



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

MORPHING OTISKŮ PRSTŮ

MORPHING OF FINGERPRINTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DENIS DOVIČIC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce



Student: **Dovičic Denis**
Program: Informační technologie
Název: **Morphing otisků prstů**
Morphing of Fingerprints
Kategorie: Bezpečnost

Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se biometrického rozpoznávání podle otisků prstů a daktyloskopie. Seznamte se s technikou a metodami využívaných při metodě morphingu v biometrii.
2. Navrhněte algoritmus, který spojí dva otisky prstu dohromady. Soustřeďte se na výběr vhodných oblastí z obou zdrojových otisků (markanty, singularity) a na tvorbu co možná nejuvěřitelnější hrany mezi otisky.
3. Implementujte navržený algoritmus z předchozího bodu.
4. Otestujte algoritmus z předchozího bodu vygenerováním datasetu morphovaných otisků a jejich porovnáním se zdrojovými otisky ve vhodném softwaru na porovnání otisků prstů (např. Innovatrics nebo Neurotechnology).
5. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná rozšíření Vašeho řešení.

Literatura:

- Kanich, O.: *Fingerprint Damage Simulation*, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2014, p. 57. ISBN 978-3-659-63942-5.
- Ferrara, M., Cappelli, R., Maltoni, D.: *On the Feasibility of Creating Double-Identity Fingerprints*, IEEE TIFS, 2016, DOI 10.1109/TIFS.2016.2639345.
- Dražanský, M.: *Hand-Based Biometrics: Methods and technology*, IET 2018, pages 430, ISBN 978-1-78561-224-4.

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 2019
Datum odevzdání: 28. května 2020
Datum schválení: 31. října 2019

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá vytvorením realisticky vyzerajúceho odtlačku prsta s dvojitou identitou. Cieľom je návrh a následná implementácia algoritmu na vytvorenie takto zmorfovaného odtlačku. Morphovanie sa skladá z troch dôležitých krokov, extrakcia informácií z odtlačku, morfovanie informácií za účelom vygenerovania nového odtlačku a overenie morfovaného odtlačku voči obom pôvodným za účelom ohodnotenia dvojitej identity. Ako rozšírenie bol doimplementovaný algoritmus na rozmazanie okrajov morfovaného odtlačku, integrované Minutia Cylinder-Code SDK do aplikácie za účelom okamžitého získavania ohodnotení dvojitej identity a bola upravená samotná metóda získavania vhodných identít z pôvodných odtlačkov za účelom vylepšenia výsledkov. Implementované algoritmy boli testované na databáze odtlačkov prstov, kde sa preukázalo, že v prípade absencie poškodení sú spoľahlivo extrahované informácie z odtlačku, z 90 % prípadov morfovaný odtlačok nadobudol dve identity a zo 60 % mal aj realistický vzhľad.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the creation of a realistic looking fingerprint with a double identity. The goal is the design and subsequent implementation of an algorithm to create such a morphed fingerprint. The morphing consists of three important steps, extracting the information from the fingerprint, morphing the information to generate a new fingerprint, and verifying the morphed fingerprint against both originals to evaluate the double identity rating. As an extension, an algorithm for blurring the edges of a morphed fingerprint was implemented, the Minutia Cylinder-Code SDK was integrated into the application to immediately obtain double identity rating, and the method of obtaining suitable identities from the original fingerprints was modified to improve results. The implemented algorithms were tested on a fingerprint database, where it was shown that in the absence of damage, the information from the fingerprint is reliably extracted, from 90 % cases the morphed fingerprint acquired two identities and from 60 % it also had a realistic appearance.

Kľúčové slová

morfovanie odtlačkov prstov, dvojitá identita, markanty, šablóna markantov, generovanie odtlačkov prstov, rozpoznanie odtlačkov prstov

Keywords

morphing of fingerprint, double identity, minutiae, minutiae template, fingerprint generating, recognition of fingerprints

Citácia

DOVIČIC, Denis. *Morphing otisků prstů*. Brno, 2020. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich, Ph.D.

