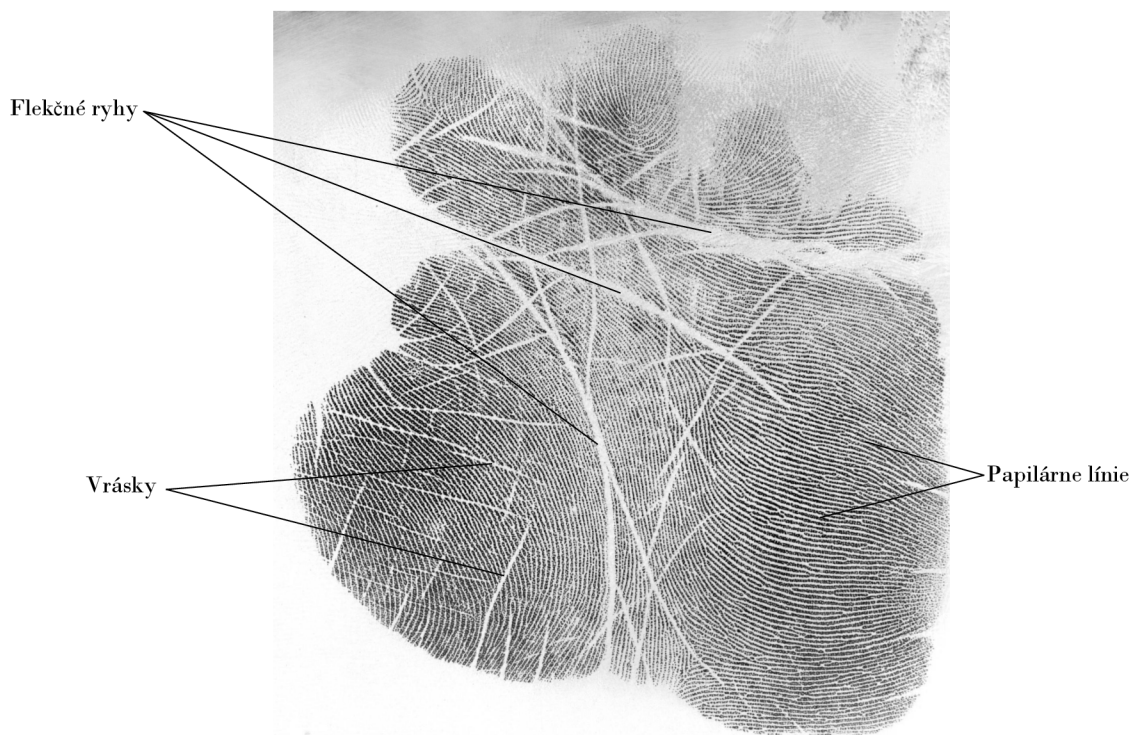
Odtlačok dlane získaný online metódou, nazývaný tiež aj bezatramentový odtlačok je možné získať pomocou skenera. Skenery musia zachytávať väčšiu plochu ako skenery odtlačkov prsta, a preto sú aj drahšie. Z dôvodu zníženia ceny sa tak používajú aj skenery, ktoré zachytávajú odtlačok v nižšom rozlíšení, často formou fotografie. Nevýhodou takého odtlačku oproti odtlačku s vysokým rozlíšením alebo odtlačku, ktorý bol získaný offline metódou je to, že jednotlivé línie na dlani majú nižší kontrast a je náročnejšie z neho extrahovať papilárne línie alebo markanty. Tento typ odtlačku je potom vhodnejší pre civilné aplikácie kontrolujúce prístup osoby. Rozdiel medzi odtlačkom získaným offline metódou a odtlačkom s nízkym rozlíšením získaným online metódou je možné vidieť na obrázku 2.6. [19] [22] [45]



Obrázok 2.6: Porovnanie typov odtlačkov dlane. Naľavo odtlačok získaný offline metódou, napravo odtlačok s nízkym rozlíšením získaný online metódou. Prevzaté z [6] a [45].

2.5.2 Útvary na dlani

Okrem papilárnych línií sa na odtlačku dlane nachádzajú ďalšie dva typy línií, a to flečné ryhy a vrásky, vid' obrázok 2.7 [34]. Flečné ryhy rozdeľujú odtlačok dlane na tri oblasti – tenar, hypotenar a interdigitálnu oblasť (obrázok 2.8) [19]. Papilárne línie formujú na odtlačku útvary nazývané trirádiá, z ktorých následne vychádzajú hlavné línie [34]. Tieto útvary je možné vidieť na obrázku 2.9.

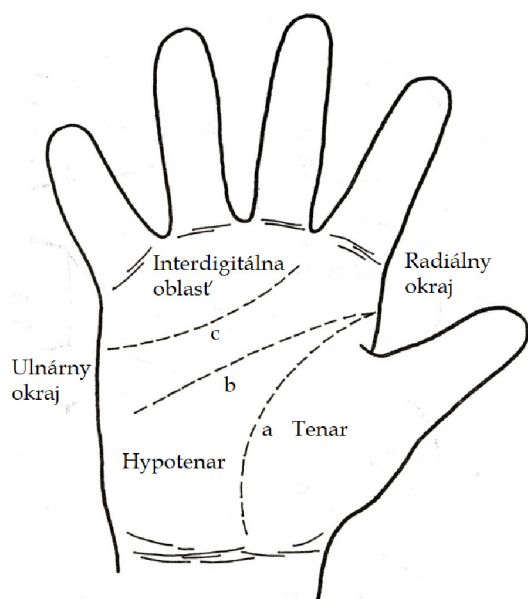


Obrázok 2.7: Znázornenie druhov línií na odtlačku dlane. Prevzaté a upravené z [6].

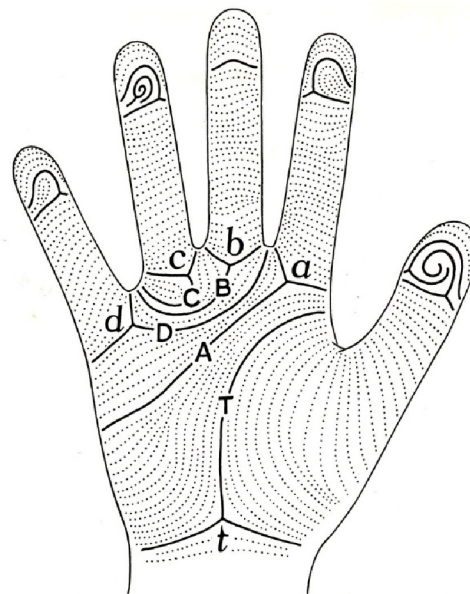
Flekčné ryhy

Flekčné ryhy sú na prvý pohľad najviditeľnejšie útvary nachádzajúce sa na odtlačku dlane. U veľkej väčšiny ľudí majú rovnaké usporiadanie, ale konkrétny tvar a vzor, do akého sa vyformujú sa u každého človeka mierne líši. Je to z dôvodu, že flekčné ryhy vznikajú pri otváraní a zatváraní dlane a spôsob, akým človek uchopí predmet sa môže líšiť. Variabilite tvaru týchto rýh prispievajú aj rozmery dlane a prstov prípadne ich hrúbka. Rozlišujú sa tri základné druhy flekčných rýh, ktoré je možné vidieť na obrázku 2.8: [34] [37] [45]

- **Radiálna longitudinálna ryha** – je nazývaná tiež aj palcová opozičná ryha alebo čiara života. Obklopuje oblasť tenaru a I. interdigitálneho priestoru a prehlbuje sa pri opozícii palca.
- **Proximálna transverzálna ryha** – je známa pod pojmmami päťprstá ryha alebo čiara hlavy. Začína na radiálnom okraji okraji dlane buď na rovnakom mieste ako palcová ryha, alebo o niečo vyššie a smerom k ulnárnemu okraju sa postupne stráca.
- **Distálna transverzálna ryha** – je označovaná aj ako trojprstá ryha alebo čiara srdca. Začína na ulnárnom okraji s spravidla končí v oblasti medzi 2. a 3. prstom.



Obrázok 2.8: Znázornenie oblastí na odtláčku dlane a flekčných rýh: a – radiálna longitudinálna ryha, b – proximálna transverzálna ryha, c – distálna transverzálna ryha. Prevzaté a upravené z [34].



Obrázok 2.9: Zobrazenie hlavných línií. Písmená a-d označujú digitálne trirádiá a z nich vychádzajúce hlavné línie sú označené písmenami A-D. Písmená t a T označujú dlaňový trirádus a z neho vychádzajúcu hlavnú líniu. Prevzaté z [34].

Vrásky

Vrásky alebo napínacie línie vznikajú vplyvom svalovej aktivity spojenej s prirodzenou činnosťou dlane a umožňujú rozťahovanie a sťahovanie pokožky na dlani. Časom sa stráca elasticita pokožky a vznikajú tak trvalé vrásky. Vrásky sú zvyčajne tenšie ako flekčné ryhy a majú menej pravidelný tvar. [28] [45]

Trirádus

Trirádus alebo trirádiový bod je bod, v ktorom sa stretávajú tri smery papilárnych línií. Línie sa môžu v trirádiovom bode stykať, čoho výsledkom je útvar nazývaný trirádus alebo sa môžu v okolí daného bodu spojiť a vytvoriť tak útvar nazývaný delta. Línie môžu tiež trirádiový bod obísť bez toho, aby sa spojili, prípadne nemusí byť trirádus vôbec prítomný. Jednotlivé typy trirádiových bodov v poradí, v akom boli popísané je možné vidieť na obrázku 2.10. [34]

Na dlani sa zvyčajne nachádzajú štyri digitálne trirádiá (jeden pod každým prstom), ktoré sú označované malými začiatočnými písmenami abecedy a–d a dlaňové (karpálne) trirádiá označované písmenom t, ktoré sú umiestnené medzi tenarom a hypotenarom. V niektorých prípadoch môže niektorý z digitálnych trirádií na odtláčku chýbať. Najčastejšie sa jedná o trirádus c, výnimočne aj d. Trirádiá, ktoré sa na odtláčku vyskytujú navyše nazývame akcesorné trirádiá. [34] [37]



Obrázok 2.10: Typy trirádiových bodov. Prevzaté z [34].

Hlavné línie

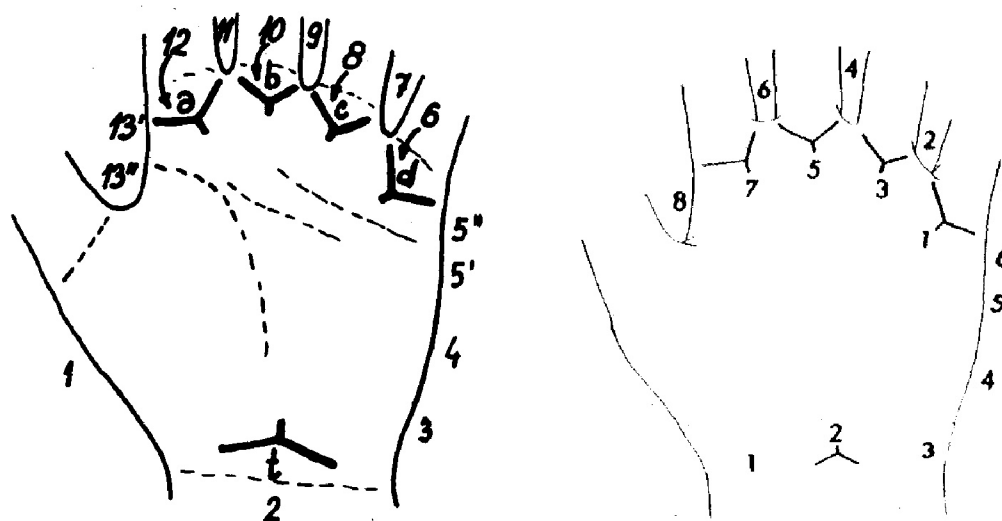
Každý trirádus má tri radianty. V prípade digitálnych trirádií vyúsťujú dve radianty medzi prsty a tretia smeruje proximálne, teda smerom do dlane. Radianta smerujúca proximálnym smerom má zvyčajne dlhší priebeh a nazýva sa hlavná línia. V prípade dľaňového trirádia je hlavnou líniou radianta, ktorá smeruje distálnym smerom, teda smerom k prstom. Hlavné línie sú označované veľkými písmenami na základe trirádia, z ktorého vychádzajú. [34] [37]

2.5.3 Formula a index hlavných línií

Miesto, v ktorom hlavná línia opúšťa povrch odtlačku dlane nazývame zakončenie hlavnej línie. Vyznačením priebehu hlavných línií až do miesta ich zakončenia tak získame kostru konštrukcie papilárnych línií na odtlačku dlane. [37]

Hlavné línie je možné klasifikovať pomocou číselného označenia miesta zakončenia každej línie. Celý okraj dlane je rozdelený na 15 častí, pričom číslovanie jednotlivých častí prebieha na odtlačku pravej dlane proti smeru otáčania hodinových ručičiek. Grafické znázornenie číselných označení okraja odtlačku je možné vidieť na obrázku 2.11. Líniu končiacu na rádio-proximálnom okraji dlane až po dľaňový trirádus, teda v oblasti medzi palcom a spodným okrajom dlane klasifikujeme ako zakončenie 1. Zakončenie 2 má línia v prípade, že končí v dľaňovom trirádiu. Ulnárny okraj dlane je rozdelený na tri časti. Zakončenie 3 predstavuje časť okraja odtlačku od spodného bodu ulnárneho okraja po jeho stredný bod. Stredný bod ulnárneho okraja klasifikujeme ako zakončenie 4 a časť okraja nad ním klasifikujeme ako zakončenie 5. Táto časť je ešte ďalej rozdelená na $5'$ a $5''$, pričom deliacim bodom je miesto, v ktorom vyúsťuje distálna trasverzálna ryha. Línie, ktoré končia v digitálnych trirádiách označujeme párnymi hodnotami. Trirádus d má označenie 6, trirádus c označenie 8, trirádus b označenie 10 a zakončenie v trirádiu a má označenie 12. Zakončenie v priestoroch medzi trirádiami majú nasledovné označenia: $d-c$ má označenie 7, $c-b$ označenie 9 a $b-a$ má označenie 11. Radiálny okraj dlane nad palcom klasifikujeme ako zakončenie 13, pričom táto časť je opäť rozdelená na časti $13'$ a $13''$ na základe vyúsťenia flekčnej ryhy. [34] [37]

Zápis zakončení hlavných línií potom tvorí formulu dlane, ktorá je zapisovaná v poradí D, C, B, A, T . Príkladom formuly dlane je zápis 11, 9, 7, $5'$, $13'$. Zakončenia hlavných línií na rôznych odtlačkoch môžu vytvárať mnoho rozdielnych formulí, pričom ich počet sa môže vo väčšej vzorke pohybovať až okolo hodnoty 200. Index hlavných línií je súčet hodnôt zakončenia línií A a D . Pri určovaní indexu sa môžeme stretnúť s alternatívnym číselným označením jednotlivých zakončení, ktoré je možné vidieť na obrázku 2.11. [37]



Obrázok 2.11: Grafické znázornenie číslovania okraja odtlačku pre klasifikáciu hlavných línií. Ľavá strana označuje číslovanie pri určovaní formuly hlavných línií, pravá strana označuje číslovanie pri určovaní indexu hlavných línií. Prevzaté a upravené z [37].

2.6 Rozpoznávanie podľa odtlačkov prsta a dlane

Pri rozpoznávaní odtlačku je potrebné porovnať vstupný odtlačok s odtlačkom z databázy. To je pomerne náročný proces hlavne z dôvodu variability odtlačkov toho istého prsta alebo dlane, ktorú môže spôsobiť rozdielna poloha prsta na snímacom zariadení pri získavaní odtlačku, drobné poranenia alebo nečistoty na odtlačku prípadne šum. [31]

Pre porovnávanie odtlačkov prstov poznáme rôzne metódy, ktoré môžu byť založené na markantoch, na korelácii alebo na vlastnostiach papilárnych línií [9]. Keďže odtlačok dlane obsahuje viac unikátnych vlastností ako odtlačok prsta, je možné okrem spomínaných metód použiť aj metódy na základe vlastností línií dlane alebo iné [45].

2.6.1 Metódy založené na markantoch

Metódy založené na markantoch sú v súčasnosti najviac používané metódy. Vo všeobecnosti sa jedná o problematiku porovnávania vzorov, kedy sa porovnávajú dve skupiny markantov vyextrahovaných z odtlačkov. Markanty sú najčastejšie popísané svojou pozíciou, typom a smerom. [9] [36]

Pri týchto metódach je v prvom rade potrebné zarovnanie oboch odtlačkov za účelom maximalizovania podobnosti markantov. Zarovnanie zvyčajne zahŕňa posun a rotáciu odtlačku. Následne sú dva markanty považované za rovnaké, ak sa zhodujú svojím typom a ich vzdialenosť a rozdiel ich smeru sú menšie ako určená hranica. [31]

2.6.2 Metódy založené na korelácii

Pri metódach založených na korelácii sú odtlačky navzájom prekryté a následne je počítaná korelácia medzi zodpovedajúcimi pixelmi pre rôzne prekrytia obrazov (ich posuny, rotácie a podobne) [31]. Nevýhodou tohto typu metód je ich vyššia výpočetná náročnosť [9].

Samotná korelácia pre rôzne prekrytia obrazov však iba málokedy podáva uspokojivé výsledky. Je to najmä kvôli problémom spojeným s nelineárnym skreslením, ktoré spôsobuje, že odtlačky toho istého prsta sa môžu výraznejšie líšiť z hľadiska globálnej štruktúry alebo z dôvodu rozdielného stavu pokožky prípadne rozdielného tlaku prsta pri zaznamenávaní odtlačku, čo spôsobuje rozdielny kontrast alebo hrúbku papilárnych línií jednotlivých odtlačkov. [31]

Prvý z menovaných problémov sa zvyčajne rieši počítaním korelácie lokálne, kedy je jeden obraz odtlačku rozdelený na menšie regióny a tie sú nezávisle korelované s celým druhým obrazom odtlačku. Výsledná podobnosť je potom získaná kombináciou lokálnych korelácií. Rozdielny stav pokožky alebo tlak pri zaznamenávaní odtlačku je možné riešiť normalizáciou alebo ďalšími metódami vylepšovania obrazu odtlačku. [24] [31]

2.6.3 Metódy založené na vlastnostiach papilárnych línií

Metódy založené na vlastnostiach papilárnych línií sú zvyčajne používané pri malej ploche odtlačku, kde je počet markantov malý alebo pri odtlačkoch s nižším rozlíšením, v ktorých je extrakcia markantov pomerne náročná. V takom prípade je extrakcia iných vlastností, ako je napríklad orientácia, frekvencia a tvar papilárnych línií alebo informácie o textúre odtlačku spoľahlivejšia ako extrakcia markantov, avšak tieto vlastnosti majú nižšiu rozlišovaciu schopnosť. [31] [32]

2.6.4 Metódy založené na vlastnostiach línií dlane

Metódy založené na vlastnostiach línií dlane je možné použiť ako na odtlačkoch získaných offline metódou, tak aj na odtlačkoch získaných online metódou. Tieto metódy sa zameriavajú najmä na tvar a umiestnenie flekčných rýh prípadne vrások na dlani. Metódy používané pri offline odtlačkoch alebo online odtlačkoch s vysokým rozlíšením môžu využívať rôzne filtre, ktorými detegujú segmenty rovných línií vo viacerých smeroch. Následne sú segmenty z každého smeru spojené do výsledného obrazu, ktorý sa porovná s referenčným obrazom za účelom rozpoznania odtlačku. Metódy používané pri online odtlačkoch s nízkym rozlíšením ťažia z intenzity šedotónovej farby línií, keďže flekčné ryhy a vrásky sa na obraze odtlačku dlane javia tmavšou farbou ako zvyšok papilárnych línií. [44] [45]

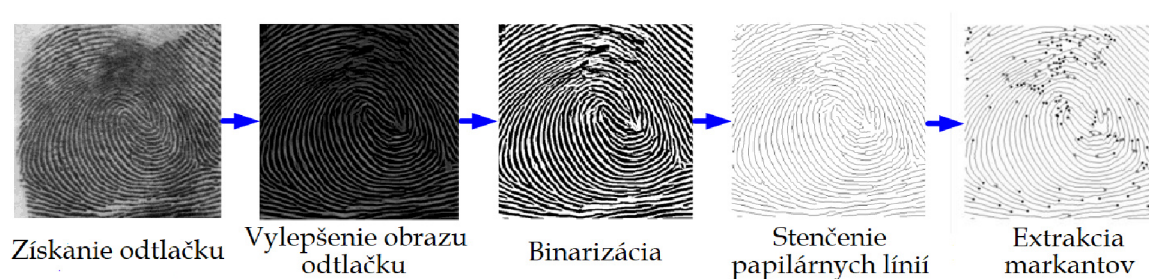
Kapitola 3

Spracovanie papilárnych línií

Po získaní odtlačku prsta alebo dlane je potrebné spracovať papilárne línie a extrahovať z nich informácie využiteľné pri rozpoznávaní. Rozpoznávanie najčastejšie prebieha na základe markantov. Získaný odtlačok však často obsahuje nedokonalosti, ako napríklad šum alebo drobné poranenia, ktoré môžu byť spôsobené nekvalitným senzorom, nesprávnym tlakom prsta alebo dlane prípadne nepriaznivým stavom pokožky. To všetko môže sťažiť odlíšenie papilárnych línií od údolí a viesť k nezachyteniu alebo falošnej detekcii markantov prípadne k strate iných dôležitých informácií z odtlačku prsta alebo dlane. Preto je pred samotnou extrakciou markantov potrebné vykonať niekoľko krokov, ktoré vedú k vylepšeniu obrazu odtlačku. Najmä pri odtlačkoch dlane, ktoré aj pri kvalitnom získaní odtlačku obsahujú flečné ryhy a mnoho vrások je proces vylepšovania odtlačku veľmi dôležitý. Typické kroky, ktoré vedú od získania odtlačku až k extrakcii markantov je možné vidieť na obrázku 3.1. [21]

Cieľom vylepšenia odtlačku je zlepšiť viditeľnosť v oblastiach kde poškodenie nie je príliš veľké a označiť neobnoviteľne poškodené regióny, teda oblasti, v ktorých sú papilárne línie a údolia nerozoznatelné a nie je ich možné opraviť. Vylepšenie obrazu odtlačku je najčastejšie založené na kontextuálnom filtrovaní. Pri kontextuálnom filtrovaní sa charakteristika filtra mení na základe lokálneho kontextu (menšieho okolia), ktorý je definovaný lokálnou orientáciou a frekvenciou papilárnych línií. Správny filter tak môže efektívne odstrániť nežiadúci šum a zachovať pritom reálnu štruktúru papilárnych línií. [21] [31]

Spôsoby získavania odtlačkov boli popísané v kapitole 2.4.2. V tejto kapitole bude popísaný proces vylepšovania odtlačku, ktorý často zahŕňa určenie lokálnej orientácie papilárnych línií, určenie lokálnej frekvencie papilárnych línií a následné vylepšenie pomocou



Obrázok 3.1: Proces rozpoznávania podľa odtlačkov. Prevzaté a upravené z [23].

Gaborovho filtra. V ďalšej časti bude popísaná binarizácia, stenčovanie papilárnych línií a extrakcia markantov.

3.1 Lokálna orientácia papilárnych línií

Pred určením lokálnych orientácií papilárnych línií zvyčajne dochádza k normalizácii obrazu odtlačku. Cieľom normalizácie je redukcia rozdielov intenzity šedej farby jednotlivých pixelov pozdĺž hrebeňov a údolí, čo by malo zlepšiť ďalšie spracovanie obrazu. [16] [31]

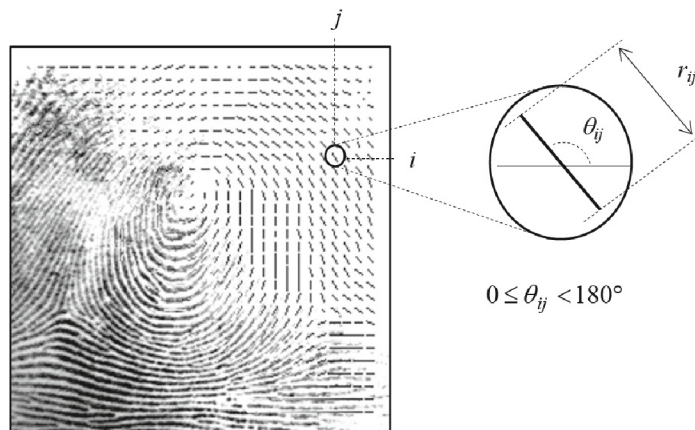
Nech $I(i, j)$ je intenzita šedej v bode (i, j) . Normalizovaný obraz $G(i, j)$ je potom možné získať pomocou vzťahu:

$$G(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{V_0(I(i, j) - M)^2}{V}}, & \text{keď } I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{V_0(I(i, j) - M)^2}{V}}, & \text{inak,} \end{cases} \quad (3.1)$$

kde V je rozptyl intenzít, M je aritmetický priemer intenzít, V_0 reprezentuje požadovaný rozptyl a M_0 reprezentuje požadovaný priemer intenzít normalizovaného obrazu. [16]

Lokálnu orientáciu papilárnych línií v bode (x, y) môžeme definovať ako uhol θ_{xy} , ktorý zvierajú papilárna línia s horizontálnou osou. Je počítaná vzhľadom k malému okoliu bode, ktorého stredom je pixel (x, y) . Keďže papilárne línie nemajú smer, uhol θ_{xy} môže nadobúdať iba hodnoty 0° – 180° . [21] [31]

Pre ukládanie orientácií papilárnych línií sa používa pole orientácií. Jedná sa o dvojdimenzionálne pole, ktorého prvky θ_{xy} reprezentujú orientáciu v bode (x, y) . V praxi sa často neukladá orientácia pre každý pixel, ale používa sa blokové pole orientácií, kedy je obraz rozdelený na mriežku neprekrývajúcich sa štvorcových blokov o rovnakej veľkosti. Orientácia θ_{ij} bloku (i, j) je následne vypočítaná ako priemer orientácií jednotlivých pixelov, ktoré sa nachádzajú v danom bloku. Príklad lokálnej orientácie papilárnych línií je možné vidieť na obrázku 3.2. S každým prvkom θ_{ij} sa často spája aj hodnota r_{ij} , ktorá reprezentuje spoľahlivosť hodnoty θ_{ij} . Hodnota r_{ij} je nízka v zašumených a vážne poškodených regiónoch odtlačku a naopak vysoká v regiónoch s vysokou kvalitou. [31]



Obrázok 3.2: Znázornenie lokálnej orientácie papilárnych línií. Prevzaté z [31].

Poznáme viacero metód výpočtu poľa orientácií. Medzi najznámejšie a najjednoduchšie patrí metóda založená na gradientoch [43]. Gradient $\delta(x, y)$ v bode (x, y) je dvojrozmerný vektor $[\delta_x(x, y), \delta_y(x, y)]$, kde δ_x a δ_y sú deriváty v bode (x, y) vzhľadom na smer osí x a y [31]. Fázový uhol gradientu následne určuje smer maximálnej zmeny intenzity pixelov, čo reprezentuje prechod z hrebeňa do údolia [31]. Pre výpočet gradientov je možné použiť Sobelov operátor [16]. Jednotlivé gradienty sú vypočítané pre každý pixel samostatne. Následne je obraz rozdelený na bloky o veľkosti $w \times w$ so stredom v bode (i, j) . Orientáciu pre každý blok potom môžeme vypočítať pomocou nasledujúcich vzťahov [25] [49]:

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-w/2}^{i+w/2} \sum_{v=j-w/2}^{j+w/2} 2\delta_x(u, v)\delta_y(u, v) \quad (3.2)$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-w/2}^{i+w/2} \sum_{v=j-w/2}^{j+w/2} (\delta_x^2(u, v)\delta_y^2(u, v)) \quad (3.3)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{V_y(i, j)}{V_x(i, j)} \right) + 90^\circ \quad (3.4)$$

Z dôvodu šumu alebo poškodenia štruktúry hrebeňov a údolí nemusia byť výsledné orientácie vždy správne. Keďže lokálne orientácie papilárnych línií sa s výnimkou oblastí, ktoré obsahujú singulárne body menia oproti okolitým orientáciám iba pomaly, je tento problém možné vyriešiť napríklad dolnopriepustným filtrom, ktorý vyhladí rýchle zmeny. [16]

Ďalším možným spôsobom určenia orientácie papilárnych línií je Methreova metóda [48]. Túto metódu môžeme popísať pomocou nasledujúcich krokov:

1. Určenie N možných orientácií d , ktoré budú zodpovedať uhlom v rozmedzí 0° – 180° a určenie počtu susedných pixelov, na základe ktorých sa bude orientácia určovať.
2. Výpočet súčtu rozdielov intenzít šedej S_d pozdĺž jednotlivých orientácií. Výpočet je možné realizovať vzťahom:

$$S_d = \sum_{k=1}^m (f_d^*(i, j) - f_d(i_k, j_k)), \quad (3.5)$$

kde (i, j) sú súradnice pixelu, $f_d^*(i, j)$ je intenzita šedej pixelu (i, j) , $f_d(i_k, j_k)$ je intenzita šedej pixelov (i_k, j_k) pozdĺž orientácie d a m je počet susedných pixelov.

3. Pre každú orientáciu d výpočet súčtu S_d susedných pixelov, ktoré sú kolmé na orientáciu d pomocou vzťahu:

$$S_d' = \sum_{k=1}^m S_{dk}^*(i, j) \quad (3.6)$$

4. Výsledná orientácia pixelu (i, j) je orientácia d , ktorá má najmenšiu hodnotu S_d' .

Vyššie spomenuté metódy pracovali v priestorovej doméne. Existujú však aj metódy pracujúce vo frekvenčnej doméne. V týchto metódach je štruktúra hrebeňov a údolí reprezentovaná pomocou dvojdimeznionálnej sínusovej vlny. Úloha nájdenia orientácie papilárnych línií je potom transformovaná do úlohy nájdenia parametrov sínusovej vlny v každom bloku. Na každý blok so stredom v bode (u, v) je aplikovaná diskretná Fourierova transformácia

(DFT) $F(u, v)$, pomocou ktorej je nájdených niekoľko bodov s maximálnou amplitúdou. Každý z týchto bodov so súradnicami (x, y) zodpovedá sínusovej vlne vyjadrenej vzťahom: [7] [12] [19]

$$w(x, y) = a \cdot \sin(2\pi f(\cos(\theta)x + \sin(\theta)y + \phi)), \quad (3.7)$$

kde a je amplitúda, f je frekvencia, θ je orientácia a ϕ je fáza vlny. Tieto parametre je možné vypočítať pomocou vzťahov:

$$a = |F(x, y)| \quad (3.8)$$

$$f = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{64} \quad (3.9)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.10)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(F(x, y))}{\text{Re}(F(x, y))}\right) \quad (3.11)$$

Keď daný blok obsahuje len papilárne línie, DFT bude mať iba jeden silný vrchol v určitom bode a daná sínusová vlna bude zodpovedať orientácii a frekvencii papilárnych línií. Prípočítaním uhla 90° k hodnote θ tak získame orientáciu papilárnych línií v danom bloku. V prípade, že blok obsahuje vrásky alebo iné nedokonalosti, DFT bude mať viacero silnejších vrcholov a pri určení správnej orientácie je nutné pomôcť si okolitými blokmi. Výhodou tejto metódy je fakt, že spolu s orientáciou papilárnych línií je získaná aj ich frekvencia v každom bloku. [7] [12] [19]

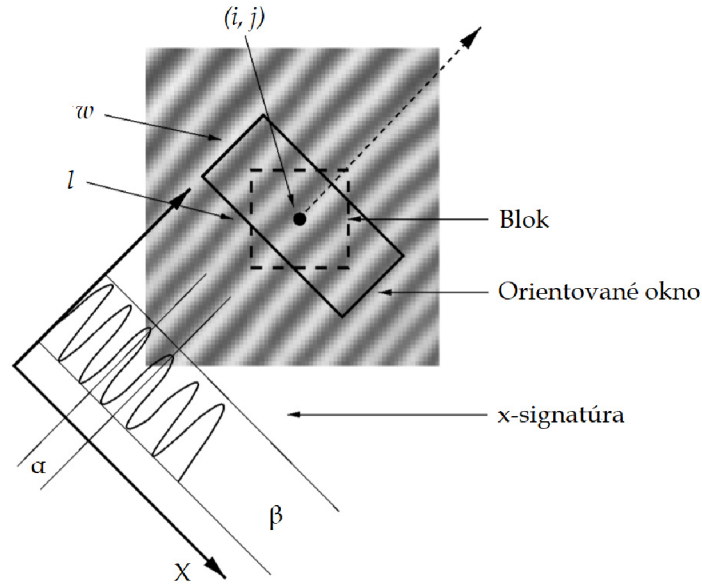
3.2 Lokálna frekvencia papilárnych línií

Lokálna frekvencia papilárnych línií f_{xy} v bode (x, y) je počet hrebeňov na jednotku dĺžky pozdĺž hypotetického segmentu so stredom v bode (x, y) , ktorý je kolmý na orientáciu papilárnych línií v danom bode. [14] [31]

Pre výpočet lokálnej frekvencie papilárnych línií je možné použiť metódu založenú na sínusovej vlne. V lokálnej oblasti odtlačku, kde sa nenachádza žiadny markant ani singulárne body, môžu byť intenzity šedej farby pozdĺž hrebeňov a údolí modelované ako sínusová vlna, ktorá je kolmá na orientáciu papilárnych línií v danom okolí. Grafické znázornenie určenia lokálnej frekvencie je možné vidieť na obrázku 3.3. Pri predpoklade, že G je normalizovaný obraz a O je pole orientácií obrazu je možné lokálnu frekvenciu papilárnych línií vypočítať pomocou nasledujúcich krokov: [16] [31]

1. Rozdelenie obrazu na bloky o veľkosti $w \times w$.
2. Pre každý blok so stredom v bode (i, j) zostrojenie orientovaného okna o veľkosti $l \times w$ na základe orientácie papilárnych línií v danom bloku.
3. Pre každý blok so stredom v bode (i, j) výpočet x-signatúry $X[0], X[1], \dots, X[l-1]$ hrebeňov a údolí v orientovanom okne pomocou vzťahov:

$$X[k] = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} G(u, v) \quad (3.12)$$



Obrázok 3.3: Grafické znázornenie frekvencie papilárnych línií na základe x-signatúry. Prevzaté a upravené z [16].

$$u = i + \left(d - \frac{w}{2}\right) \cos O(i, j) + \left(k - \frac{l}{2}\right) \sin O(i, j) \quad (3.13)$$

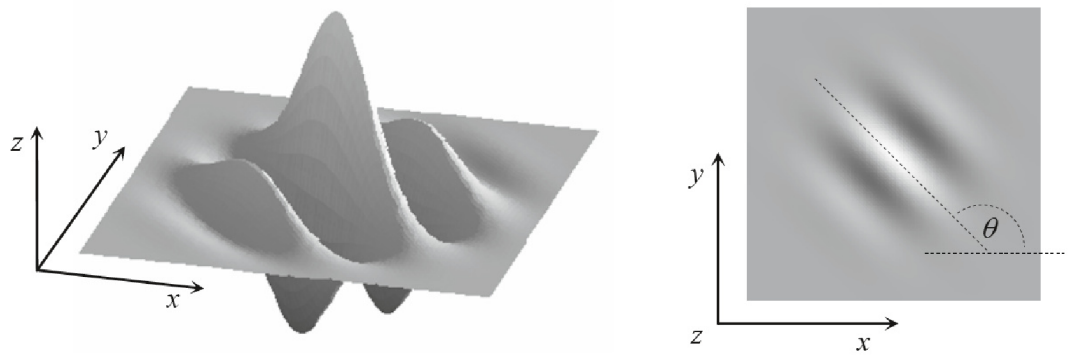
$$v = j + \left(d - \frac{w}{2}\right) \sin O(i, j) + \left(\frac{l}{2} - k\right) \cos O(i, j) \quad (3.14)$$

Keď sa v orientovanom okne nenachádzajú markanty ani singulárne body, x-signatúra sformuje diskretnú sínusovú vlnu, ktorá má rovnakú frekvenciu ako hrebene a údolia v orientovanom okne. Pri predpoklade, že $T(i, j)$ je priemerný počet pixelov medzi dvoma susednými vrcholmi x-signatúry, je možné frekvenciu $\Omega(i, j)$ vypočítať ako: $\Omega(i, j) = 1/T(i, j)$. Ak nie je možné detegovať po sebe idúce vrcholy x-signatúry, frekvencii je priradená hodnota -1 , aby ju bolo možné odlíšiť od validných frekvencií. [16]

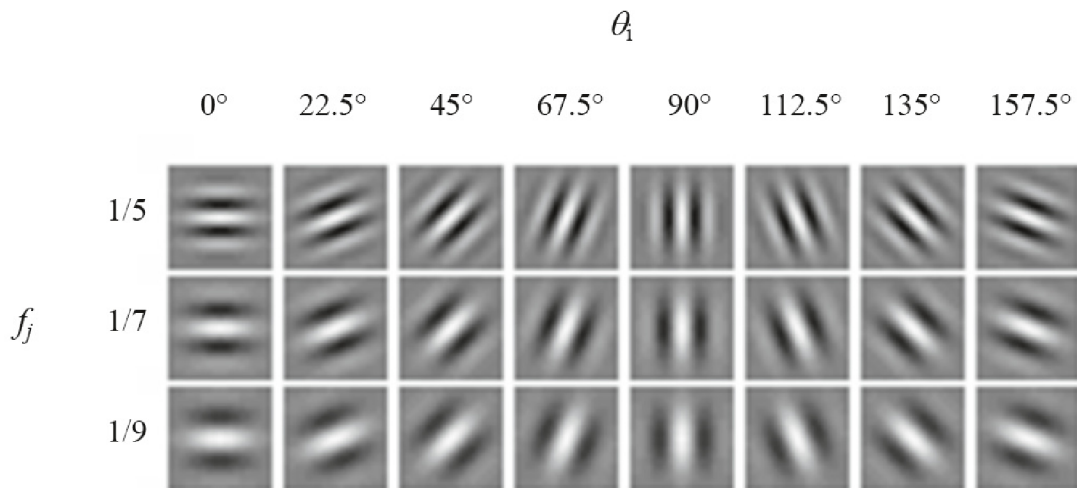
V blokoch, v ktorých sa nachádzajú markanty alebo sínusové body, hrebene a údolia nevytvoria dobre definovanú sínusovú vlnu a frekvencia daného bloku musí byť interpolovaná zo susedných blokov. [16]

3.3 Vylepšovanie obrazu odtlačku

Po získaní lokálnej orientácie a frekvencie papilárnych línií je možné pristúpiť k vylepšeniu obrazu odtlačku. Sínusové vlny, ktoré formujú hrebene a údolia sa v lokálnom susedstve líšia iba mierne. Z toho dôvodu môže pásmový filter so zodpovedajúcou orientáciou a frekvenciou efektívne odstrániť nežiadúci šum a zachovať pritom reálnu štruktúru papilárnych línií. Gaborove filtre majú orientačne aj frekvenčne selektívne vlastnosti, optimálne spoločné rozlíšenie ako v priestorovej, tak aj vo frekvenčnej doméne a poskytujú aj odolnosť voči meniacemu sa jas a kontrastu obrazu. Preto sú ideálnym prostriedkom na odstránenie nežiadúceho šumu. [16] [27]



Obrázok 3.4: Grafická reprezentácia Gaborovho filtra definovaného parametrami $\phi = 135^\circ$, $f = 1/5$, $\delta_x = 3,0$ a $\delta_y = 3,0$. Prevzaté z [31].



Obrázok 3.5: Ukážka banky Gaborových filtrov. Prevzaté z [31].

Gaborov filter je možné reprezentovať ako:

$$h(x, y : \phi, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_\phi^2}{\delta_x^2} + \frac{y_\phi^2}{\delta_y^2} \right] \right\} \cos(2\pi f x_\phi) \quad (3.15)$$

$$x_\phi = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (3.16)$$

$$y_\phi = -x \sin \phi + y \cos \phi, \quad (3.17)$$

kde ϕ je orientácia Gaborovho filtra, f je frekvencia sínusovej vlny a hodnoty δ_x a δ_y sú priestorové konštanty Gaussovej obálky pozdĺž osí x a y . Orientácia a frekvencia Gaborovho filtra je získaná z lokálnej orientácie a frekvencie papilárnych línií. Hodnoty δ_x a δ_y je potrebné si zvoliť, avšak pri ich volení je potrebné brať ohľad na niekoľko skutočností.

Čím sú hodnoty vyššie, tým je filter robustnejší voči šumu, no na druhú stranu sa zvyšuje pravdepodobnosť vytvorenia falošných papilárnych línií. Nízke hodnoty sú naopak menej efektívne pri odstraňovaní šumu. Grafické znázornenie Gaborovho filtra je zobrazené na obrázku 3.4. [16] [31]

Pre zníženie časovej náročnosti filtrácie sa miesto výpočtu najlepšieho filtra pre každý pixel používa tzv. banka Gaborových filtrov, ktorá má predom definovaný počet orientácií θ_i a frekvencií f_j . Pre filtráciu každého pixelu (x, y) je následne použitý filter banky, ktorého orientácia θ_i je najbližšia lokálnej orientácii θ bodu (x, y) a ktorého frekvencia f_j je najbližšia lokálnej frekvencii f bodu (x, y) . Príklad banky Gaborových filtrov je zobrazený na obrázku 3.5. [31]

Vylepšenie pomocou Gaborových filtrov produkuje takmer binárny obraz, ktorý je potom možné jednoducho binarizovať použitím vhodného prahu [4].