Morphing otisků prstů

Prehlásenie

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

.....
Denis Dovičic
28. mája 2020

Podakovanie

Chcel by som tu poďakovať svojmu vedúcemu Ing. Ondřejovi Kanichovi, Ph.D. za odbornú pomoc, usmerňujúce rady a čas, ktorý mi venoval pri vypracovávaní práce. Tiež by som chcel poďakovať svojej rodine za podporu a predovšetkým mame za gramatickú korektúru textovej časti práce.

Obsah

1	Úvod	7
2	Odtlačok prsta	8
2.1	Úvod do biometrie	8
2.2	Daktyloskopia	9
3	Spracovanie odtlačku	13
3.1	Lokálne orientácie papilárnych línií	13
3.2	Frekvencie papilárnych línií	14
3.3	Vylepšenie odtlačku prsta	16
3.4	Extrakcia markantov z papilárnych línií	17
4	Morfing odtlačkov prstov	22
4.1	Podobnosť odtlačkov prstov	23
4.2	Línia rezu	23
4.3	Generovanie morfovaného odtlačku prstu	26
5	Návrh aplikácie	27
5.1	Príprava odtlačku k spracovaniu	28
5.2	Extrakcia lokálnych orientácií z odtlačku	28
5.3	Extrakcia lokálnych frekvencií z odtlačku	29
5.4	Vylepšenie odtlačku	30
5.5	Extrakcia markantov z odtlačku	31
5.6	Zarovnanie odtlačkov prstov	32
5.7	Odhad optimálnej línie rezu zarovnaných odtlačkov	32
5.8	Vytvorenie a generovanie z šablóny morfovaného odtlačku	33
6	Implementácia	35
6.1	Extrakcia informácií z odtlačku prsta a vylepšenie kvality odtlačku	35
6.2	Morfovanie odtlačkov prstov	37
6.3	Overovanie morfovaného odtlačku voči každému z pôvodných	42
6.4	Demonštračná GUI aplikácia	43
7	Testovanie	46
7.1	1. fáza - testovanie extrakcie informácií z odtlačku	46
7.2	2. fáza - morfovanie odtlačkov	50
8	Záver	62

Literatúra	64
A Obsah priloženého DVD	67

Zoznam obrázkov

2.1	Ukážka štruktúry pokožky papilárnych línií. [1]	10
2.2	Línie a údolia medzi líniami. [2]	10
2.3	Úrovne detailov odtlačku. [3]	11
2.4	Singulárne body: (a) slučka, (b) delta. [3]	11
2.5	Príklad bežných 5 tried odtlačkov prstov: a) oblúk, b) stanový oblúk, c) ľavá slučka, d) pravá slučka e) závit. [4]	12
2.6	Ukážka niekoľkých markantov odtlačkov prsta. [5]	12
3.1	Obrázok orientačného poľa zodpovedajúceho odtlačku prsta vypočítaného pomocou okna s veľkosťou $\omega \times \omega$. Každý prvok označuje lokálnu orientáciu papilárnych línií odtlačku prsta. [6]	14
3.2	Orientované okno a x-signatúra. [6]	15
3.3	Grafická ukážka banky Gáborovho filtra.	16
3.4	3×3 okno pre spracovávanie jednotlivých bodov obrázku odtlačku prsta. [7]	17
3.5	(a) Algoritmus prvej subiterácie, (b) upravené podmienky prvej subiterácie, pre algoritmus druhej subiterácie. [8]	18
3.6	Typy markantov detekovateľných pomocou <i>crossing number</i> . [6]	18
3.7	Najbežnejšie typy nepravých markantov a výsledné štrukturálne zmeny po ich odstránení. [9]	19
3.8	Ukážka 3×3 masky.	20
4.1	Detail priesečníkových oblastí medzi dvoma zarovnanými lokálnymi orientáciami O^1 (a) a O_A^2 (b). Zvýraznené prvky orientačného poľa sú využité na výpočet S_0 . P a N predstavujú pozitívnu a negatívnu stranu s ohľadom na líniu rezu l_{max} . [10]	25
4.2	Detail lokálnych frekvencií papilárnych línií Υ^1 (a) a Υ^2 (b) odhadnutých z priesečníkových oblastí. Svetlé časti označujú vyššie frekvencie. Zvýraznené prvky sú využité k vypočítaniu S_v . P a N predstavujú pozitívnu a negatívnu stranu s ohľadom na líniu rezu l_{max} . [10]	25
4.3	Detail markantov extrahovaných T^1 (a) a T^2 (b) z priesečníkových oblastí. P a N predstavujú pozitívnu a negatívnu stranu s ohľadom na líniu rezu l_{max} . Tmavé a šedé markanty sú markanty, ktoré sú využité v rovnici 22 na výpočet $\zeta_m(T^1, T^2)$ a $\zeta_m(T^2, T^1)$. [10]	25
4.4	Lokálne orientácie \tilde{O} (a), frekvencie $\tilde{\Upsilon}$ (b) a markanty \tilde{T} (c), odvodené z pôvodných odtlačkov prstov. Synteticky vygenerovaný morfovaný odtlačok (d). [10]	26
5.1	Ukážka prípravy obrázku (a) k spracovaniu. (a) pôvodný odtlačok, (b) rozmazaný odtlačok, (c) normalizovaný odtlačok, (d) segmentácia odtlačku. . .	28