3.4 Binarizácia

Úlohou binarizácie je prevod šedotónového obrazu na obraz obsahujúci iba dve farby – bielu a čiernu. Binarizácia slúži na zvýšenie kontrastu medzi hrebeňmi a údoliami na odtlačku a tým pádom ich jednoduchšie rozlíšenie. Naivným prístupom binarizácie je použitie globálneho prahu t , kedy pixely s hodnotou šedej menšou ako prah t sú reprezentované ako čierne a pixely s hodnotou šedej väčšou ako prah t sú reprezentované ako biele. V niektorých prípadoch, kedy sa jednotlivé časti odtlačku líšia svojim kontrastom a intenzitou farby papilárnych línií nemusí byť použitie globálneho prahu dostatočné, pretože by mohlo dôjsť k odstráneniu papilárnych línií na miestach, kde sú príliš svetlé alebo k odstráneniu údolí na miestach, kde sú príliš tmavé. Preto je zvyčajne vhodné použiť metódy s adaptívnym lokálnym prahom pre binarizáciu menších častí obrazu. Binarizovaný obraz odtlačku je možné vidieť na obrázku 3.6b. [13] [31]

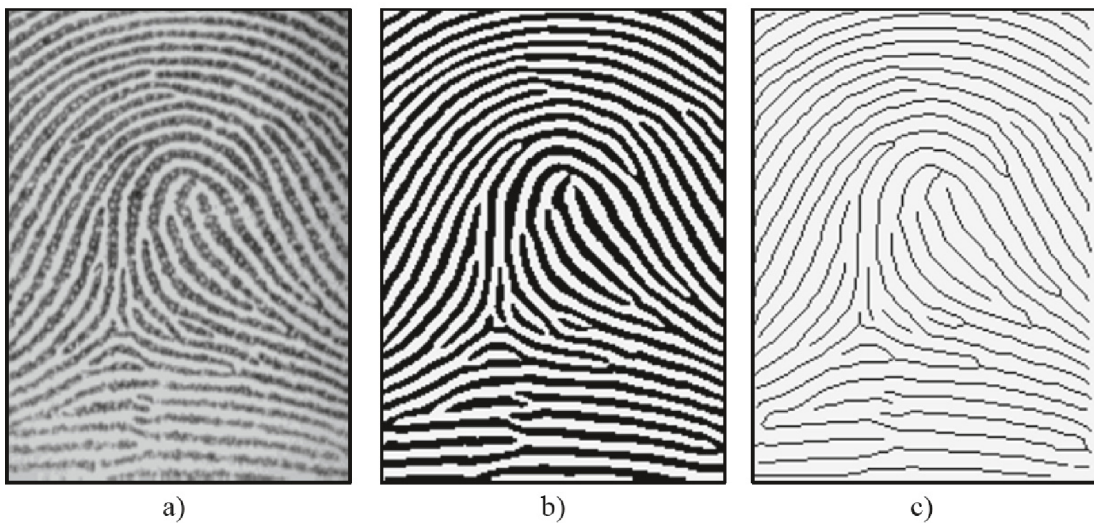
Jednou z najznámejších a najviac používaných metód binarizácie je Otsuov prahovací algoritmus [35]. Jedná sa o metódu založenú na zhlukovaní, kedy sú pixely zhlukované do dvoch tried podľa intenzity šedej. Táto metóda nájde optimálny prah pre celý obraz, ktorý minimalizuje medzitriedny rozptyl intenzít. Pre nájdenie prahu sa používa histogram obrazu. [50]

Nie všetky metódy extrakcie markantov používajú binarizáciu, keďže so sebou môže priniesť aj nejaké nevýhody, ako napríklad stratu niektorých informácií. Binarizácia môže byť aj časovo náročná, pričom pri odtlačkoch s nízkou kvalitou nemusí podávať uspokojivé výsledky. [31]

3.5 Stenčovanie papilárnych línií

Stenčovanie papilárnych línií má za úlohu redukovať šírku papilárnych línií na jeden pixel. Výsledkom stenčenia papilárnych línií je tzv. kostra odtlačku. Pri metódach stenčovania je dôležité, aby papilárne línie neubúdali v žiadnom smere, čo by mohlo narušiť reálnu pozíciu markantov. Odtlačok obsahujúci stenčené papilárne línie je možné vidieť na obrázku 3.6c. [9]

Príkladom metódy stenčovania papilárnych línií je metóda Emyroglu, ktorá používa dva typy bodov – *Ridge Meeting Point* a *Ridge Continuity Point* [9]. Medzi ďalšie používané metódy patrí napríklad Stentifordova metóda, ktorá používa masky o veľkosti 3×3 , kde centrom masky je vždy čierny pixel a na základe nich postupne maže čierne pixely



Obrázok 3.6: Ukážka výsledku binarizácie a stenčenia papilárnych línií: a) pôvodný odtlačok, b) binarizovaný odtlačok, c) kostra odtlačku po stenčení papilárnych línií. Prevzaté z [31].

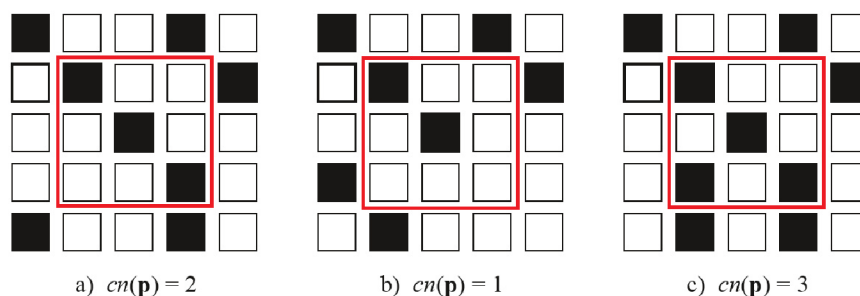
alebo Holtova metóda, ktorá nepracuje formou iterácií, ale používa logické výrazy v oknách o veľkosti 3×3 [13].

Výsledná kostra odtlačku vo veľkej miere závisí na kvalite binárneho obrazu odtlačku získaného v predchádzajúcom kroku. V prípade, že odtlačok obsahuje póry, ktoré neboli odstránené vo fáze vylepšovania odtlačku, prejavajú sa na papilárnych líniách ako biele body. Tie môžu spôsobiť prerušenia v kostre odtlačku, ktoré môžu byť následne falošne detegované ako markanty ukončenia. Podobné problémy môžu spôsobiť nerovnosti na okrajoch papilárnych línií, ktoré sa v kostre prejavujú ako mierne výbežky a rovnako môžu byť detegované ako falošné markanty. [31]

3.6 Extrakcia markantov

Posledným krokom je extrakcia markantov. V prípade, že sme pomocou binarizácie a stenčenia papilárnych línií dostali kostru odtlačku, je možné použiť metódu využívajúcu tzv. *crossing number*. Táto metóda využíva okno o veľkosti 3×3 , ktorým prechádza všetky pixely nachádzajúce sa na papilárnych líniách. *Crossing number* $cn(p)$ v bode p , ktorý je stredom okna 3×3 potom reprezentuje počet čiernych pixelov, ktoré sa nachádzajú v okolí daného bodu v rámci definovaného okna. Na základe hodnoty *crossing number* sa následne určí prítomnosť markantu v bode p nasledujúcim spôsobom: [1] [31]

- $cn(p) = 1$ – v bode p sa nachádza markant typu ukončenie (obrázok 3.7b).
- $cn(p) = 2$ – v bode p sa nenachádza markant (obrázok 3.7a).
- $cn(p) = 3$ – v bode p sa nachádza markant typu rozdvojenie (obrázok 3.7c).
- $cn(p) > 3$ – v bode p sa nachádza komplexnejší markant.



Obrázok 3.7: Ilustrácia detekcie markantov pomocou *crossing number*: a) žiadny markant, b) markant ukončenie, c) markant rozdvojenie. Prevzaté a upravené z [31].

Smer markantu sa následne určí pomocou lokálnej orientácie papilárnej línie v danom bode, ktorú je možné získať z poľa orientácií. [31]

Poznáme však aj metódy, ktoré preskakujú krok binarizácie a stenčovania papilárnych línií a extrahujú markanty priamo zo šedotónového obrazu odtlačku. Vďaka tomu tieto metódy predídú možným nedostatkom binarizácie a stenčenia papilárnych línií, ktoré sú spojené s vytvorením falošných markantov a znížia celkovú časovú náročnosť procesu.

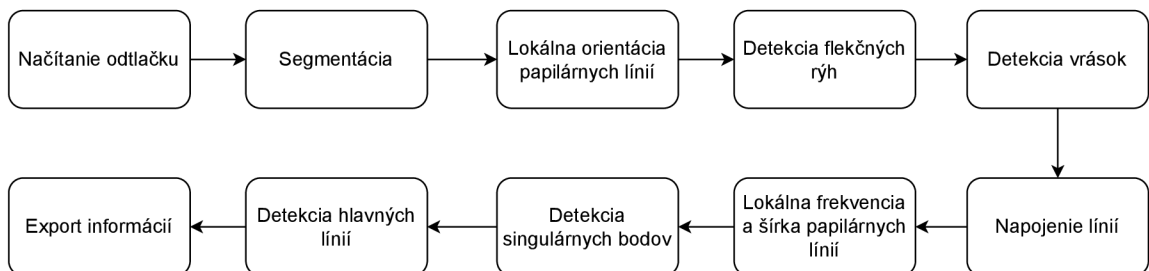
Príkladom takej metódy je metóda *Ridge line following* [30]. Princípom tejto metódy je sledovanie papilárnej línie, pokiaľ nedôjde na koniec, čo by reprezentovalo markant ukončenie alebo pokiaľ nedôjde na miesto, kde sa štiepi, čo by reprezentovalo markant rozdvojenie. Sledovanie papilárnej línie prebieha na základe poľa orientácií. V každom reze papilárnej línie, kolmom na jej lokálnu orientáciu sa určí maximálna hodnota intenzity šedej. Daná hodnota je potom ďalším bodom detegovanej papilárnej línie. Algoritmus následne pokračuje hľadaním maximálnej hodnoty intenzity šedej v ďalšej oblasti. Takým spôsobom je možné aproximovať papilárnu líniu až pokiaľ nebude prejdená celá alebo pokiaľ nebude detegovaný markant. [31]

Kapitola 4

Návrh

Cieľom tejto kapitoly bude popísať návrh aplikácie, ktorá získa podrobné informácie z odtlačku dlane a poskytne export získaných dát. Aplikácia bude mať za úlohu extrahovať informácie o orientácii, frekvencii a šírke papilárnych línií, detegovať flekčné ryhy a trirádiá a určiť zakončenie hlavných línií na základe sledovania ich priebehu. Z dôvodu zvýšenia presnosti pri určovaní frekvencie a šírky papilárnych línií bude aplikácia detegovať vrásky a následne sa bude snažiť napojiť papilárne línie cez detegované vrásky a flekčné ryhy.

Činnosť aplikácie je možné rozdeliť na menšie podproblémy, ktoré sú v poradí, v akom budú riešené zobrazené na obrázku 4.1. Aby boli získané informácie čo najpresnejšie, je potrebné vybrať vhodné metódy pre jednotlivé čiastkové úlohy, ktoré si budú vedieť poradiť aj s väčším množstvom šumu prípadne s ryhami, ktoré prerušujú priebeh papilárnych línií.



Obrázok 4.1: Ukážka jednotlivých dielčích činností navrhovaného systému.

4.1 Segmentácia

Po načítaní odtlačku bude prvým krokom navrhovaného systému segmentácia. Úlohou segmentácie je oddelenie samotného odtlačku od pozadia, čím sa dosiahne nie len zníženie časovej zložitosti ďalších operácií aplikovaných na odtlačok, ale aj zlepšenie presnosti daných operácií.

Metóda segmentácie bude vychádzať z [46]. Keďže databáza odtlačkov dlaní bude pozostávať z odtlačkov dlaní vrátane prstov, bude segmentácia odtlačku dlane pozostávať z dvoch krokov. V prvom kroku bude oddelené pozadie od odtlačku dlane a v druhom kroku budú od odtlačku dlane oddelené články prstov.

4.1.1 Oddelenie pozadia

O oddelení blokov patriacich do pozadia od tých, ktoré patria do odtlačku budú rozhodovať dve kritériá: pomer bielych pixelov a rozptyl pixelov.

V bloku, ktorý patrí do pozadia dominujú biele pixely, zatiaľ čo blok patriaci do odtlačku obsahuje vďaka papilárnym líniam približne rovnaký pomer bielych a čiernych pixelov. Pomer bielych pixelov v bloku o veľkosti $w \times w$ sa bude počítat pomocou vzťahu: [46]

$$\text{WPP} = \frac{1}{w \times w} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^w \text{sign}(I(x, y)), \quad (4.1)$$

kde $I(x, y)$ je intenzita šedej farby v bode (x, y) , $\text{sign}(x) = 0$, keď je pixel x čierny a $\text{sign}(x) = 1$ v prípade, že pixel x je biely. To, či je pixel čierny alebo biely bude rozhodované podľa Otsuovho prahovacieho algoritmu ktorý bol popísaný v kapitole 3.4.

Keďže pozadie môže obsahovať šum spôsobený nečistotami na skeneri pri získavaní odtlačku, bude o oddelení pozadia od odtlačku rozhodovať aj rozptyl pixelov. Rozptyl v blokoch obsahujúcich papilárne línie je spravidla väčší ako v blokoch patriacich do pozadia. Rozptyl pixelov v bloku o veľkosti $w \times w$ sa bude počítat pomocou vzťahov: [46]

$$\text{VAR} = \frac{1}{w \times w} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^w |I(x, y) - M| \quad (4.2)$$

$$M = \frac{1}{w \times w} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^w I(x, y) \quad (4.3)$$

Následne priradením vhodných váh w_1 a w_2 obom kritériám môžeme dopočítat hodnotu v v každom bloku pomocou vzťahu: [46]

$$v = w_1 \text{WPP} + w_2 \text{VAR}, \quad (4.4)$$

na základe ktorej sa pri vhodne zvolenom prahu rozhodne, či blok patrí do pozadia alebo do odtlačku dlane.

4.1.2 Oddelenie článkov prstov

Odtlačok získaný z predchádzajúceho kroku môže obsahovať aj články prstov, čo je v našom prípade nežiadúce a bude potrebné ich z odtlačku dlane odstrániť. Bloky obsahujúce články prstov môžu byť od blokov patriacich do odtlačku dlane oddelené alebo s nimi môžu byť spojené. Na každý z týchto prípadov bude aplikovaný rozdielny spôsob detekcie blokov obsahujúcich články prstov a ich následného odstránenia.

V prvom kroku budú detegované bloky obsahujúce články prstov, ktoré nie sú spojené s odtlačkom dlane. Spôsob ich detekcie bude inšpirovaný algoritmom narastajúceho regiónu. Jeho činnosť je možné rozdeliť do dvoch krokov:

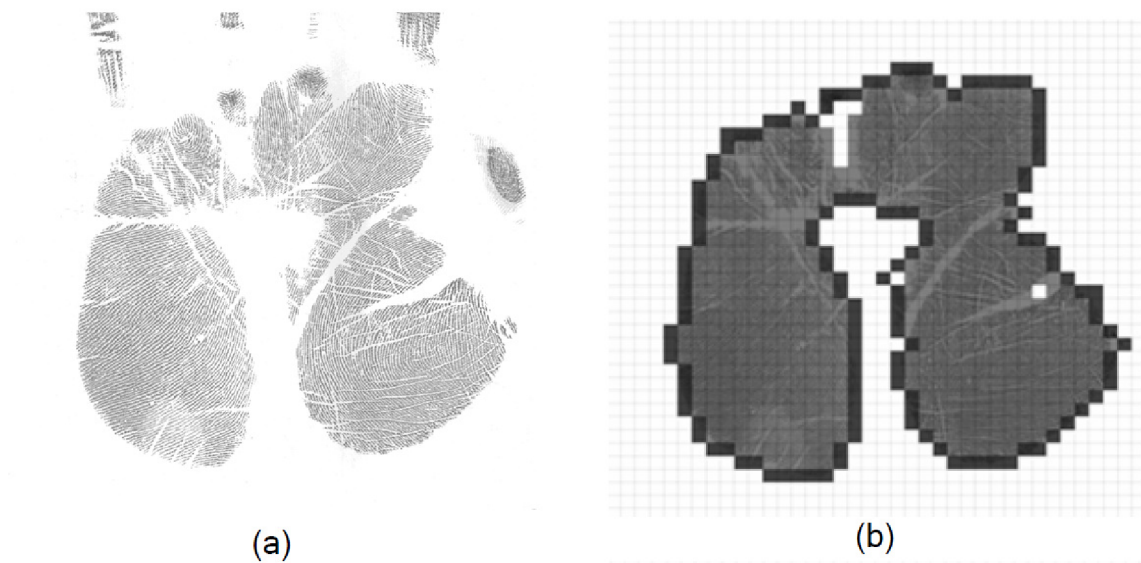
1. Nájde sa prvý neoznačený blok nachádzajúci sa na odtlačku najviac vľavo hore a označí sa novým indexom.
2. Označený blok označí svoje neoznačené susedné bloky (každý blok môže vidieť osem susedných blokov) rovnakým indexom.

Krok 2 je opakovaný až pokiaľ nie je možné označiť žiadny nový blok. V prípade, že ešte existujú neoznačené bloky, prejde sa na krok 1. Takým spôsobom môže vzniknúť viacero regiónov, pričom najväčší z nich bude označený ako odtlačok dlane a zvyšné regióny budú odstránené.

Posledným krokom segmentácie bude detekcia blokov obsahujúcich články prstov, ktoré sú spojené s odtlačkom dlane. Takéto bloky tvoria konvexnú alebo vypuklú časť odtlačku a úlohou teda bude tieto časti detegovať a následne odstrániť. Na základe okrajových blokov bude vytvorený obrys odtlačku. Medzi jednotlivými blokmi tvoriacimi obrys sa budú počítať dva typy vzdialeností:

- **Fyzická vzdialenosť** – najmenší počet blokov medzi blokmi B_1 a B_2 .
- **Obrysová vzdialenosť** – najmenší počet blokov tvoriaci obrys medzi blokmi B_1 a B_2 .

V klasickom prípade by rozdiel medzi fyzickou a obrysovou vzdialenosťou mal byť veľmi malý. V prípade vypuklých častí medzi by mal byť rozdiel medzi fyzickou a obrysovou vzdialenosťou výrazne väčší medzi začiatkom a koncom vypuklej časti. Pri zvolení vhodného prahu bude možné tieto vypuklé časti detegovať. Po ich odstránení tak dostaneme požadovaný odtlačok dlane, s ktorým sa bude pracovať v ďalších častiach systému. Príklad segmentovaného odtlačku je zobrazený na obrázku 4.2.



Obrázok 4.2: Ukážka segmentácie odtlačku dlane. Prevzaté z [40].

4.2 Orientácia papilárných líní

Správne určenie orientácie papilárných líní je veľmi dôležité, keďže sa z neho budú odvíjať ďalšie postupy, ako napríklad detekcia trirádií a sledovanie hlavných líní. Odtlačok dlane obsahuje viacero rýh, ktoré narúšajú priebeh papilárných líní, preto je vhodné zvoliť metódu, ktorá nebude skresľovať výslednú orientáciu, ale bude voči danému problému odolná. Metóda založená na gradientoch alebo Methreova metóda, ktoré boli popísané v kapitole 3.1

sú možno vhodné pri odtlačku prsta, kde je priebeh papilárnych línií poväčšine čistý, ale pri odtlačku dlane pravdepodobne nebudú podávať uspokojujúce výsledky. Metóda pracujúca vo frekvenčnej doméne by mala byť voči danému problému odolnejšia, ale ani tá nepodáva v niektorých regiónoch ideálne výsledky. Preto bude použitá metóda založená na Radonovej transformácii [7], ktorá by si mala poradiť aj v regiónoch s vysokou koncentráciou rýh.

Radonova transformácia [17] je robustná metóda určená pre detekciu línií. Metóda založená na konečnej Radonovej transformácii pracuje iba s pixelmi nachádzajúcimi sa na papilárnych líniách, teda s pixelmi, u ktorých je intenzita šedej menšia ako určený prah. Pre každý pixel (x_0, y_0) v aktuálnom bloku sa vytvorí kruhový región Δ , v ktorom budú všetky pixely následne normalizované. Modifikovanú konečnú Radonovu transformáciu v regióne Δ bude možné vykonať pomocou vzťahu: [7]

$$r(\theta; x_0, y_0) = \sum_{(x,y) \in \Delta} I(x, y)' \delta((x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta), \quad (4.5)$$

kde $I(x, y)'$ je normalizovaná hodnota šedej v bode (x, y) . Radonova transformácia sa nebude počítat pre všetky možné hodnoty uhla θ , ale len pre N hodnôt s určitým krokom. Hodnota θ , ktorá minimalizuje hodnotu $r(\theta; x_0, y_0)$ bude vybraná ako uhol určujúci orientáciu papilárnej línie v danom bode a bude označená ako θ_0 . Každému bodu bude následne priradená miera dôvery c_0 v orientáciu θ_0 pomocou vzťahu: [7]

$$c_0(x_0, y_0) = -r(\theta_0; x_0, y_0) \quad (4.6)$$

Miery dôvery pre jednotlivé orientácie budú následne agregované naprieč jednotlivými pixelmi v aktuálnom bloku pomocou vzťahu: [7]

$$c_b(\gamma) = \sum_{(x,y) \in \Gamma} f(c_0(x, y)) I(\theta_0(x, y) = \gamma), \quad (4.7)$$

kde $f(c_0(x, y))$ je nelineárna funkcia v tvare: [7]

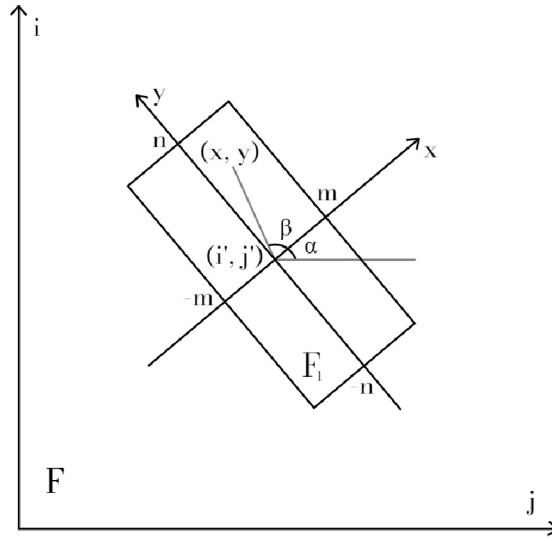
$$f(c) = \begin{cases} 0, & \text{keď } c \leq c_T \\ c, & \text{inak,} \end{cases} \quad (4.8)$$

kde c_T je vhodne určený prah. Táto nelineárna funkcia pomáha eliminovať vplyv bodov, ktoré sú nespoľahlivé. Orientácia s najväčšou mierou dôvery bude nakoniec vybraná ako orientácia papilárnych línií v danom bloku.

4.3 Detekcia flekčných rýh

Ako bolo popísané v kapitole 2.5.2, na dlani sa nachádzajú tri flekčné ryhy – radiálna longitudinálna ryha, proximálna transverzálna ryha a distálna transverzálna ryha. Jednotlivé flekčné ryhy budú detegované samostatne pomocou algoritmu smerovej projekcie z [45], ktorý je popísaný v ďalšej časti kapitoly.

Smerová projekcia je efektívna metóda detekcie línie pozdĺž určitej orientácie. Algoritmus pracuje s dvoma sústavami súradníc. Sústava súradníc ij reprezentuje obraz F a sústava súradníc xy reprezentuje jeho podobraz F_1 . Počiatok sústavy súradníc xy sa nachádza v bode (i', j') a orientácia osi x zodpovedá uhlu projekcie α . Vzťah oboch súradnicových systémov (zobrazený na obrázku 4.3) je možné vyjadriť ako: [45]



Obrázok 4.3: Grafické znázornenie vzťahu súradnicových systémov v algoritme smerovej projekcie. Prevzaté a upravené z [45].

$$i = i' + \cos(\alpha + \beta)\sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.9)$$

$$j = j' + \sin(\alpha + \beta)\sqrt{x^2 + y^2}, \quad (4.10)$$

kde $\beta = \tan^{-1}(y/x)$.

V podobrazie F_1 je potom smerovú projekciu možné vyjadriť vzťahom: [45]

$$p(y) = \sum_{i=-m}^m f(x, y), \quad (4.11)$$

kde m je šírka podobrazu a $f(x, y)$ je intenzita šedej v bode (x, y) . Aby sa zmenšil vplyv prípadných vrások, ktoré majú rovnakú orientáciu ako flekčná ryha, bude smerová projekcia vyhladená pomocou vzťahu: [45]

$$q(y) = \frac{1}{2w + 1} \sum_{k=-w}^w p(y + k), \quad (4.12)$$

kde parameter w určuje koľko susedných hodnôt sa bude brať do úvahy pri vyhladzovaní. Zo všetkých hodnôt $q(y)$ bude nájdené maximum a bod, v ktorom sa maximum nachádza bude transformovaný do sústavy súradníc pôvodného obrazu pomocou vzťahov: [45]

$$y_0 = \{k \mid q(k) = \max_y q(y)\} \quad (4.13)$$

$$i_0 = i' + y_0 \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.14)$$

$$j_0 = j' + y_0 \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.15)$$

Bod (i_0, j_0) potom reprezentuje bod, ktorý leží na flečknej ryhe. Pre detekciu celej flečknej ryhy sa využije algoritmus narastajúceho regiónu, kedy bude bod (i_0, j_0) označený ako počiatkový bod. Keď budú susedné body okolo počiatkového bodu mať rovnakú alebo podobnú intenzitu šedej ako počiatkový bod, tak budú tieto body pridané do regiónu a nastavené ako počiatkové body. Daný proces bude opakovaný až pokiaľ nebude možné pridať do regiónu žiadny nový bod. Takým spôsobom sa z bodu ležiaceho na flečknej ryhe vyplní celá flečková ryha.

Dôležitou úlohou bude vhodné určenie podobrazu, v ktorom sa smerová projekcia bude počítať a tiež aj uhol projekcie. Ich určenie bude vychádzať z nasledujúcich poznatkov:

- Každá flečková ryha vyúsťuje z boku dlane približne v pravom uhle.
- Vo väčšine prípadov vyúsťuje radiálna longitudinálna ryha a proximálna transverzálna ryha z dlane na rovnakom mieste.
- Body vyústenia flečných rýh z dlane sú bližšie k prstom ako k zápästiu.

Na základe daných poznatkov sa budú vybrané podobrazy nachádzať v hornej polovici dlane na oboch jej krajoch, pričom uhol projekcie sa bude pohybovať okolo hodnoty 0° .

4.4 Detekcia vrások

Pred samotným určením šírky a frekvencie papilárnych línií prebehne detekcia vrások a následné napojenie papilárnych línií cez detegované vrásky, čo by malo zvýšiť presnosť určenia šírky a frekvencie.

Pre detekciu vrások na dlani bude aplikovaná metóda detegujúca jazvy na otláčku prsta, ktorej popis bude vychádzať z [25]. Vzhľadom na to, že vrásky na odtlačku dlane a jazvy na odtlačku prsta majú podobnú štruktúru predpokladám, že táto metóda bude s miernou modifikáciou podávať uspokojivé výsledky.

Metóda je založená na predĺženom dvojdimenzionálnom Gaussovom derivačnom filtri druhého rádu. Filter bude obsahovať tri parametre – dĺžku σ_u , šírku σ_v a orientáciu θ , pričom každý parameter bude vybraný z určitej množiny hodnôt. Pre určenie množiny hodnôt šírky σ_v bude potrebné analyzovať šírku údolí v odtlačkoch z dátovej sady. V prípade, že priemerná šírka údolí bude napríklad 4 pixely, množina hodnôt šírky σ_v bude obsahovať hodnoty blízke hodnote 4, napríklad $\{4; 5\}$. Hodnoty dĺžky σ_u budú násobky širok σ_v , pričom násobky budú vyberané z množiny $\{2; 2,5; 3; 3,5\}$.

Pre implementáciu dvojdimenzionálneho Gaussoveho filtra bude použitá dvojdimenzionálna Gaussova funkcia, ktorú je možné vyjadriť v tvare: [25]

$$g(u, v) = \frac{2}{2\pi\sigma_u\sigma_v} \exp\left(-\left(\frac{u^2}{2\sigma_u^2} + \frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right)\right) \quad (4.16)$$

Druhá derivácia funkcie len s ohľadom na u bude mať tvar: [25]

$$g_{uu}(u, v) = \frac{2}{2\pi\sigma_u^5\sigma_v} (u^2 - \sigma_u^2) \exp\left(-\left(\frac{u^2}{2\sigma_u^2} + \frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right)\right) \quad (4.17)$$

Transformácia súradníc xy na súradnice uv prebehne pomocou vzťahov: [25]

$$u = x \cos \theta - y \sin \theta \quad (4.18)$$

$$v = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (4.19)$$

Keďže zvyšovaním hodnôt parametrov σ_u a σ_v klesá amplitúda filtra, bude potrebné jeho výsledok normalizovať pre spravodlivé porovnanie. Výstupná odozva orientovaného jadra tak bude normalizovaná vynásobením faktormi $\sigma_u^{1,5}$ a $\sigma_v^{0,5}$.

Po normalizácii sa pre každý pixel kombináciou všetkých možných dĺžok, širok a orientácií nájde najväčšia hodnota. Nech $f(x, y)$ je obraz odtlačku dlane a $g_{xx}(x, y, \theta, \sigma_x, \sigma_y)$ je predĺžený Gaussov derivačný filter druhého rádu. Aplikovaním filtra na obraz odtlačku získame nový obraz F : [25]

$$F(x, y, \theta, \sigma_x, \sigma_y) = g_{xx}(x, y, \theta, \sigma_x, \sigma_y) \cdot f(x, y) \quad (4.20)$$

Vzniknutý obraz bude následne binarizovaný, čoho výsledkom bude binárna maska obrazu. Pri vytváraní masky obrazu môže Gaussov derivačný filter občas chybné detegovať údolia papilárnych línií ako vrásky. Je to z dôvodu rozdielnej šírky údolí na odtlačku. To však bude možné eliminovať pomocou poľa orientácií. Posledným krokom bude vyplnenie vrások, keďže ich detekcia nemusí zachytiť vrásky po celej ich dĺžke alebo šírke. Vyplnenie bude podobne ako vyplnenie flekčných rýh prebiehať pomocou algoritmu narastajúceho regiónu. Proces začne v počiatkových bodoch, ktoré budú určené ako semienka. Počiatkovými bodmi budú body nachádzajúce sa v detegovanej vráske. K daným bodom budú následne pridávané ich susedné body, ktoré budú mať podobnú intenzitu šedej ako počiatkové body. Podobnosť intenzity šedej bude určovať vhodne zvolený prah, ktorý by mal byť blízky intenzite bielej farby.

4.4.1 Napojenie línií

Po detekcii flekčných rýh a vrások je možné začať proces napájania línií cez dané ryhy a vrásky. Proces vychádza z [25] a bude začínať v okrajových pixeloch každej ryhy. Každému okrajovému pixelu bude priradená nová intenzita šedej na základe susedného pixelu určeného podľa orientácie papilárnych línií v danom bloku. Po priradení novej hodnoty už daný pixel nebude považovaný za pixel nachádzajúci sa v ryhe. V ďalšej iterácii vzniknú nové okrajové pixely a tento proces prebieha až pokým nebude vyplnená celá ryha. Po niekoľkých iteráciách by tak v ideálnom prípade mal vzniknúť odtlačok s výrazne menším počtom vrások a rýh a následné určenie šírky a frekvencie na odtlačku dlane by malo byť presnejšie.

Ako problematické sa javí vyplňanie rýh, ktoré majú rovnakú alebo veľmi podobnú orientáciu ako papilárne línie v ich okolí. Preto budú vyplňané iba ryhy, pri ktorých je rozdiel ich orientácie a orientácie papilárnych línií v ich okolí väčší ako vhodne určená hranica.

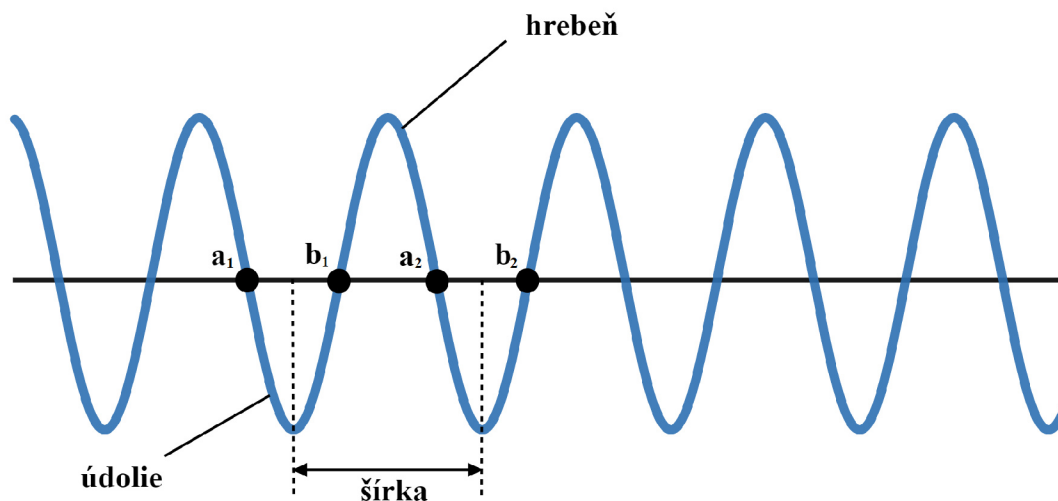
4.5 Frekvencia a šírka papilárnych línií

Frekvencia a šírka papilárnych línií sa naprieč odtlačkom dlane mierne líši. Preto je potrebné určiť hustotu vo viacerých regiónoch dlane, aby sme dostali čo najpresnejšiu globálnu informáciu o frekvencii a šírke papilárnych línií na odtlačku dlane.

Pre výpočet hustoty bude použitý algoritmus popísaný v kapitole 3.2. Keďže na dlani sa nachádzajú aj zle definované regióny obsahujúce šum, vrásky a flekčné ryhy, ktoré by mohli skresliť reálnu hodnotu frekvencie, nebude výpočet prebiehať na celom odtlačku dlane, ale

iba v dobre definovaných regiónoch. Dobre definovaný región bude určený na základe pomeru pixelov v bloku, ktoré sa nachádzajú vo flekčných ryhách alebo vráskach k celkovému počtu pixelov v bloku a tiež na základe miery dôvery v orientáciu papilárnych línií v danom bloku. Hustota nebude meraná ani v regiónoch obsahujúcich singulárne body.

Určenie šírky papilárnych línií je možné viacerými spôsobmi. Je možné napríklad merať počet pixelov medzi stredmi dvoch susediacich hrebeňov alebo počet pixelov medzi stredmi dvoch susediacich údolí. V tejto práci bude šírka papilárnej línie určená ako vzdialenosť medzi stredmi dvoch susediacich údolí. Výpočet je inšpirovaný prácou [42] a bude vychádzať zo signatúry odtlačku, ktorá má sínusový priebeh. V x-signatúre bude vhodne určená hranica, ktorá bude rozlišovať hrebene a údolia podľa toho, či sa časť x-signatúry nachádza nad alebo pod danou hranicou. V x-signatúre budú označené body a , v ktorých prechádzajú hodnoty vyššie ako hranica na hodnoty nižšie ako hranica a body b , v ktorých prechádzajú hodnoty nižšie ako hranica na hodnoty vyššie ako hranica. Stred medzi bodmi a a b bude označený ako stred údolia. Rovnakým spôsobom budú označené všetky stredy údolí v aktuálnom bloku. V prípade, že sa vzdialenosť medzi stredmi dvoch susedných údolí bude výrazne líšiť od ostatných, nebude táto vzdialenosť braná do úvahy. Z jednotlivých vzdialeností v bloku bude získaný ich priemer, ktorý bude reprezentovať šírku papilárnych línií v danom bloku. Grafické znázornenie určenia šírky papilárnych línií je možné vidieť na obrázku 4.4.



Obrázok 4.4: Grafické znázornenie výpočtu šírky papilárnych línií.

4.6 Detekcia singulárnych bodov

Detekcia singulárnych bodov bude vychádzať z metódy popísanej v [47]. Metóda vychádza z poľa orientácií určeného v kapitole 4.2 a bude pracovať s dvoma pojmami, ktoré je pre začiatok potrebné objasniť, a to hlavná orientácia a rozdiel orientácií. Hlavná orientácia bloku (i, j) je orientácia, ku ktorej zodpovedá najviac pixelov v danom bloku a zodpovedá orientácii vypočítanej v kapitole 4.2. Rozdiel orientácií OD medzi dvomi orientáciami θ_i a θ_j bude možné vypočítať pomocou vzťahu: [47]

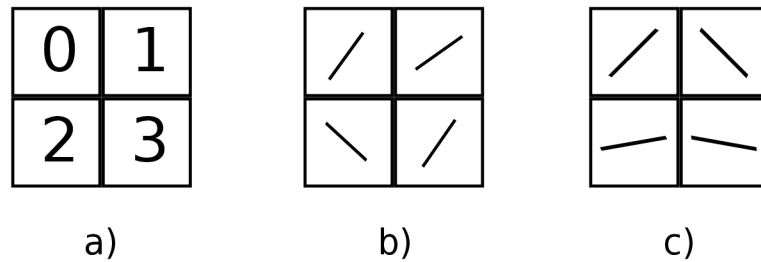
$$OD(\theta_i, \theta_j) = N - |\theta_i - \theta_j|, \quad (4.21)$$

kde N je počet možných orientácií.

Singulárne body budú hľadané na základe štyroch susedných blokov, ktoré budú označené podľa obrázku 4.5. Pre detekciu musia byť splnené nasledujúce podmienky: [48]

- V štyroch susedných blokoch musia mať aspoň tri z nich rozdielnu orientáciu.
- Medzi každými dvoma hlavnými orientáciami v susedných blokoch musí byť aspoň jeden rozdiel orientácií väčší ako $(N/2) - 1$.
- Medzi rozdielom orientácií $OD(\theta_0, \theta_1)$ a $OD(\theta_2, \theta_3)$, kde θ_i reprezentuje orientáciu bloku i podľa obrázku 4.5, je aspoň jeden rozdiel väčší ako $(N/2) - 2$.

Po detekcii singulárnych bodov je ešte potrebné rozlíšiť jadro a deltu (trirádus). Zo štyroch susedných blokov sa nájde blok, ktorého orientácia má najnižšie číslo a označí sa ako A . Jeho dva susedné bloky v smere hodinových ručičiek sa označia ako bloky B a C . Dva susedné bloky proti smeru hodinových ručičiek sa označia ako bloky D a E . Ak pre hlavné orientácie takto označených blokov platí, že $MO(A) < MO(B) < MO(C)$ a zároveň neplatí, že $MO(A) < MO(E) < MO(D)$ tak sa jedná o jadro, v opačnom prípade sa jedná o deltu (trirádus).



Obrázok 4.5: Grafické znázornenie detekcie singulárnych bodov: a) označenie poradia 4 susedných blokov, b) reprezentácia jadra, c) reprezentácia delty. Prevzaté a upravené z [47].

Z kapitoly 2.5.2 vieme, že na dlani sa nachádzajú digitálne a dlaňové trirádiá. Aby bola minimalizovaná šanca falošnej detekcie trirádií v časti dlane, kde by sa trirádiá nemali nachádzať, bude detekcia trirádií prebiehať iba v určitých regiónoch dlane. Vieme, že digitálne trirádiá sa nachádzajú pri koreňoch prstov, nad flekčnými ryhami dlane. Preto budú digitálne trirádiá hľadané vo vrchnej časti odtlačku dlane nad spojnicou bodov, v ktorých flekčné ryhy vyúsťujú von z dlane. O dlaňovom trirádiu vieme, že sa nachádza v spodnej časti dlane približne v strede odtlačku. Tým, že trirádiá sa budú hľadať iba v určitých regiónoch sa okrem eliminácie falošných detekcií docieli aj zrýchlenie detekcie.

4.6.1 Detekcia hlavných línií

Po detekcii trirádií je možné pristúpiť k detekcii a sledovaniu priebehu hlavných línií vrátane určenia ich zakončenia.

Hlavné línie je možné detegovať tak, že budeme sledovať priebeh radianty detegovaného digitálneho trirádiá smerujúcej do dlane až do miesta jej vyúsťenia na okraji dlane [34]. V prípade dlaňového trirádiá bude sledovaný priebeh radianty smerujúcej k prstom. Priebeh radianty bude sledovaný na základe poľa orientácií papilárnych línií. Daný priebeh

radianty by nemal náhle výrazne zmeniť svoj smer, preto keď k takej situácii dôjde, napríklad vplyvom nesprávne určenej orientácie papilárnych línií v určitom regióne, bude hlavná línia označená ako nevalidná.