5.2	Ukážka odhadnutia lokálnych orientácií z odtlačkov prstov.	29
5.3	Ukážka odhadnutia lokálnych frekvencií z odtlačkov prstov.	30
5.4	Ukážka aplikácie Gáborovho filtru a binarizácie na odtlačok prstu.	31
5.5	Ukážka získavania markantov z odtlačku.	31
5.6	Ukážka zarovnaných odtlačkov prstov.	32
5.7	Ukážka odhadnutia optimálnej línie rezu. Modré markanty patria zarovnávanému odtlačku a zelené odtlačku, voči ktorému sa zarovnáva. Markanty sú zobrazené len v morfovej oblasti.	33
5.8	Ukážka celého procesu morfovania dvoch odtlačkov.	34
6.1	Diagram tried knižnice Processing	36
6.2	Ukážka upravenia parametrov spracovávania (veľkosť bloku a orientovaného okna).	37
6.3	Diagram tried knižnice Morphing	38
6.4	(a) Zarovnanie s podmienkou prekrytia 70 %, (b) Zarovnanie s podmienkou prekrytia 20 %.	39
6.5	Diagram tried knižnice Matching	42
6.6	Diagram tried demonštračnej aplikácie.	44
6.7	GUI aplikácia určená k demonštrácii morfovania odtlačkov.	44
6.8	Okno s krokmi extrakcie informácií z odtlačku.	45
6.9	Okno s postupom morfovania dvoch odtlačkov.	45
7.1	(a) Ukážka správnej segmentácie odtlačku, (b) ukážka nesprávnej segmentácie odtlačku za prítomnosti rušivých faktorov.	47
7.2	(a) Ukážka získavania orientácií z kvalitného odtlačku, (b) Ukážka získavanie orientácií v poškodených oblastiach.	47
7.3	Ukážka rozpojenia línií pri vylepšovaní singulárnych bodov.	48
7.4	Ukážka rekonštrukcie línií nekvalitného odtlačku.	48
7.5	Vylepšeniu odtlačku za pomoci regionálnej masky. Zelené označenie znázorňuje pozitívny efekt vylepšovania nepomerne širokých línií, červené označenie znázorňuje kritické miesto, kde stále dochádza k nesprávnemu vylepšeniu.	49
7.6	Dokreslenie línií, kvôli veľkým medzerám v syntetickom odtlačku	49
7.7	(a) Ukážka získavania markantov z reálneho odtlačku, (b) Ukážka získavania markantov zo syntetického odtlačku.	50
7.8	Graf ohodnotenia sigmoidnej funkcie 26 s parametrami $\mu = 15$ a $\tau = \frac{3}{10}$, kde vodorovná os predstavuje počet markantov a horizontálna ohodnotenie ich početnosti.	51
7.9	Morfované syntetické odtlačky s rozdielnym šumom.	52
7.10	Morfované odtlačky získané z rôznych senzorov.	52
7.11	Odlíšne rozmiestnenie singulárnych bodov. Artefakty spôsobené zlým zarovnaním spôsobené prítomnosťou dvoch singulárnych bodov v odlišnej vzdialenosti.	53
7.12	Morfovanie odtlačkov, kde jeden neobsahuje singulárny bod.	53
7.13	Protichodné orientácie jadier, definujúce nemorfovateľné triedy pravá slučka s ľavou a opačne.	54
7.14	(a) Morfovaný odtlačok s netypickou triedou, (b) korekcia morfovania pomocou dynamickej línie.	55