Kapitola 5

Implementácia

Medzi základné ciele tejto práce patrí implementácia systému, ktorý bude schopný získavať informácie z odtlačku dlane. Táto kapitola sa teda bude zaoberať popisom implementácie jednotlivých častí aplikácie pomocou metód, ktoré boli popísané v predchádzajúcej kapitole. Výstupom implementácie bude desktopová aplikácia, ktorá bude schopná načítať vstupný obraz odtlačku dlane, oddeliť odtlačok dlane od pozadia, určiť lokálnu orientáciu, frekvenciu a šírku papilárnych línií, detegovať trirádiá, sledovať priebeh hlavných línií a určiť index hlavných línií. Používateľ si bude môcť okrem iného aj graficky zobrazíť výstupy po jednotlivých dielčích častiach systému.

Aplikácia bola implementovaná v jazyku Python vo verzii 3.9. Medzi základné knižnice, ktoré boli použité v zdrojových kódach patrí multiplatformná knižnica *OpenCV* používaná na prácu s obrazom a knižnica *tkinter* použitá pre implementáciu grafického užívateľského rozhrania.

5.1 Blokové spracovanie

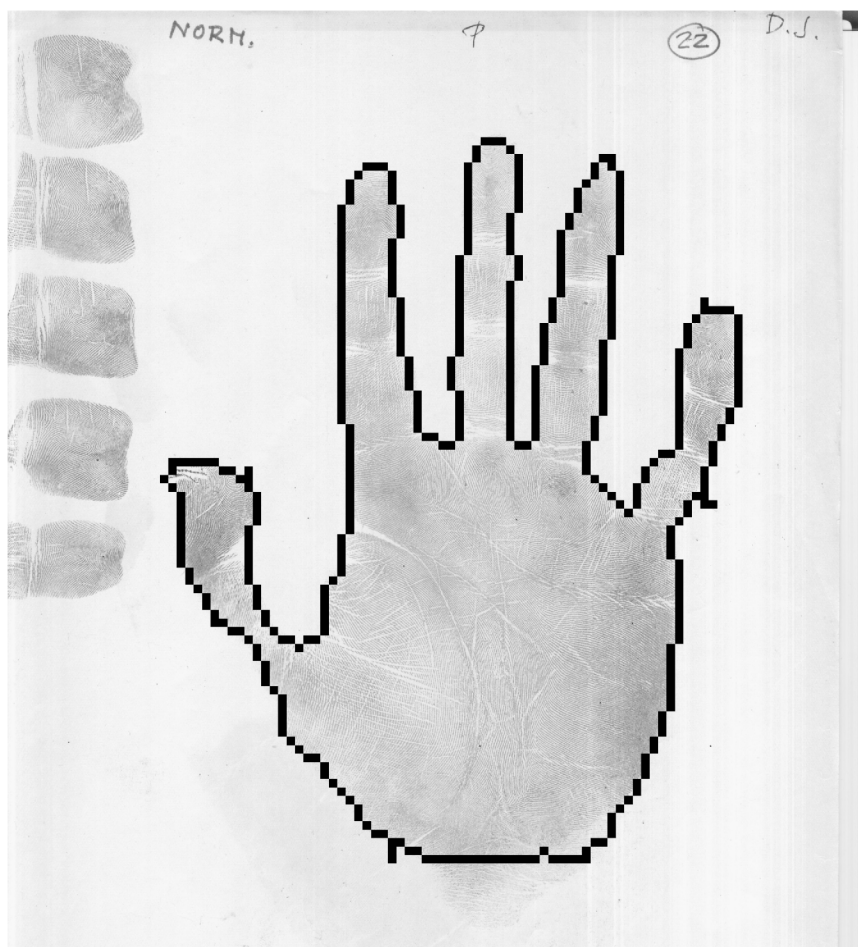
Väčšina použitých algoritmov, ktoré budú popísané v ďalšej časti práce pracuje s jednotlivými pixelmi po blokoch. Preto je základom aplikácie štruktúra `blocks`, ktorá uchováva informácie o jednotlivých blokoch, medzi ktoré patrí napríklad príslušnosť bloku do popredia alebo pozadia odtlačku, orientácia papilárnych línií v danom bloku, dôvera v určenú orientáciu alebo informácia o frekvencii a šírke papilárnych línií v danom bloku.

Pre správne fungovanie aplikácie je potrebné vhodne zvoliť veľkosť bloku, ktorá bude zohľadňovať možné nedostatky na odtlačku dlane, ako sú flečné ryhy a vrásky prípadne šum. Pri príliš malom bloku je možné, že by veľká časť bloku patrila do vrásky alebo flečnej ryhy a spracovanie takých blokov by bolo problematické. Príliš veľké bloky by naopak mohli spôsobiť stratu podrobnosti jednotlivých informácií. Z toho dôvodu bola v aplikácii po niekoľkých experimentoch zvolená veľkosť bloku 50×50 pixelov, čo sa javí ako ideálny kompromis.

5.2 Segmentácia odtlačku dlane

Po načítaní odtlačku dlane je prvým krokom aplikácie jeho segmentácia. Úlohou segmentácie je oddeliť popredie odtlačku od jeho pozadia a v prípade implementovanej aplikácie aj oddeliť prsty od samotného odtlačku dlane. Oddelenie blokov pozadia od tých blokov, ktoré patria do odtlačku dlane prebieha vo funkcii `segmentation()` podľa algoritmu, ktorý

bol popísaný v kapitole 4.1.1. Keďže sa v obraze odtlačku môžu nachádzať aj iné objekty, ako napríklad text alebo samostatné odtlačky prstov, ktoré môžu byť po predchádzajúcom kroku vyhodnotené ako súčasť odtlačku, je potrebné tieto objekty presunúť do pozadia. Pomocou postupu popísanom v prvej časti kapitoly 4.1.2 sú nájdené spojené regióny blokov, ktoré patria do popredia. Vzhľadom k tomu, že v tomto kroku ešte nie je žiadúce oddeliť články prstov od odtlačku dlane a pri niektorých odtlačkoch sa môže medzi prstami a odtlačkom dlane nachádzať určitá medzera, je implementovaná aj určitá vertikálna tolerancia, kedy je blok pridaný do spojeného regiónu aj keď priamo nesusedí s blokom patriacim do regiónu. Najväčší z nájdených regiónov reprezentuje samotný odtlačok dlane a zvyšné bloky, ktoré nie sú súčasťou najväčšieho regiónu sú nastavené ako pozadie. Týmto spôsobom sa vytvorí binárna maska odtlačku a pomocou nej sa vo funkcii `findPalmprintBorder()` vytvorí obrys odtlačku, ktorý je možné vidieť na obrázku 5.1.



Obrázok 5.1: Ukážka segmentácie odtlačku dlane vrátane prstov. Čiernou farbou je vyznačený obrys odtlačku.

5.3 Automatické očíslovanie okraja odtlačku

Aby bolo možné v ďalšej časti aplikácie určiť index hlavných línií, je potrebné očíslovať bloky patriace do obrysu odtlačku podľa pravidiel popísaných v kapitole 2.5.3. Pre jednoduchosť by bolo vhodné, aby sa pracovalo iba s jednou orientáciou dlane a v prípade druhej orientácie by bolo vhodné obraz odtlačku osovo otočiť. V prvom kroku je teda potrebné zistiť, či sa jedná o odtlačok pravej alebo ľavej dlane. Následne sa od odtlačku dlane oddelia prsty a obrys odtlačku sa rozdelí na jednotlivé segmenty, kde každému segmentu bude priradená príslušná hodnota. V poslednom kroku budú detegované body na flekčných ryhách, pomocou ktorých sa segmenty 5 a 13 rozdelia na menšie segmenty.

5.3.1 Určenie orientácie dlane

Pri určení, či sa jedná o odtlačok ľavej alebo pravej dlane je najprv nájdený konvexný obal dlane pomocou funkcie `convexHull()` z knižnice *OpenCV*. Funkcia `convexityDefects()` z knižnice *OpenCV* nájde chyby alebo poruchy konvexnosti, čo môžeme chápať ako akúkoľvek odchýlku obrysu odtlačku od jeho konvexného obalu. Výstupom tejto funkcie je pole, kde každý element obsahuje nasledujúce hodnoty:

- Začiatkový bod ležiaci na konvexnom obale,
- koncový bod ležiaci na konvexnom obale,
- najvzdialenejší bod od čiary spájajúcej začiatkový a koncový bod, ktorý leží na obryse odtlačku,
- vzdialenosť najvzdialenejšieho bodu od čiary spájajúcej začiatkový a koncový bod.

V prípade, že uhol medzi líniou spájajúcou najvzdialenejší bod so začiatkovým bodom a líniou spájajúcou najvzdialenejší bod s koncovým bodom je menší ako 90° , môžeme predpokladať, že začiatkový a koncový bod reprezentujú končeky dvoch susedných prstov a najvzdialenejší bod predstavuje bod v medziprstovom priestore ležiaci na obryse odtlačku. Takýmto spôsobom funkcia `findFingerPoints()` nájde končeky prstov vrátane bodov, ktoré ležia medzi prstami. Podľa výšky bodov jednotlivých končekov prstov je následne určené, či sa jedná o odtlačok pravej alebo ľavej dlane. V prípade ľavého odtlačku je obraz odtlačku osovo otočený a tým pádom sa so všetkými odtlačkami v ďalšej časti riešenia pracuje ako s odtlačkami pravej dlane.

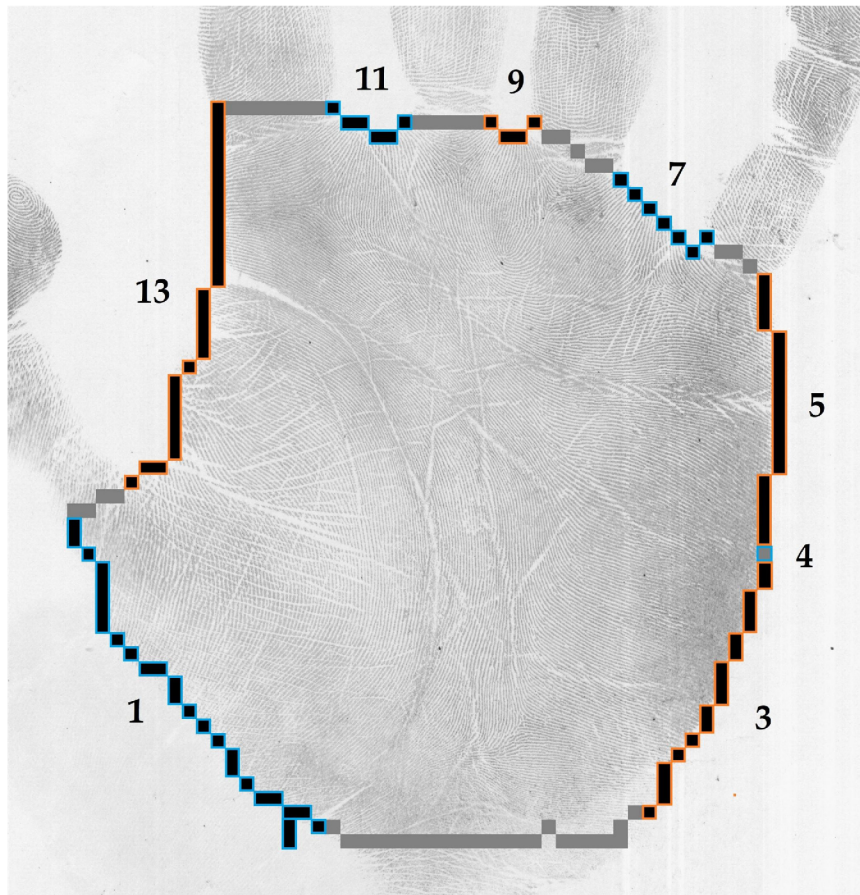
5.3.2 Očíslovanie obrysu a vystrihnutie prstov

Získané body ležiace medzi prstami sú v ďalšej časti využité pre očíslovanie obrysu odtlačku. Jednotlivé body sú najprv horizontálne zoradené a prípadný bod medzi palcom a ukazovákom je z dôvodu problematickej detekcie palca pri niektorých odtlačkoch z daných bodov odstránený. Následne je každý bod rozšírený na celý obrys medziprstového priestoru až pokiaľ nezačne obrys odtlačku horizontálne stúpať. Každému bloku v takom priestore je potom priradená príslušná hodnota podľa pravidiel číslovania obrysu odtlačku. Takým spôsobom sú získané segmenty 7, 9 a 11. Bod, ktorý sa nachádza v medziprstovom priestore medzi ukazovákom a prostredníkom najviac vľavo, je definovaný ako začiatkový bod obrysu ukazováka. Podľa princípu, ktorý bol popísaný v druhej časti kapitoly 4.1.2 je nájdený bod, ktorý je definovaný ako koncový bod obrysu ukazováka. Tieto body sú následne spojené a

upraví sa maska odtlačku spolu s jeho obrysom, čím sa dosiahne vystrihnutie ukazováka. Rovnakým princípom sú detegované a vystrihnuté aj zvyšné prsty.

Segment 13 je získaný sledovaním obrysu z koncového bodu ukazováka až po začiatok palca. V prípade, že palec nebol v predchádzajúcich krokoch detegovaný, je ako začiatočný bod palca určený bod ležiaci na obryse najviac vľavo. V opačnom prípade je začiatočným bodom palca bod, v ktorom začne obrys opäť horizontálne stúpať a podobne ako pri prstoch, je následne nájdený opačný koniec palca a palec je vystrihnutý. Segmentu obrysu od opačného konca palca až po spodok odtlačku je priradená hodnota 1.

Na druhej strane odtlačku je nájdený stred medzi koncovým bodom malíčka a spodkom dlane a príslušnému obrysovému bodu je priradená hodnota 4. Segmentu obrysu nad stredným bodom je priradená hodnota 5 a segment pod stredným bodom obrysu má hodnotu 3. Segmentovaný obraz odtlačku bez prstov s vyznačeným očíslovaním okraja odtlačku je možné vidieť na obrázku 5.2. Umiestnenie zvyšných segmentov, ktoré nadobúdajú párne hodnoty je zhodné s umiestnením trirádií, ktorých detekcia bude popísaná v ďalšej časti práce.

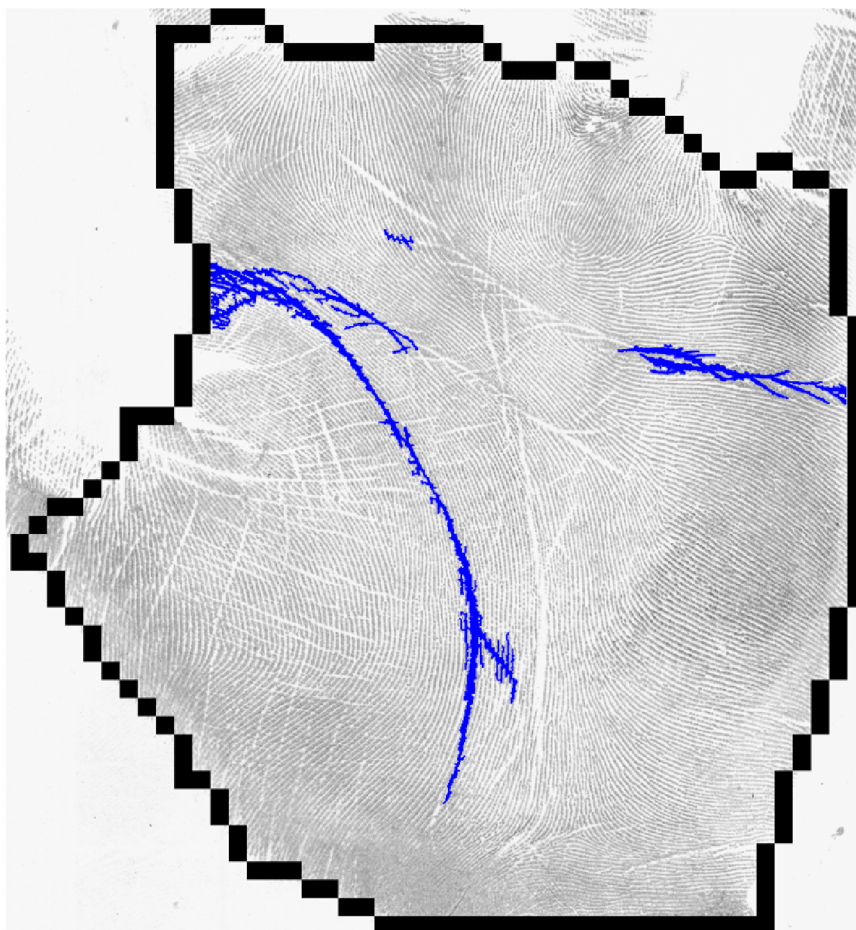


Obrázok 5.2: Ukážka segmentovaného odtlačku dlane bez prstov vrátane vyznačenia očíslovania okraja odtlačku.

5.3.3 Detekcia flekčných rýh

Po rozdelení obrysu odtlačku na segmenty je ešte potrebné rozdeliť segment 5 na segmenty 5' a 5'' a segment 13 na segmenty 13' a 13''. Presný bod rozdelenia sa určuje podľa miesta vyústenia flekčných rýh, preto je potrebné detegovať radiálnu longitudinálnu ryhu a distálnu transverzálnu ryhu. Ich detekcia prebieha vo funkcii `detectPrincipalLines()` podľa algoritmu smerovej projekcie, ktorý bol popísaný v kapitole 4.3.

Pri detekcii radiálnej longitudinálnej ryhy sa okno pre smerovú projekciu nachádza na ľavej strane odtlačku v jeho vrchnej polovici. Výška okna má hodnotu $1/4$ z výšky odtlačku, pričom jej stred sa nachádza v polovici vrchnej časti odtlačku. Šírka okna sa rovná šírke jedného bloku. Pomocou algoritmu smerovej projekcie je následne nájdený bod ležiaci na flekčnej ryhe. Aby bola detekcia čo najpresnejšia, je rovnakým spôsobom nájdených 10 rôznych bodov vedľa seba a v prípade, že aspoň polovica z nich leží približne v rovnakej línii, tak je bod obrysu odtlačku ležiaci v rovnakej línii určený ako deliaci bod segmentu 13. Segment, ktorý leží nad deliacim bodom potom bude mať hodnotu 13' a segment pod deliacim bodom hodnotu 13''. Rovnakým spôsobom prebieha aj detekcia distálnej transverzálnej ryhy a rozdelenie segmentu 5 na pravej strane odtlačku. Vyplnením rýh z nájdených bodov ležiacich v rovnakej línii následne dosiahneme detekciu flekčných rýh. Grafickú ukážku je možné vidieť na obrázku 5.3.



Obrázok 5.3: Grafické znázornenie detekcie flekčných rýh.

5.4 Určenie lokálnej orientácie papilárnych línií

Určenie lokálnej orientácie v jednotlivých blokoch patriacich do odtlačku dlane prebieha vo funkcii `orientationField()` na základe metódy založenej na Radonovej transformácii popísanej v kapitole 4.2. Orientácia môže v každom bloku nadobúdať jednu z 12 hodnôt v rozmedzí 15° – 180° s krokom 15° . Pre každý čierny pixel v aktuálnom bloku je vypočítaná jeho orientácia. Orientácia, ku ktorej sa v danom bloku hlási najviac pixelov je uložená ako orientácia bloku.

Určenie dôvery v orientáciu v danom bloku však prebieha iným spôsobom, ako to bolo popísané v návrhu. Miera dôvery môže nadobúdať hodnoty v rozmedzí 0–100 a určuje sa na základe počtu pixelov, ktoré sa hlásia k jednotlivým orientáciám. V prípade, že sa k najčastejšej orientácii hlási aspoň dvakrát viac pixelov ako k druhej najčastejšej orientácii a zároveň sa k najčastejšej orientácii hlási aspoň 100 pixelov, tak je orientácia považovaná za dôveryhodnú a dôvera v orientáciu nadobudne hodnotu 100. Rovnakú hodnotu nadobudne dôvera v orientáciu v prípade, že rozdiel medzi dvoma najčastejšími orientáciami je 15° a spolu sa k nim hlási aspoň 150 pixelov. V opačnom prípade je miera dôvery v orientáciu vypočítaná vzťahom:

$$c = \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} - 1 \right) \cdot 100, \quad (5.1)$$

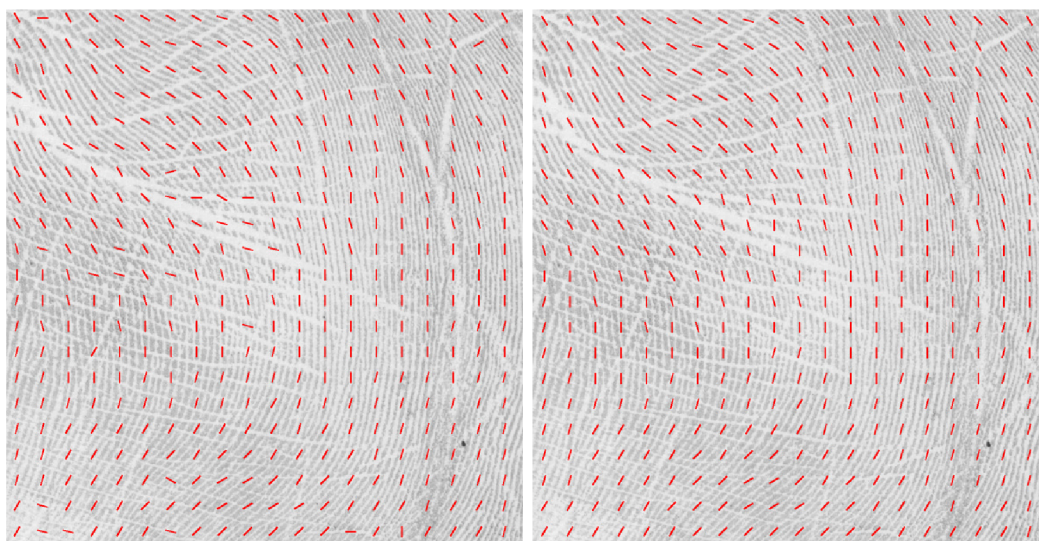
kde θ_1 reprezentuje najčastejšiu orientáciu a θ_2 reprezentuje druhú najčastejšiu orientáciu medzi jednotlivými pixelmi v aktuálnom bloku.

5.4.1 Vyhladenie orientácií

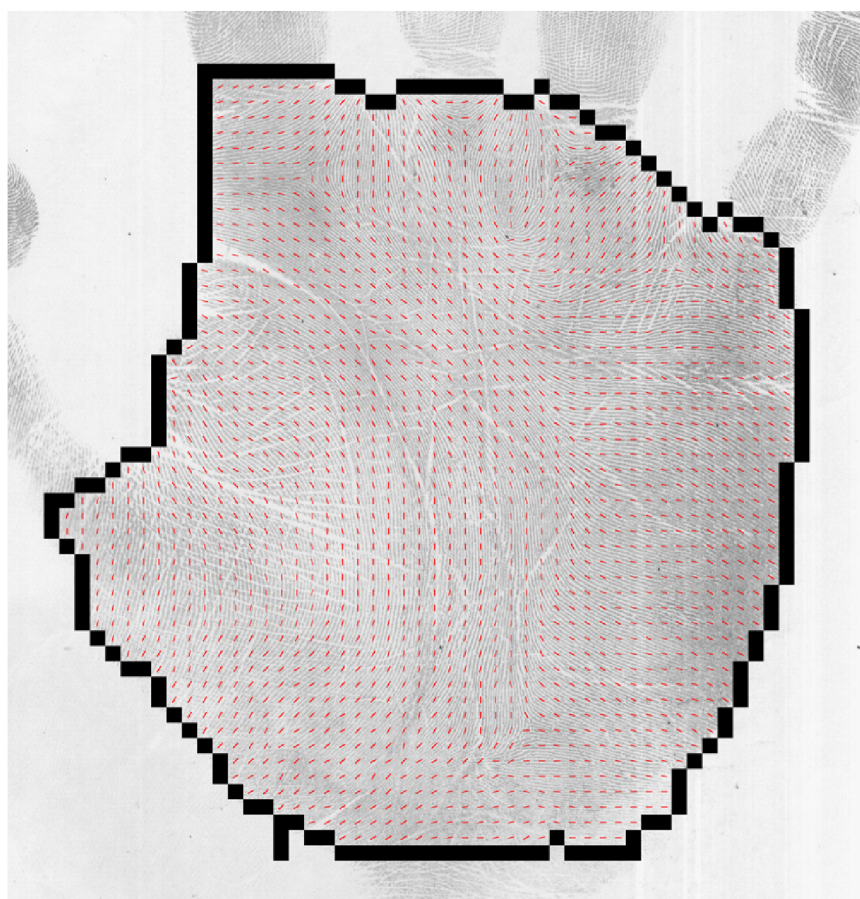
Okolo flečných rýh alebo v zašumených regiónoch môže byť určená orientácia nepresná, preto po určení orientácií vo všetkých blokoch patriacich do odtlačku dlane nasleduje vyhladenie orientácií. Vyhladenie je možné aj preto, že okrem regiónov, v ktorých sa vyskytujú singulárne body sa nepredpokladá výrazná zmena orientácie. Tieto regióny je však potrebné najprv detegovať, a preto krok vyhladenia orientácií nastane až po detekcii trirádií, ktorá bude popísaná v kapitole 5.5.

Vyhladenie prebieha v dvoch fázach. V prvej fáze je nájdený región zložený aspoň z 25 blokov, v ktorých má miera dôvery v orientáciu hodnotu 100. Daný región slúži ako semienko a podľa princípu založenom na algoritme narastajúceho regiónu sú k nemu pridávané ďalšie bloky. Orientácia blokov v regiónoch, kde sa nachádza trirádus alebo blokov s mierou dôvery v orientáciu rovnou hodnote 100 ostáva nemenná. Pri zvyšných blokoch sa skúmajú jeho okolitý susedia. V prípade, že sa orientácia v aktuálnom bloku líši od orientácie svojich ôsmich susedných blokov, ktorých miera dôvery v orientáciu má hodnotu 100 alebo už boli priradené do regiónu o viac ako 30° , je orientácia upravená na základe svojich susedných blokov. Táto fáza trvá dovtedy, kým do narastajúceho regiónu nebudú pridané všetky bloky tvoriace odtlačok dlane.

Druhá fáza má za úlohu odstrániť niektoré nedostatky, ktoré sa nepodarilo vyriešiť v prvej fáze vyhladenia. Postupne sú prechádzané všetky bloky s mierou dôvery v orientáciu menšou ako hodnota 100. Keď je orientácia aspoň piatich z celkovo ôsmich susedných blokov navzájom rozdielna o maximálne 15° a aktuálna orientácia sa od nich líši o viac ako 45° , v takom prípade je aktuálna orientácia upravená na základe svojich susedných blokov. Porovnanie orientácií pred a po vyhladení je možné vidieť na obrázku 5.4. Výstup po určení lokálnej orientácie papilárnych línií je zobrazený na obrázku 5.5.



Obrázok 5.4: Porovnanie orientácií pred ich vyhladením (vľavo) a po ich vyhladení (vpravo).



Obrázok 5.5: Grafické znázornenie orientácie papilárnych línií na odtlačku dlane.

5.5 Detekcia trirádií

Po implementácii metódy pre detekciu trirádií, ktorá bola popísaná v kapitole 4.6 sa ukázalo, že táto metóda nepodáva uspokojivé výsledky. Z toho dôvodu prebehla detekcia trirádií pomocou metódy Poincaré Index. Poincaré Index [41] skúma možnosť výskytu trirádia v bloku (i, j) na základe orientácie papilárnych línií v N okolitých blokoch. V implementovanom riešení sa Poincaré Index počíta na základe orientácie ôsmich susedných blokov, ktoré je možné vidieť na obrázku 5.6. Výpočet prebehne pomocou vzťahu: [41]

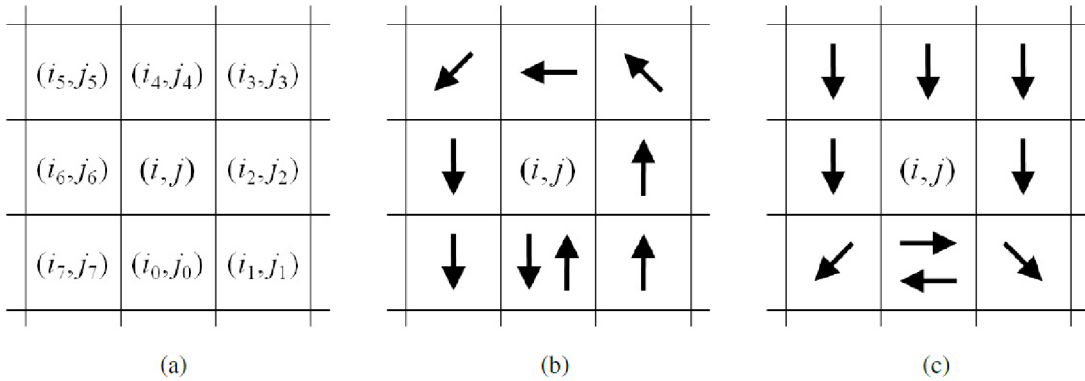
$$P(i, j) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} \Delta(k), \quad (5.2)$$

kde

$$\Delta(k) = \begin{cases} \delta(k), & \text{keď } |\delta(k)| < \pi/2 \\ \pi + \delta(k), & \text{keď } \delta(k) \leq -\pi/2 \\ \pi - \delta(k), & \text{inak,} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\delta(k) = \theta(x_{(k+1) \bmod N}, y_{(k+1) \bmod N}) - \theta(x_k, y_k). \quad (5.4)$$

V prípade, že výsledná hodnota $P(i, j)$ bude rovná hodnote $-1/2$, v bloku (i, j) sa bude nachádzať trirádus. Hodnota $1/2$ by znamenala výskyt jadra v danom bloku.



Obrázok 5.6: Grafické znázornenie detekcie singularných bodov: a) označenie ôsmich susedných blokov, na základe ktorých prebehne detekcia, b) orientácie susedných blokov reprezentujúce jadro, c) orientácie susedných blokov reprezentujúce deltu(trirádus). Prevzaté z [2].

Detekcia prebieha vo funkcii `findTriradius()`. Pre každý trirádus je najprv určené okno, v ktorom sa bude hľadať. Metódou Poincaré Index sa nájdu jednotlivé bloky, v ktorých sa trirádus môže vyskytovať. Kvôli možným chybám pri určovaní orientácie papilárnych línií v jednotlivých blokoch môžu byť niektoré regióny detegované chybné. Preto sú z nájdených blokov do premennej `possibleTriradiusBlocks` uložené iba bloky, ktoré spolu tvoria najväčší spojitý región. Daná premenná je následne vstupom do funkcie `lokalizeTriradius()`, ktorá určí presné umiestnenie trirádia. Táto funkcia najprv rozdelí každý vstupný blok na štyri menšie bloky, ktorých výška a šírka sú rovné polovici výšky a šírky pôvodného bloku.

V týchto blokoch je samostatne vypočítaná orientácia papilárnych línií. Pre každé štyri susedné bloky, ktoré spolu tvoria tvar štvorca je v smere hodinových ručičiek vypočítaná zmena orientácií a stred štvorca s najväčšou hodnotou zmeny orientácií je určený ako bod, v ktorom sa nachádza trirádus.

5.6 Sledovanie hlavných línií

Sledovanie hlavných línií vychádzajúcich z detegovaných trirádií vrátane určenia ich zakončenia prebieha vo funkcii `findMainLines()` na základe orientácie papilárnych línií v jednotlivých blokoch. Prvý bod hlavnej línie je pre každý trirádus určený samostatne. Napríklad v prípade trirádia *A* sa prvý bod hlavnej línie nachádza v pravom dolnom bloku od bloku, v ktorom bol detegovaný trirádus. Pre každý ďalší bod sa najprv zistí, v ktorom bloku sa nachádza a zistí sa orientácia v danom bloku. Súradnice ďalšieho bodu sú následne vypočítané podľa vzťahov:

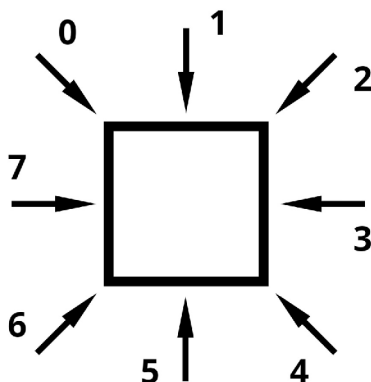
$$x_i = x_{i-1} - \left(\frac{blockHeight}{2} \cdot \sin \theta_k \right) \quad (5.5)$$

$$y_i = y_{i-1} + \left(\frac{blockWidth}{2} \cdot \cos \theta_k \right) \quad (5.6)$$

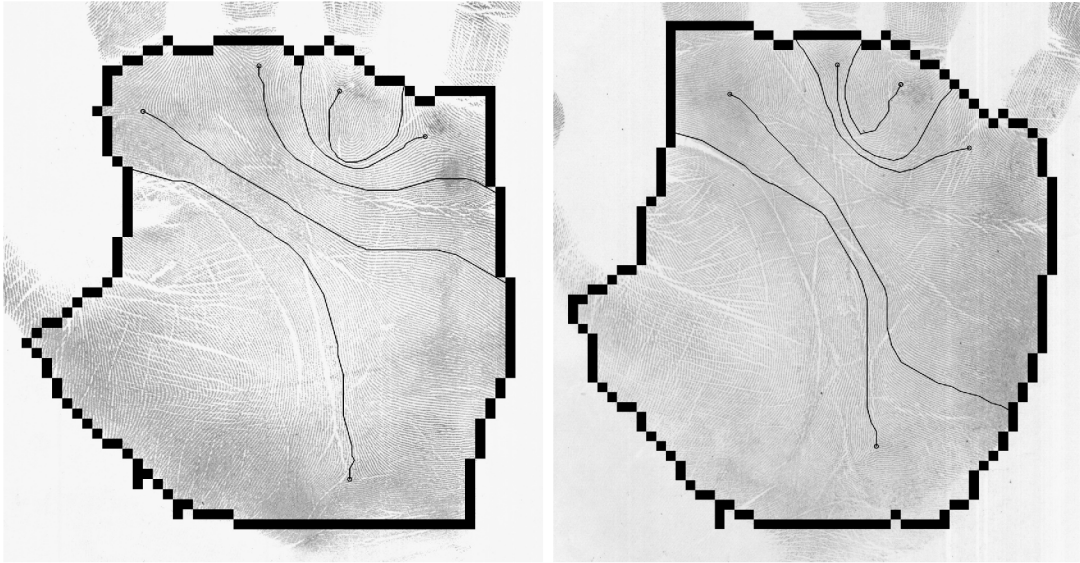
kde *blockHeight* a *blockWidth* reprezentujú výšku a šírku bloku a θ_k je orientácia v bloku *k*.

Orientácia nadobúda iba hodnoty v rozmedzí 0–180°, ale pri sledovaní priebehu hlavnej línie je potrebné rozlíšiť hodnoty menšie ako 180° od hodnôt väčších ako 180°. Z toho dôvodu je v premennej `comesFrom` ukladaný smer predchádzajúceho segmentu hlavnej línie, ktorý môže nadobúdať jednu z ôsmich hodnôt (viď obrázok 5.7). Daný smer je potom zohľadnený pri výpočte súradníc nasledujúceho bodu hlavnej línie. V prípade, že bude hodnota premennej `comesFrom` pri určení ďalšieho bodu v rozmedzí 0–3, budú pri výpočtoch súradníc ďalšieho bodu vo vzorcoch 5.5 a 5.6 vymenené znamienka, čo reprezentuje pripočítanie hodnoty 180° k aktuálnej orientácii.

Body hlavnej línie sú hľadané až do momentu, kedy sa ďalší potenciálny bod hlavnej línie nachádza mimo odtlačku dlane. Pri poslednom nájdenom bode sa vo funkcii



Obrázok 5.7: Zobrazenie ôsmich smerov, ktoré môžu byť uložené v premennej `comesFrom`.



Obrázok 5.8: Znáznornenie priebehu hlavných línií spolu s vyznačením detegovaných trirádií.

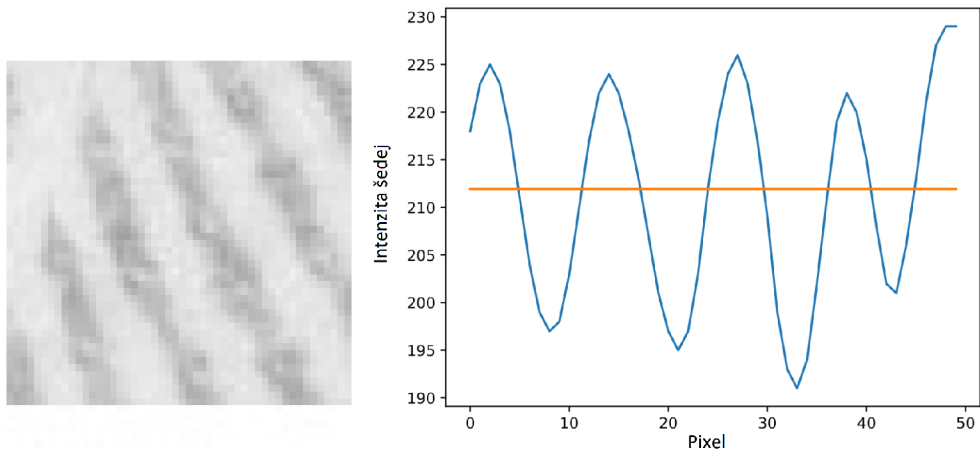
`findMainLineEnding()` zistí, či sa daný bod nachádza v bloku, ktorý je súčasťou niektorého z očíslovaných segmentov okraja odtlačku a v prípade nájdenia takého segmentu je hlavnej línií priradené zakončenie so zodpovedajúcou hodnotou. V opačnom prípade sa nájde očíslovaný segment, ktorý je najbližšie poslednému bodu hlavnej línií. Pri niektorých odtlačkoch sa môže stať, že celý blok spadá do flekčnej ryhy alebo je súčasťou neotlačenej regiónu odtlačku dlane a v takom prípade nie je v danom bloku určená žiadna orientácia. Keď hlavná línií narazí na taký blok, tak ďalej pokračuje v smere poslednej nájdennej orientácie. Pospájaním uložených susedných bodov hlavnej línií sa následne sformuje jej priebeh. Príklady detekcie hlavných línií vychádzajúcich z trirádií je možné vidieť na obrázku 5.8.

5.7 Určenie frekvencie a šírky papilárnych línií

Určenie frekvencie a šírky papilárnych línií v jednotlivých blokoch prebieha navzájom podobným spôsobom, a to na základe x-signatúry. Z dôvodu zaistenia čo najväčšej presnosti nájdených hodnôt prebieha určovanie frekvencie a šírky len v blokoch, v ktorých je miera dôvery v orientáciu rovná hodnote 100. Tým sa zabezpečí, že výpočet nebude prebiehať v blokoch, ktoré sú súčasťou flekčných rýh alebo regiónov s vysokou mierou šumu.

Pred samotným vytvorením x-signatúry sú hodnoty jednotlivých pixelov v bloku vyhladené pomocou Gaussovho vyhladzovania, čo spôsobí miernejší prechod medzi hranami papilárnych línií a výsledná x-signatúra tak bude podobnejšia sínusovej vlne. Po vytvorení x-signatúry je určená hranica, ktorá je rovná priemeru jednotlivých hodnôt x-signatúry. Body nad danou hranicou reprezentujú údolie a body pod vypočítanou hranicou reprezentujú hrebeň. Grafické znázornenie x-signatúry je možné vidieť na obrázku 5.9.

V x-signatúre sú následne nájdené body na x-ovej osi, v ktorých prechádza signatúra z hodnôt nižších ako hranica na hodnoty vyššie ako hranica a sú označené ako a_i . Rovnakým spôsobom s označením b_i sú nájdené body, v ktorých hodnoty vyššie ako hranica prechádzajú na hodnoty nižšie ako hranica. Ďalším krokom pri určovaní frekvencie je zistenie priemernej vlnovej dĺžky λ v x-signatúre. Pre sínusové vlny $\sin(x)$ začínajúce v bodoch



Obrázok 5.9: Grafické znázornenie x-signatúry bloku zobrazeného naľavo.

a_i a vlny $\sin(x + \pi)$ začínajúce v bodoch b_i sa jednotlivé vlnové dĺžky počítajú pomocou vzťahov:

$$\lambda_a = a_{i+1} - a_i \quad (5.7)$$

$$\lambda_b = b_{i+1} - b_i \quad (5.8)$$

Grafické znázornenie výpočtu vlnových dĺžok je zobrazené na obrázku 5.10. Z vypočítaných vlnových dĺžok je nájdený a ich priemer a v prípade, že sa niektorá z vlnových dĺžok výraznejšie líši od priemeru, je bloku nastavená nevalidná frekvencia s hodnotou -1 . V opačnom prípade sa frekvencia papilárnych línií v aktuálnom bloku určí vzťahom $f = 1/\lambda$. Pre prevod frekvencie na hustotu papilárnych línií na 1 cm je použitý vzťah:

$$d = f \frac{dpi}{2,54} \quad (5.9)$$

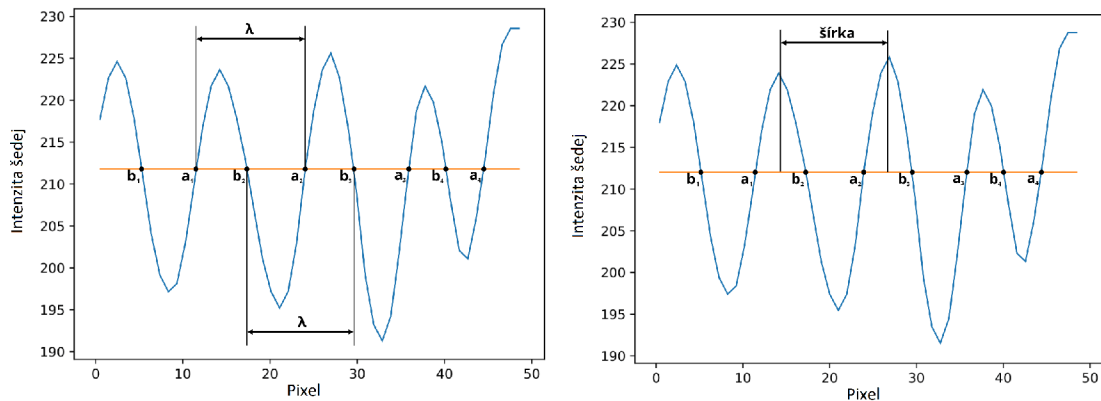
Šírka papilárnych línií sa v aplikácii určuje ako počet pixelov medzi stredmi dvoch susedných údolí. Za pomoci bodov a_i a b_i nájdených pri určovaní frekvencie sa šírka určuje podľa vzťahu:

$$w_i = \frac{a_{i+1} + b_{i+1}}{2} - \frac{a_i + b_i}{2} \quad (5.10)$$

Grafické znázornenie určenia šírky papilárnej línie je možné vidieť na obrázku 5.10. Zo všetkých nájdených širok w_i je následne vypočítaný priemer w_{px} , ktorého hodnota je prevedená na milimetre pomocou vzťahu 5.11 a je uložená ako šírka papilárnych línií v danom bloku.

$$w = \frac{w_{px} \cdot 25,4}{dpi} \quad (5.11)$$

Keďže riešenie bolo pri určovaní frekvencie a šírky papilárnych línií schopné eliminovať prípady, kedy sa blok nachádzal vo flekčnej ryhe alebo prípady nesprávneho určenia frekvencie a šírky z dôvodu výskytu vrásky, neboli detekcia vrások a napojenie línií cez flekčné ryhy a vrásky implementované.