7.15	(a) Morfovaný odtlačok so zdvojeným jadrom, (b) korekcia morfovania pomocou dynamickej línie.	55
7.16	Zle odhadnutá rezná línia. Zelené a modré označenie pri odtlačkoch (a) a (b) znázorňuje farbu markantov, ktoré dané odtlačky nadobúdajú v odhade reznej línie (c).	56
7.17	Ukážka rozmazania okrajov odtlačku.	56
7.18	Ukážka morfovania odtlačkov, ktoré spĺňajú podmienky pre kvalitné výsledky.	57
7.19	Graf znázorňujúci ohodnotenie morfovaného odtlačku voči pôvodným. Predstavuje početnosť ohodnotení (vertikálna os) voči odpovedajúcim odtlačkom v intervaloch po 0,5 nadobudnutého skóre verifikácie (horizontálna os). V prípade porovnania dvoch rovnakých odtlačkov nadobudnuté skóre sa pohybuje od 0,65 vyššie. Výsledky boli získané z pôvodnej metódy morfovania bez zásahov rozšírení.	58
7.20	Grafy pre vyhodnotenie priradení k identitám podľa FAR. Vertikálna os predstavuje početnosť v percentách a horizontálne vyhodnotenie na základe FAR metriky (viď kapitola 6.3).	59
7.21	Graf znázorňujúci ohodnotenie morfovaného odtlačku voči pôvodným. Predstavuje početnosť ohodnotení (vertikálna os) voči odpovedajúcim odtlačkom v intervaloch po 0,5 nadobudnutého skóre verifikácie (horizontálna os). V prípade porovnania dvoch rovnakých odtlačkov nadobudnuté skóre sa pohybuje od 0,65 vyššie. Výsledky boli získané pomocou rozšírenia dynamickej reznej línie z kapitoly 6.2.2.	60
7.22	Grafy pre vyhodnotenie priradení k identitám podľa FAR. Vertikálna os predstavuje početnosť v percentách a horizontálne vyhodnotenie na základe FAR metriky (viď kapitola 6.3).	61

Zoznam tabuliek

6.1	Ohodnotenie FAR metriky pre MCC SDK.	42
-----	--	----

Kapitola 1

Úvod

Využitie odtlačkov prstov pochádza už zo starovekého Grécka. Využívali ich hrnčiarsky majstri na označenie svojich diel, váz a keramiky. Odtlačok na diele znamenal v podstate podpis autora, majstra, ktorý keramiky vyhotovil. Odtlačok prsta je teda grafická reprezentácia papilárnych línií ľudského prsta, ktorá je už stáročia využívaná ako identifikácia osoby. [11]

Úplne prvá správa, ktorá hovorí o jedinečnosti odtlačkov prstov pochádza z roku 1668 od Marcella Malpighiho, ktorý vypracoval správu o linkách na vnútorných stranách rúk [12]. Jan Evangelista Purkyně, český biológ a prírodovedec, v roku 1823 podrobne popísal papilárne línie na prstoch a rozdelil ich do 9 skupín tak, že neskôr na základe jeho práce sa mohla veda daktyloskopie značne rozšíriť a prejavíť už naplno v kriminalistike a identifikácií. [12]

Používanie identifikácie odtlačkov prstov bolo istú dobu oveľa spoľahlivejšie ako iné druhy populárnych metód osobnej identifikácie založených na podpise, tvári a reči [11]. Aj keď sa overovanie odtlačkov prstov obvykle spája s trestnou činnosťou a policajnou prácou, v súčasnosti sa stalo populárnym využitie tejto formy verifikácie aj v bežných aplikáciách, ako sú kontrola prístupu do zariadenia, finančná bezpečnosť a iné. [13]