Obrázok 5.10: Grafické výpočtu vlnovej dĺžky a šírky papilárnej línie.

5.8 Grafické užívateľské rozhranie

Grafické užívateľské rozhranie bolo implementované pomocou knižnice *tkinter*. Hlavné okno aplikácie je možné vidieť na obrázku 5.11. Po spustení aplikácie je používateľovi prostredníctvom tlačidla *Browse* ponúknutá možnosť vybrať vstupný obraz odtlačku dlane. Zobrazí sa adresárová štruktúra, v ktorej si používateľ vyberie konkrétny obrázok. Akceptované sú obrázky vo formátoch *png*, *jpg*, *jpeg*, *tif* a *bmp*. Po načítaní obrazu odtlačku sa automaticky spustí jeho spracovanie. Aplikácia umožňuje pomocou jednotlivých tlačidiel grafické znázornenie odtlačku po každom vykonanom kroku riešenia, čo zahŕňa zobrazenie segmentovaného odtlačku, grafické znázornenie orientácie papilárnych línií, znázornenie frekvencie a šírky papilárnych línií, zobrazenie detegovaných trirádií a zobrazenie priebehu hlavných línií. Pokým daný krok zatiaľ nebol vykonaný, tlačidlo je zablokované. Po vykonaní daného kroku sa tlačidlo sprístupní a používateľ si môže zobrazíť výstupný odtlačok po danom kroku riešenia. Pomocou tlačidla *Original* si môže používateľ zobrazíť načítaný odtlačok dlane. Tlačidlo *Segmented* zobrazí segmentovaný odtlačok dlane spolu s vyznačeným obrysom odtlačku. Segmentovaný odtlačok je rovnako ako odtlačky po ďalších krokoch riešenia zobrazený ako odtlačok pravej dlane. Tlačidlo *Orientations* graficky zobrazí orientácie papilárnych línií v jednotlivých blokoch. Pomocou tlačidla *Width/frequency* si môže používateľ zobrazíť, v ktorých blokoch prebehol výpočet frekvencie a šírky papilárnych línií a pomocou odtieňov šedej je zobrazená veľkosť šírky v jednotlivých blokoch. Priemerná šírka a frekvencia je tiež zobrazená v textovej podobe. Po zakliknutí tlačidiel *Triradius* a *Main Lines* je zobrazený odtlačok dlane s vyznačenými detegovanými trirádiami a odtlačok s vyznačeným priebehom hlavných línií. Výsledné zakončenia hlavných línií vrátane indexu hlavných línií sú automaticky zobrazené v textovej podobe. V prípade, že sa v aktuálnom adresári nachádza priechinok *anotatedData* a v ňom anotovaný súbor vo formáte XML, ktorý má rovnaký názov ako vstupný odtlačok, je používateľovi farebne zobrazená aj správnosť určenia zakončení hlavných línií a určenia indexu hlavných línií. Po spracovaní odtlačku sa sprístupní tlačidlo *Export*, pomocou ktorého si môže používateľ uložiť informácie o spracovanom odtlačku.



Obrázok 5.11: Hlavné okno implementovanej aplikácie.

5.9 Export dát

Export dát umožňuje uchovanie informácií o spracovanom odtlačku dlane. Informácie sú ukladané vo formáte XML (Extensible Markup Language), pričom názov súboru má tvar `<názov vstupného odtlačku>_out.xml`. Začiatok súboru obsahuje základné informácie o vstupnom obraze odtlačku dlane, medzi ktoré patrí názov vstupného odtlačku, jeho šírka a výška v pixeloch, rozlíšenie v jednotke dpi a tiež veľkosť bloku v pixeloch. Nasledujú informácie o jednotlivých blokoch, ktoré sú identifikovateľné svojimi súradnicami. V prípade, že blok patrí do odtlačku dlane, teda hodnota atribútu *background* je rovná hodnote 0, je uchovaná orientácia papilárnych línií v stupňoch, šírka papilárnych línií a frekvencia papilárnych línií v danom bloku. Po údajoch o jednotlivých blokoch je uchovaná informácia o priemernej šírke a frekvencii papilárnych línií na odtlačku dlane. V závere sú uložené súradnice detegovaných trirádií a zakončenia sledovaných hlavných línií. Štruktúru uložených dát je možné vidieť na nasledujúcom príklade:

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<palmprint src="NORM_016_M_P_RM_001.tif" width="5000" height="7002"
  xdpi="600" ydpi="600" blockWidth="50" blockHeight="50">
  <block row="0" col="0" background="1"/>
  <block row="0" col="1" background="1"/>
  <block row="0" col="2" background="1"/>
  . . .
  <block row="52" col="55" background="0">
    <orientation>120</orientation>
    <ridgeWidth>0.5586</ridgeWidth>
    <ridgeFrequency>18.2352</ridgeFrequency>
  </block>
  <block row="52" col="56" background="0">
    <orientation>105</orientation>
    <ridgeWidth>0.5572</ridgeWidth>
    <ridgeFrequency>18.4363</ridgeFrequency>
  </block>
  . . .
  <block row="139" col="99" background="1"/>
  <block row="139" col="100" background="1"/>
  <block row="139" col="101" background="1"/>
  <averageWidth>18.5552</averageWidth>
  <averageFrequency>0.5538</averageFrequency>
  <triradiusA x="2676" y="2326"/>
  <triradiusB x="2576" y="2826"/>
  <triradiusC x="2626" y="3126"/>
  <triradiusD x="2976" y="3551"/>
  <triradiusT x="4676" y="3126"/>
  <mainLineA>3</mainLineA>
  <mainLineB>5'</mainLineB>
  <mainLineC>7</mainLineC>
  <mainLineD>11</mainLineD>
  <mainLineT>13'</mainLineT>
</palmprint>

```

Kapitola 6

Vyhodnotenie

V tejto kapitole bude popísané testovanie a vyhodnotenie aplikácie, ktorej implementácia bola popísaná v kapitole 5. V úvode kapitoly bude predstavená dátová sada, na ktorej prebiehalo testovanie a vyhodnotenie. Následne bude popísané vyhodnotenie aplikácie na základe dodaných anotovaných dát, v rámci ktorého bude určená úspešnosť detekcie trirádií, úspešnosť sledovania hlavných línií a úspešnosť správneho určenia indexu hlavných línií. V závere kapitoly budú porovnané mužské a ženské odtlačky dlaní z pohľadu frekvencie a šírky papilárnych línií.

6.1 Dátová sada

Pre testovanie a vyhodnotenie aplikácie bola použitá dátová sada poskytnutá Ústavom antropológie Prírodevedeckej fakulty Masarykovej univerzity v Brne. Poskytnutá dátová sada obsahuje odtlačky dlaní 29 osôb, ktoré boli získané od 17 mužov a 12 žien. Sada obsahuje u každej osoby odtlačok ľavej aj pravej dlane vrátane prstov. Odtlačky dlaní sú vo formáte *tif* o veľkosti 5100×7002 pixelov s rozlíšením 600 dpi (počet bodov na palec). Okrem samotného odtlačku dlane sa v obraze odtlačku nachádzajú aj ručne písané slová a v niektorých prípadoch aj samostatné odtlačky prstov na okraji obrazu. Príklady odtlačkov dátovej sady je možné vidieť na obrázku 6.1. Kvalita jednotlivých odtlačkov sa v dátovej sade mierne líši. Nachádzajú sa v nej odtlačky vo vyššej kvalite, pri ktorých je možné hneď na prvý pohľad rozlíšiť hrebene od údolí a dlaň prechádza do prstov bez prerušenia, ale obsahuje aj odtlačky, u ktorých je v niektorých regiónoch vysoká miera šumu alebo vrások alebo u ktorých je väčšia medzera medzi prstami a dlaňou.

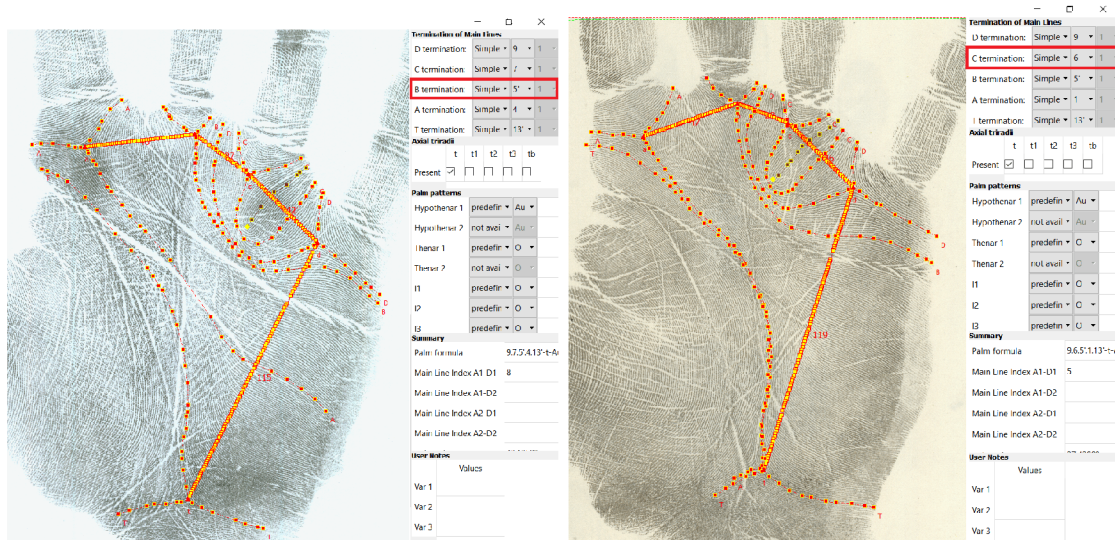
Okrem samotných odtlačkov dlaní obsahovala dátová sada ku každému odtlačku aj anotované dáta, ktoré okrem iného obsahovali informácie o súradniciach trirádií a zakončení hlavných línií. Anotované dáta je možné graficky zobrazit v aplikácii Dermatoglyphix. Pri analýze anotovaných dát som však objavil niektoré nedostatky a nepresnosti týkajúce sa najmä určenia zakončenia hlavnej línie, napriek tomu, že sledovanie hlavnej línie prebehlo v anotovaných dátach správne. Príklady takých situácií sú zobrazené na obrázku 6.2. Z toho dôvodu boli niektoré anotované dáta upravené, aby zodpovedali správnym výsledkom.

6.2 Vyhodnotenie úspešnosti detekcie trirádií

Jedným z dôležitých merateľných faktorov úspešnosti aplikácie je miera úspešnosti detekcie trirádií. Súčasťou anotovaných dát sú aj súradnice jednotlivých trirádií nachádzajúcich sa



Obrázok 6.1: Príklady odtlačkov dlaní z použitej dátovej sady.



Obrázok 6.2: Príklady nepresností v anotovaných dátach, ktoré sú zobrazené pomocou aplikácie Dermatoglyphix. V príklade naľavo je zakončeniu hlavnej línie *B* priradená hodnota 5', ale podľa literatúry sa jedná o zakončenie 5". Zakončenie hlavnej línie *C* na obrázku vpravo má v anotovaných dátach hodnotu 6, no podľa literatúry sa jedná o zakončenie 7.

na odtlačku dlane. Získané súradnice z implementovanej aplikácie sú následne porovnané so súradnicami z anotovaných dát a v prípade, že vzdialenosť medzi nimi je menšia ako 150 pixelov je detekcia trirádia považovaná za správnu. Každý trirádus je v tabuľke 6.1 vyhodnotený samostatne. Súčasťou vyhodnotenia je tiež porovnanie úspešnosti detekcie trirádií medzi mužskými a ženskými odtlačkami. Trirádiá boli vyhodnotené iba na odtlačkoch, pri ktorých prebehla segmentácia odtlačku dlane správne.

Pohlavie	Úspešnosť detekcie trirádií (v %)					
	a	b	c	d	t	Spolu
Muži	96,67	90	93,33	93,33	70	88,67
Ženy	95	85	85	85	45	79
Spolu	96	88	90	90	60	84,8

Tabuľka 6.1: Vyhodnotenie úspešnosti detekcie trirádií.

Z tabuľky je možné vidieť rozdiel v úspešnosti detekcie trirádií medzi mužskými a ženskými odtlačkami dlaní, čo je spôsobené najmä vyššou početnosťou menej kvalitných odtlačkov u žien. Ženské odtlačky v dátovej sade zvyčajne obsahujú viac šumu a rozlíšenie hrebeňov od údolí je aj voľným okom problematickejšie ako u mužských odtlačkov dlaní. Z tabuľky je tiež možné vidieť nižšiu úspešnosť detekcie trirádia *t* oproti ostatným trirádiám. Hlavnou príčinou je vyššia miera zašumenia v spodnej časti odtlačku oproti zvyšným regiónom dlane.

Neúspešné detekcie zahŕňali prípady, kedy trirádus nebol nájdený, prípady, kedy bol trirádus detegovaný, ale jeho pozícia bola od správnej pozície trirádia vo vzdialenosti presahujúcej určitú toleranciu a tiež aj prípady, kedy bol trirádus detegovaný na mieste, kde sa v skutočnosti nenachádza, napríklad v prípade chýbajúceho trirádia *c*. Po bližšej ana-

lyže neúspešných detekcií bolo zistené, že približne 40 % bolo spôsobených prípadmi, kedy trirádus nebol detegovaný a zvyšných 60 % reprezentovalo prípady nesprávnych detekcií.

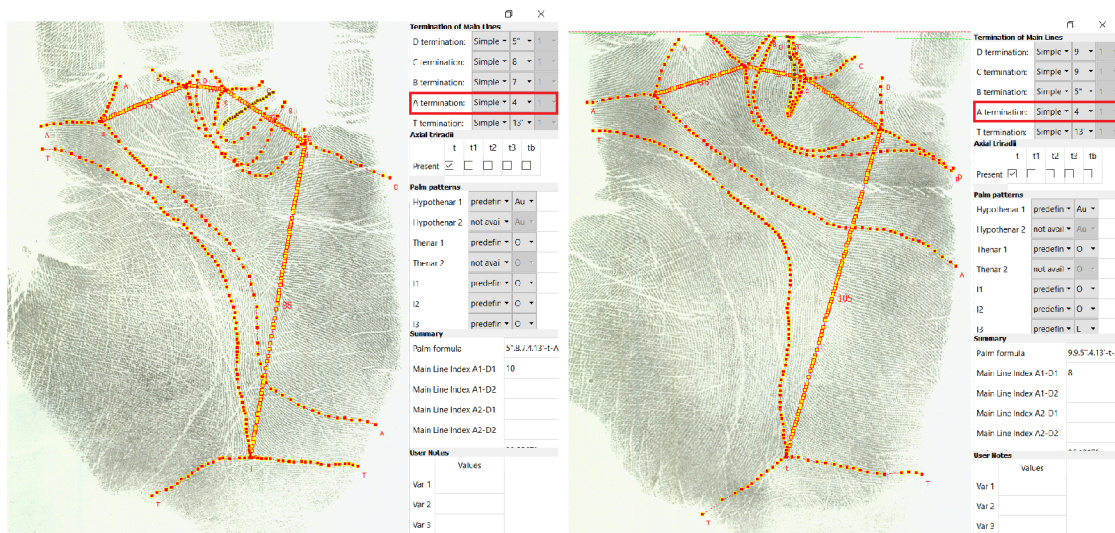
6.3 Vyhodnotenie úspešnosti sledovania hlavných línií

Ďalším dôležitým aspektom aplikácie je správne sledovanie hlavných línií. Pri vyhodnotení sú zakončenia jednotlivých hlavných línií vychádzajúcich zo správne detegovaných trirádií porovnané s opravenými zakončeniami v anotovaných dátach. Ako problematické sa javilo vyhodnotenie v prípade, že hlavná línia mala zakončenie s hodnotou 3 alebo 5', keďže som v anotovaných dátach spozoroval určitú nekonzistenciu pri určovaní daného zakončenia, ktorú je možné vidieť na obrázku 6.3. Z toho dôvodu boli pri porovnaní so zakončením 4 tolerované aj zakončenia 3 a 5'. Výsledné vyhodnotenie je zobrazené v tabuľke 6.2.

Pohlavie	Úspešnosť sledovania hlavných línií (v %)					
	A	B	C	D	T	Spolu
Muži	93,1	81,48	89,29	82,14	95,23	87,97
Ženy	89,47	64,71	76,47	88,24	88,88	81,01
Spolu	91,67	75	84,44	84,44	93,33	85,38

Tabuľka 6.2: Vyhodnotenie úspešnosti sledovania hlavných línií.

Podobne ako pri vyhodnotení detekcie trirádií je aj pri vyhodnotení úspešnosti sledovania hlavných línií vidieť rozdiely medzi mužskými a ženskými odtlačkami dlaní. Príčiny sú zhodné s príčinami spomenutými pri vyhodnotení detekcie trirádií. Základom pre správne sledovanie priebehu hlavnej línie je správne určenie orientácie papilárnych línií v jednotlivých blokoch a pri ženských odtlačkoch obsahujúcich viac šumu je správne určenie orien-



Obrázok 6.3: Grafické znázornenie nekonzistencie pri určovaní zakončenia 3 a 5' v aplikácii Dermatoglyphix. V oboch prípadoch bola zakončeniu hlavnej línie A priradená hodnota 4 napriek tomu, že na obrázku naľavo končí hlavná línia výrazne pod stredom ulnárneho okraja a na obrázku vpravo končí hlavná línia výrazne nad stredom ulnárneho okraja dlane.

tácie papilárnych línií problematickejšie. Pomerne výrazne nižšiu úspešnosť ako sledovanie ostatných línií malo sledovanie hlavnej línie *B*. Po analýze vyplynulo, že pri väčšine nesprávnych určení zakončenia hlavnej línie *B* bolo nájdené zakončenie 5' miesto zakončenia 5'', čo evokuje občasné problémy pri sledovaní hlavnej línie v okolí distálnej transverzálnej ryhy. Úspešnosť sledovania hlavných línií tiež znižujú špecifické prípady, kedy hlavná línia končí v inom trirádiu alebo prípady, kedy sa jedná o abortívnu hlavnú líniu, teda líniu, ktorá náhle slepo končí.

6.4 Vyhodnotenie úspešnosti určenia indexu hlavných línií

Index hlavných línií sa počíta ako súčet zakončení hlavných línií *A* a *D*. Z toho dôvodu je úspešnosť jeho určenia priamo úmerná úspešnosti detekcie trirádií *a* a *d* rovnako ako úspešnosti sledovania hlavných línií *A* a *D*. V tabuľke 6.3 je zobrazené vyhodnotenie úspešnosti určenia indexu hlavných línií, ktoré prebehlo na všetkých odtlačkoch, na ktorých prebehla segmentácia odtlačku dlane správne.

Pohlavie	Úspešnosť určenia MLI (%)
Muži	76,67
Ženy	80
Spolu	78

Tabuľka 6.3: Vyhodnotenie úspešnosti určenia indexu hlavných línií (MLI).

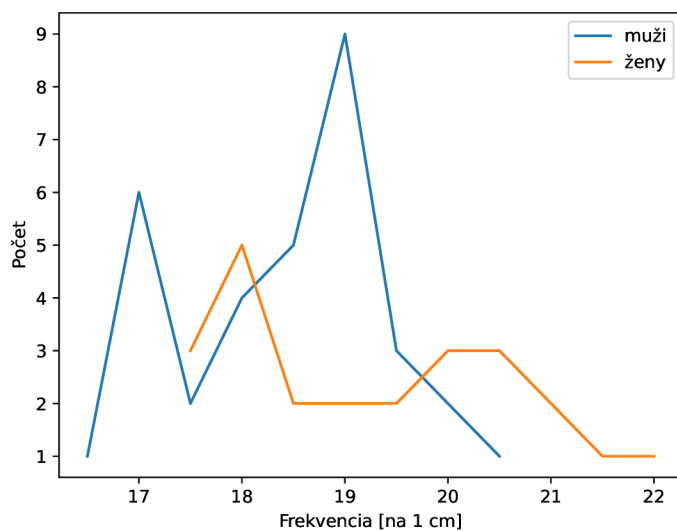
Z tabuľky paradoxne vyplýva, že napriek tomu, že ženské odtlačky dosahovali pri detekcii trirádií a sledovaní hlavných línií celkovo horšie výsledky ako mužské odtlačky, pri určení indexu hlavných línií dosahujú mierne lepšie výsledky. Je to najmä z dôvodu, že väčšia miera menej kvalitných ženských odtlačkov sa prejavila hlavne na nižšej úspešnosti pri sledovaní hlavných línií vychádzajúcich z trirádií *b*, *c* a *t*, zatiaľ čo detekcia trirádií *a* a *d* rovnako ako sledovanie hlavných línií *A* a *D* dosahovalo porovnateľné výsledky ako mužské odtlačky dlaní.

6.5 Porovnanie frekvencie a šírky papilárnych línií medzi pohlaviami

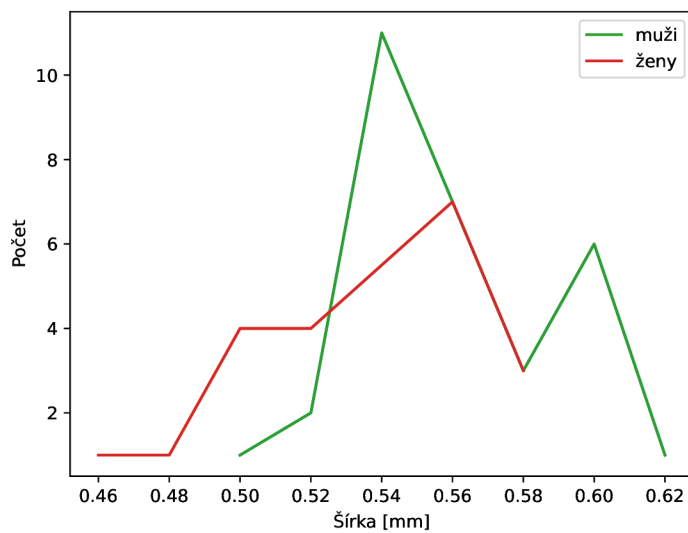
Porovnanie frekvencií papilárnych línií medzi mužskými a ženskými odtlačkami dlane je možné vidieť na obrázku 6.4. Jednotlivé frekvencie sú zaokrúhlené a zoradené do skupín s krokom 0,5. Frekvencia papilárnych línií v mužských odtlačkoch sa pohybovala v rozmedzí 16,6831–20,4033 s priemerom 18,3304. Priemer frekvencie línií ženských odtlačkov dlaní nadobudol hodnotu 19,2099, pričom ich frekvencie sa pohybovali v rozmedzí 17,6045–22,0086.

Šírky papilárnych línií sú zobrazené na obrázku 6.5. Jednotlivé hodnoty boli zaokrúhlené a zoradené do skupín s krokom 0,02. Priemer šírky papilárnych línií v mužských odtlačkoch dosiahol hodnotu 0,5583 mm zatiaľ čo priemerná šírka papilárnych línií ženských odtlačkov bola 0,5340 mm.

Z nájdených údajov je možné pozorovať určité rozdiely medzi mužskými a ženskými odtlačkami dlaní. Pre číselné vyjadrenie korelácie medzi pohlavím a šírkou alebo frekvenciou papilárnych línií je použitý Pearsonov korelačný koeficient, ktorý sa počíta vzťahom: [38]



Obrázok 6.4: Grafické porovnanie frekvencií papilárnych línií medzi mužskými a ženskými odtlačkami dlane.



Obrázok 6.5: Grafické porovnanie šírky papilárnych línií medzi mužskými a ženskými odtlačkami dlane.

Pearsonov korelačný koeficient	Pohlavie
Frekvencia papilárnych línií	0,3438
Šírka papilárnych línií	0,3742

Tabuľka 6.4: Korelácia medzi pohlavím a frekvenciou papilárnych línií a medzi pohlavím a šírkou papilárnych línií.

$$r = \frac{\sum(x - m_x)(y - m_y)}{\sqrt{\sum(x - m_x)^2(y - m_y)^2}} \quad (6.1)$$

Hodnoty m_x a m_y reprezentujú priemery množín hodnôt x a y . Pearsonov korelačný koeficient môže nadobúdať hodnoty v intervale $\langle -1; 1 \rangle$, pričom hodnota -1 reprezentuje zápornú koreláciu a hodnota 1 reprezentuje kladnú koreláciu. Hodnota blízka hodnote 0 predstavuje, že sa medzi množinami hodnôt nenachádza žiadna alebo iba minimálna korelácia.

Korelácia medzi pohlavím a frekvenciou papilárnych línií a medzi pohlavím a šírkou papilárnych línií je zobrazená v tabuľke 6.4. Z tabuľky vyplýva, že medzi frekvenciou papilárnych línií a pohlavím rovnako ako medzi šírkou papilárnych línií a pohlavím existuje určitá miera korelácie, nie však dostatočne vysoká na to, aby bolo možné iba na základe šírky alebo frekvencie papilárnych línií určiť, o aké pohlavie sa jedná. Je však potrebné podotknúť, že výsledky boli získané z pomerne malej dátovej vzorky, čo zamedzuje vyvodeniu všeobecných záverov zo získaných výsledkov.

Kapitola 7

Záver

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnúť a implementovať systém pre extrakciu podrobných informácií z odtlačkov dlane, ktorý by bol schopný detegovať flekčné ryhy, trirádiá a hlavné línie vrátane získania lokálnej orientácie, frekvencie a šírky papilárnych línií. Tieto informácie mala výsledná aplikácia graficky znázorniť, štatisticky spracovať a umožniť ich export.

V teoretickom úvode práce boli popísané základné vlastnosti odtlačkov prsta a dlane vrátane popisu jednotlivých metód používaných pri procese rozpoznávania podľa odtlačkov. Na základe získaných poznatkov bola navrhnutá a implementovaná aplikácia, ktorá dokáže oddeliť odtlačok dlane od pozadia vo vstupnom obraze a automaticky očíslovať segmenty obrysu odtlačku pre následné určenie zakončení hlavných línií, v rámci čoho bola implementovaná detekcia flekčných rýh. Aplikácia následne získa orientáciu, frekvenciu a šírku papilárnych línií. Na základe orientácie papilárnych línií sú detegované trirádiá a je sledovaný priebeh hlavných línií vrátane určenia ich zakončenia. Pre jednoduchšiu interakciu so systémom bolo implementované grafické užívateľské rozhranie, ktoré umožňuje grafické znázornenie získaných informácií a ich následný export.

Aplikácia bola testovaná a vyhodnotená na dátovej sade, ktorá bola poskytnutá Ústavom antropológie Prírodovedeckej fakulty Masarykovej univerzity v Brne. V rámci vyhodnotenia dosiahla úspešnosť detekcie trirádií v správne segmentovaných odtlačkoch dlane hodnotu 84,8 %, úspešnosť sledovania a správneho určenia zakončenia hlavných línií nadobudla hodnotu 85,38 % a určenie indexu hlavných línií malo úspešnosť 78 %. Následne boli porovnané mužské a ženské odtlačky z hľadiska frekvencie a šírky papilárnych línií, pričom boli zistené určité rozdiely medzi pohlavím vyjadrené formou korelácie. Výsledná korelácia však nie je dostatočne vysoká na to, aby bolo iba na základe šírky alebo frekvencie papilárnych línií jednoznačne určiť pohlavie osoby.

Výsledná aplikácia môže slúžiť ako pomocná aplikácia pre získavanie niektorých informácií z odtlačkov dlane, najmä pre získavanie formuly a indexu hlavných línií. Vyhodnotenie vykazuje určitý priestor pre vylepšenie implementovanej aplikácie. Jedná sa najmä o optimalizáciu a vylepšenie metódy určenia lokálnej orientácie papilárnych línií, ktorá by bola schopná presne určiť orientáciu aj v regiónoch dlane s vysokou mierou šumu alebo vrások. Presnejšie určenie orientácie papilárnych línií následne zvyšuje úspešnosť detekcie trirádií a správneho sledovania hlavných línií. V ďalšom rozšírení práce by bolo možné zamerať sa na získavanie informácií okrem samotného odtlačku dlane aj z jednotlivých odtlačkov prstov, ktoré sú súčasťou vstupného obrazu odtlačku.

Literatúra

- [1] ARCELLI, C. a DI BAJA, G. S. A Width-Independent Fast Thinning Algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1985, PAMI-7, č. 4, s. 463–474. DOI: 10.1109/TPAMI.1985.4767685.
- [2] AWAD, A. I. a BABA, K. Singular Point Detection for Efficient Fingerprint Classification. *International Journal of New Computer Architectures and their Applications (IJNCAA)*. Január 2012, zv. 1, s. 1–7. ISSN 2220-9085.
- [3] BHAT, G. M., MUKHDOOMI, M. A., SHAH, B. A. a ITTOO, M. S. Dermatoglyphics: in health and disease-a review. *International Journal of Research in Medical Sciences*. 2014, zv. 2, č. 1, s. 31–7. ISSN 2320-6012.
- [4] CAPPELLI, R., FERRARA, M. a MAIO, D. A Fast and Accurate Palmprint Recognition System Based on Minutiae. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*. Február 2012, zv. 42, s. 956–62. DOI: 10.1109/TSMCB.2012.2183635.
- [5] CHOI, H., BOAVENTURA, M., BOAVENTURA, I. A. G. a JAIN, A. K. Automatic segmentation of latent fingerprints. In: *2012 IEEE Fifth International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS)*. 2012, s. 303–310. DOI: 10.1109/BTAS.2012.6374593.
- [6] DAI, J., FENG, J. a ZHOU, J. Robust and Efficient Ridge-Based Palmprint Matching. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2012, zv. 34, č. 8, s. 1618–1632. DOI: 10.1109/TPAMI.2011.237.
- [7] DAI, J. a ZHOU, J. Multifeature-Based High-Resolution Palmprint Recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2011, zv. 33, č. 5, s. 945–957. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.164.
- [8] DESHPANDE, U. Fingerprint Based Age Estimation Obtained through 2D DWT, PCA and SVM. *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development*. 2018, zv. 06, s. 653–656. ISSN 2321-0613.
- [9] DRAHANSKÝ, M. *Hand-based Biometrics: Methods and Technology*. Institution of Engineering and Technology, 2018. IET book series on advances in biometrics. ISBN 9781523118670.
- [10] DRAHANSKY, M., DOLEZEL, M., URBANEK, J., BREZINOVA, E. a KIM, T.-h. Influence of Skin Diseases on Fingerprint Recognition. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. Hindawi Publishing Corporation. May 2012, zv. 2012, s. 626148. DOI: 10.1155/2012/626148. ISSN 2314-6133.

- [11] DRAHANSKÝ, M. *Biometrické systémy - Studijní opora* [online]. FIT VUT v Brně, 2006 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/BIO/private/BIO_Studijni_opora.pdf.
- [12] FEI, L., LU, G., JIA, W., TENG, S. a ZHANG, D. Feature Extraction Methods for Palmprint Recognition: A Survey and Evaluation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019, zv. 49, č. 2, s. 346–363. DOI: 10.1109/TSMC.2018.2795609.
- [13] FERRER, R., CARNEIRO, L., BESSA, J., MORAES, J. de, CAVALCANTI NETO, E. et al. Techniques of Binarization, Thinning and Feature Extraction Applied to a Fingerprint System. *International Journal of Computer Applications*. Október 2014, zv. 103, s. 1. ISSN 0975-8887.
- [14] HARA, M. Fingerprint Image Enhancement. In: LI, S. Z. a JAIN, A., ed. *Encyclopedia of Biometrics*. Boston, MA: Springer US, 2009, s. 474–482. DOI: 10.1007/978-0-387-73003-5_49. ISBN 978-0-387-73003-5.
- [15] HICKLIN, R. A. Anatomy of Friction Ridge Skin. In: LI, S. Z. a JAIN, A., ed. *Encyclopedia of Biometrics*. Boston, MA: Springer US, 2009, s. 23–28. DOI: 10.1007/978-0-387-73003-5_48. ISBN 978-0-387-73003-5.
- [16] HONG, L., WAN, Y. a JAIN, A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1998, zv. 20, č. 8, s. 777–789. DOI: 10.1109/34.709565.
- [17] HUANG, D.-S., JIA, W. a ZHANG, D. Palmprint verification based on principal lines. *Pattern Recognition*. Apríl 2008, zv. 41, s. 1316–1328. DOI: 10.1016/j.patcog.2007.08.016.
- [18] HUCKEMANN, S., HOTZ, T. a MUNK, A. Global Models for the Orientation Field of Fingerprints: An Approach Based on Quadratic Differentials. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2008, zv. 30, č. 9, s. 1507–1519. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.70826.
- [19] JAIN, A. K. a FENG, J. Latent Palmprint Matching. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2009, zv. 31, č. 6, s. 1032–1047. DOI: 10.1109/TPAMI.2008.242.
- [20] JAIN, A. K. a FENG, J. Latent Fingerprint Matching. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. Január 2011, zv. 33, s. 88–100. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.59.
- [21] JAIN, A. K., FLYNN, P. a ROSS, A. A. *Handbook of biometrics*. Springer Science & Business Media, 2007. 556 s. ISBN 978-0-387-71040-2.
- [22] JAIN, A. K., ROSS, A. A. a NANDAKUMAR, K. *Introduction to biometrics*. Springer Science & Business Media, 2011. 312 s. ISBN 978-0-387-77325-4.
- [23] KANICH, O. *Research in Fingerprint Damage Simulations*. Brno, CZ, 2019. 148 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/phd-thesis/832/>.

- [24] KARNA, D. K., AGARWAL, S. a NIKAM, S. Normalized Cross-Correlation Based Fingerprint Matching. In: *2008 Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation*. 2008, s. 229–232. DOI: 10.1109/CGIV.2008.11.
- [25] KHAN, M., KHAN, T., BAILEY, D. a KONG, Y. A spatial domain scar removal strategy for fingerprint image enhancement. *Pattern Recognition*. Máj 2016, zv. 60. DOI: 10.1016/j.patcog.2016.05.015.
- [26] KOLARSICK, P. A., KOLARSICK, M. A. a GOODWIN, C. Anatomy and physiology of the skin. *Journal of the Dermatology Nurses' Association*. LWW. 2011, zv. 3, č. 4. DOI: 10.1097/JDN.0b013e3182274a98.
- [27] KONG, W. K., ZHANG, D. a LI, W. Palmprint feature extraction using 2-D Gabor filters. *Pattern Recognition*. 2003, zv. 36, č. 10, s. 2339–2347. ISSN 0031-3203.
- [28] KUMAR, A., MUNDRA, T. S. a KUMAR, A. *Anatomy of Hand*. Springer US, 2009. 1452 s. ISBN 978-0-387-73003-5.
- [29] KÜCKEN, M. a NEWELL, A. C. Fingerprint formation. *Journal of Theoretical Biology*. 2005, zv. 235, č. 1, s. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2004.12.020>. ISSN 0022-5193.
- [30] MAIO, D. a MALTONI, D. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1997, zv. 19, č. 1, s. 27–40. DOI: 10.1109/34.566808.
- [31] MALTONI, D., MAIO, D., JAIN, A. K. a PRABHAKAR, S. *Handbook of fingerprint recognition*. 2. vyd. Springer Science & Business Media, 2009. 494 s. ISBN 978-1-84882-253-5.
- [32] MEHMANDOUST, S. a SHAHBAHRAMI, A. A Comparison between Different Fingerprint Matching Techniques. In: CHERIFI, H., ZAIN, J. M. a EL QAWASMEH, E., ed. *Digital Information and Communication Technology and Its Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, s. 242–253. ISBN 978-3-642-21984-9.
- [33] MEMON, S. A., SEPASIAN, M. a BALACHANDRAN, W. Review of finger print sensing technologies. *2008 IEEE International Multitopic Conference*. 2008, s. 226–231. DOI: 10.1109/INMIC.2008.4777740.
- [34] MUNI. *Dermatoglyfika* [online]. MUNI v Brně, 2017 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/Bi5120c/Dermatoglyfika.pdf>.
- [35] OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. IEEE. 1979, zv. 9, č. 1, s. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [36] PERALTA, D., GALAR, M., TRIGUERO, I., PATERNAIN, D., GARCÍA, S. et al. A survey on fingerprint minutiae-based local matching for verification and identification: Taxonomy and experimental evaluation. *Information Sciences*. 2015, zv. 315, s. 67–87. ISSN 0020-0255.
- [37] POSPÍŠIL, M. F. *Základy dermatoglyfiky*. Bratislava: Přírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave, 1974. 176 s.

- [38] PRASAD, M. V. N. K., KAVATI, I. a ADINARAYANA, B. Palmprint Recognition Using Fusion of 2D-Gabor and 2D Log-Gabor Features. In: *Recent Trends in Computer Networks and Distributed Systems Security*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, s. 202–210. ISBN 978-3-642-54525-2.
- [39] RAK, R., MATYÁŠ, V., ŘÍHA, Z. et al. *Biometrie a identita člověka*. Grada Publishing a.s., 2008. 631 s. ISBN 9788024723655.
- [40] TAN, Z., YANG, J., SHANG, Z., SHI, G. a CHANG, S. Minutiae-Based Offline Palmprint Identification System. In: *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*. 2009, sv. 4, s. 466–471. DOI: 10.1109/GCIS.2009.431.
- [41] TANG, T., WU, X. a XIANG, M. An Improved Fingerprint Singular Point Detection Algorithm Based on Continuous Orientation Field. 2008, zv. 2, s. 454–457. DOI: 10.1109/ISCST.2008.122.
- [42] ČEŠKA, P. *Extrakce podrobných informací z otisku prstu*. Brno, CZ, 2021. 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/24033/>.
- [43] WIECLAW, L. Gradient based fingerprint orientation field estimation. *Journal of Medical Informatics and Technologies*. 2013, zv. 22. ISSN 1642-6037.
- [44] ZHANG, D., ZUO, W. a YUE, F. A Comparative Study of Palmprint Recognition Algorithms. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2012, zv. 44, č. 1. DOI: 10.1145/2071389.2071391. ISSN 0360-0300.
- [45] ZHANG, D. D. *Palmprint authentication*. 1. vyd. Springer Science & Business Media, 2004. 242 s. ISBN 1-4020-8096-4.
- [46] ZHENG, Y., LIU, Y., SHI, G., LI, J. a WANG, Q. Segmentation of Offline Palmprint. In: *2007 Third International IEEE Conference on Signal-Image Technologies and Internet-Based System*. 2007, s. 804–811. DOI: 10.1109/SITIS.2007.134.
- [47] ZHENG, Y., SHI, G., WANG, Q. a ZHANG, L. Location of Special Areas on Palmprint. In: *2008 Congress on Image and Signal Processing*. 2008, sv. 2, s. 786–791. DOI: 10.1109/CISP.2008.701.
- [48] ZHENG, Y., SHI, G., ZHANG, L., WANG, Q. a ZHAO, Y. Research on Offline Palmprint Image Enhancement. In: *2007 IEEE International Conference on Image Processing*. 2007, sv. 1, s. I – 541–I – 544. DOI: 10.1109/ICIP.2007.4379011.
- [49] ZHU, E., YIN, J., HU, C. a ZHANG, G. A systematic method for fingerprint ridge orientation estimation and image segmentation. *Pattern Recognition*. 2006, zv. 39, č. 8, s. 1452–1472. ISSN 0031-3203.
- [50] ZHU, N., WANG, G., YANG, G. a DAI, W. A Fast 2D Otsu Thresholding Algorithm Based on Improved Histogram. In: *2009 Chinese Conference on Pattern Recognition*. 2009, s. 1–5. DOI: 10.1109/CCPR.2009.5344078.