Široké rozvinutie biometrického rozpoznávania vyvolalo niekoľko obáv týkajúcich sa ich bezpečnosti. Jednou z hrozieb sú útoky prostredníctvom morfovacích techník. Ide o skombinovanie vlastností viacerých odtlačkov, či iných identifikačných prostriedkov, do jedného výsledného umelého obrázku. Tieto novo vzniknuté obrázky sú potom pozitívne priradené k viacerým subjektom, oproti ktorým prebieha overenie totožnosti (napríklad hľadanie zločincí môžu použiť autentický pas na vstup do krajiny s falošnou totožnosťou). [14]

Táto práca skúma uskutočniteľnosť vytvorenia odtlačkov prstov na dvojakú osobu navrhnutím dvoch možných techník a vyhodnotením, do akej miery sa môžu použiť na oklamanie najmodernejších systémov rozpoznávania odtlačkov prstov a že generované vzory odtlačkov prstov môžu byť dosť realistické, aby oklamali ľudské oko.

Kapitola 2 sa zaoberá všeobecným popisom odtlačku prsta, popisom odtlačku z biologického hľadiska, jeho využitiu v biometrických systémoch a jeho vlastnosťami využívaných k identifikácií. V kapitole 3 sa podrobne zoznámime so spracovávaním odtlačku a s extrakciou jeho jednotlivých vlastností, ktoré budú využité v nasledujúcich kapitolách 4, 5, 6 a 7. Kapitola 4 popisuje základné informácie potrebné k uskutočneniu morfovania zvolenou technikou, metódou rezom. Posledné tri kapitoly (5, 6, 7) obsahujú návrh, implementáciu a testovanie morfovacej metódy, ku ktorej ako rozšírením práce bolo doimplementované rozpoznávanie a vylepšenie kvality odtlačku, za účelom vykonania morfovacej techniky aj na reálnych odtlačkoch. Posledná kapitola 8 obsahuje záver.

Kapitola 2

Odtlačok prsta

Odtlačok prsta je vzor, ktorý je zanechaný na objekte po dotyku ľudským končekom prsta. Za zanechanie vzoru na povrchu po dotyku môže vlhkosť a mastnota na prste. Okrem toho je odtlačky možné aj odobrať atramentom, alebo inými látkami nanesením na povrch končeka prsta a následne odtlačením na hladký povrch, napríklad papier. [15] [6]

Ľudské odtlačky prstov sú detailné, takmer jedinečné, len málo sa menia a sú trvanlivé po celý život jednotlivca, vďaka čomu sú vhodné ako dlhodobé identifikátory ľudskej identity. Môže ich zaznamenávať polícia alebo iné orgány na identifikáciu jednotlivcov, ktorí zatajujú svoju totožnosť, alebo na identifikáciu osôb, ktoré sú nespôsobilé alebo mŕtve, a teda sa nemôžu identifikovať. [15] [16]

V tejto kapitole bude popísaná biometria v rámci spracovávania odtlačkov prstov a faktory, ktoré biometrickú charakteristiku ovplyvňujú (kapitola 2.1), podstata daktyloskopie a jej tri zákony (kapitola 2.2) a všeobecný popis odtlačku prsta, ktorý zahŕňa papilárne línie (kapitola 2.2.1), rozdelenie odtlačkov do určitých tried na základe globálnej alebo lokálnej úrovne pozorovania (kapitola 2.2.2)

2.1 Úvod do biometrie

Biometria v rámci tejto práce znamená automatizované rozpoznávanie jedincov na základe ich špecifických charakteristík. Je ich možné rozdeliť do dvoch skupín: fyzické charakteristiky a behaviorálne charakteristiky [13] [3]. Medzi fyzické charakteristiky patria črty jedincov, ktoré sú tvorené anatómiou tela, napr. odtlačok prsta, dlane, geometria tváre, sieť žíl na rukách, DNA a podobne. Medzi behaviorálne charakteristiky patrí napríklad chôdza, podpis či hlas. [3]

Hlavnou výhodou biometrických systémov je, že charakteristiku využitú na identifikáciu jedinca nie je možné stratiť alebo zabudnúť (napríklad v porovnaní s občianskym preukazom). Tento fakt je zároveň aj nevýhodou, pretože charakteristiku nie je možné zmeniť. Ďalšou nevýhodou je, že niektoré charakteristiky môžu povedať veľa o zdravotnom stave jedinca a v tom prípade ide o zásah do súkromia. [13]

Množstvo biometrických systémov je používaných v rôznych aplikáciách a pre danú aplikáciu má skúmaná biometrická charakteristika určité výhody a nevýhody. Výber biometrickej charakteristiky teda závisí na zvážení niekoľkých možností, aby bol splnený výkon rozpoznávania. Všeobecne existuje 7 faktorov, ktoré ovplyvňujú výber [3]:

1. **Univerzálnosť** - každý jedinec prístupujúci k aplikácií by mal vlastniť charakteristiku.

2. **Jedinečnosť** - charakteristika by mala byť dostatočne odlišná medzi jednotlivcami, aby nedochádzalo k nepravdivej identifikácii jedinca.
3. **Trvalosť** - charakteristika jedinca by nemala byť závislá na čase, to znamená, že v priebehu času by sa nemala významne meniť. V opačnom prípade by mohlo dôjsť buď k nepravdej zhode alebo k nemožnosti identifikovať jedinca.
4. **Merateľnosť** - malo by byť možné získať a digitalizovať biometrickú charakteristiku pomocou vhodných zariadení, ktoré nespôsobujú jednotlivcovi neprimerané nepríjemnosti. Získané nespracované údaje by okrem toho mali byť spracovateľné. Tento faktor významne ovplyvňuje frekvenciu porúch a presnosť rozpoznávania.
5. **Výkon** - okrem presnosti rozpoznávania by výpočtové zdroje potrebné na dosiahnutie tejto presnosti a priepustnosti (počet transakcií, ktoré je možné spracovať za jednotku času) biometrického systému mali spĺňať aj obmedzenia stanovené aplikáciou.
6. **Prijateľnosť** - jedinca pristupujúci k aplikácií by mali byť ochotný predať charakteristiku systému.
7. **Bezpečnosť** - miera, ako ľahko je možné charakteristiku podvrhnúť, alebo sa vyhnúť zhode.

2.2 Daktyloskopia

Podstatu daktyloskopie tvoria vedecké poznatky o fyziologických vlastnostiach kože človeka. Je charakterizovaná ako náuka o obrazcoch papilárnych línií vytvorených na vnútornej strane článkov prstov, na dlaniach, na prstoch na nohách a na chodidlách. [17]

Skúmanie papilárnych línií je podriadené trom fyziologickým zásadám, takzvaným daktyloskopickým zákonom, ktoré spočívajú v individuálnosti papilárnych línií, ich relatívnej nemennosti a relatívnej neodstrániteľnosti [17]:

- **Neopakovateľnosť** - na zemi s vysokou pravdepodobnosťou neexistujú žiadny dvaja jedinca, ktorý majú úplne zhodné obrazce papilárnych línií. Francis Galton zistil, že pravdepodobnosť dvoch zhodných odtlačkov je 1 ku 64 miliard [13].
- **Nemennosť** - po celý život jedinca sa obrazce, tvorené papilárnymi líniami, nemenia.
- **Neodstrániteľnosť** - papilárne línie sú neodstrániteľné za predpokladu, že nie je poškodená nižšia vrstva kože (podrobnejšie prebrané v kapitole 2.2.1).

2.2.1 Papilárne línie

Odtlačok prstu je jeden z biometrických charakteristík človeka. Jedná sa o unikátnu priestorovú kresbu vyvýšením povrchovej štruktúry pokožky, tzv. papilárnych línií. Nachádzajú sa na vnútornej strane článkov prstov, na dlaniach, na prstoch nôh a chodidiel. Na ich vrchole sa nachádzajú nervové zakončenia hmatových nervov a vyústenia potných žliaz. Výška vyvýšených reliéfov je zhruba 0,1-0,4 mm a šírka cca 0,2-0,7 mm [16] [17]. Na iných častiach povrchu ľudského tela papilárne línie nie sú vytvorené.

Významnou skutočnosťou je, že papilárne línie nemajú žiadne iné živočíšne tvory okrem primátov a nález odtlačkov a stôp preto skoro jednoznačne svedčí o ľudskom pôvode. [16] [3] [17]



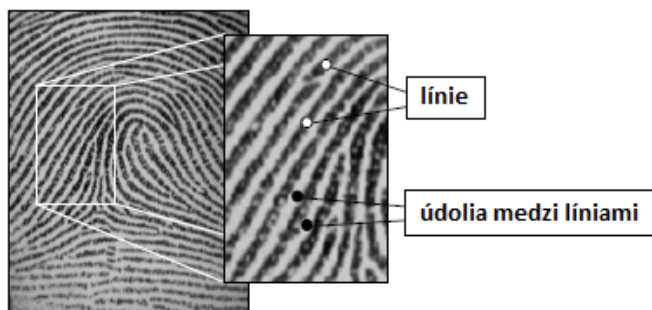
Obrázok 2.1. Ukážka štruktúry pokožky papilárnych línií. [1]

Papilárne línie vznikajú v nižšej vrstve kože z drobných výbežkov, papilár. V tejto nižšej vrstve, derme, sú takisto aj preddefinované ich zakrivenia. Výsledné obrazce, ktoré sa nazývajú dermatoglyfy, sú teda len projekciou z nižšej vrstvy kože (ako je ukázané na obrázku 2.1) a v tom prípade majú schopnosť regenerácie pri ľahkom poškodení. Ak v prípade hlbšieho zranenia dôjde k poškodeniu vrstvy dermis, papilárne línie sa na tomto mieste už nikdy neobnovia. [3] [1]

Ďalšou významnou vlastnosťou dermatoglyfov je to, že ich na prvý pohľad hladké zakrivenia obsahujú významné detaily pre daktyloskopiu. Sú to rôzne prekríženia a prerušenia papilárnych línií, čo vytvára charakteristické znaky odtlačku prsta, takzvané markanty (bude bližšie popísané v kapitole 2.2.3). [3] [1]

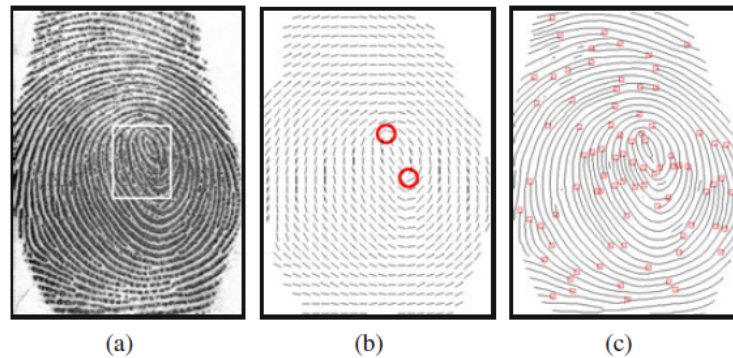
2.2.2 Klasifikácia odtlačkov prstov

Na obrázku odtlačkov prstov sú obvykle línie tmavé, zatiaľ čo údolia medzi líniami svetlé (obrázok 2.2). Línie a údolia majú väčšinou paralelný priebeh, avšak niekedy sa rozdvíajú a niekedy sa ukončujú. Pri analýze na globálnej úrovni má vzor odtlačkov prstov jednu alebo viac oblastí, v ktorých čiary hrebeňa vykazujú charakteristické tvary (vyznačujúce sa vysokým zakrivením, častým ukončením atď.). Tieto regióny (nazývané singularity) možno klasifikovať do troch typológií: slučka, delta a závit (bude bližšie prebrané v nasledujúcich častiach) [6] [16] [17]. Singulárne oblasti zapadajúce do kategórií slučiek, delta a závit sa typicky označujú ako \cap , Δ a O . Niekedy nie sú výslovne uvádzané vlastnosti typu závit, pretože typ závit sa dá opísať ako „singularita“ s dvoma čelnými slučkami [16] [17]. Ďalej v práci sa bude uvádzať už len typ jadro (zahŕňa závit a slučku) a typ delta.



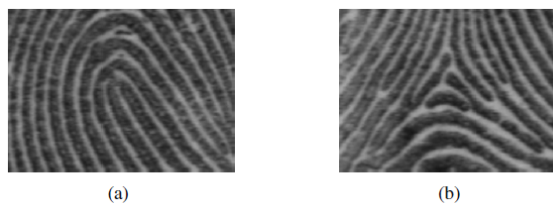
Obrázok 2.2. Línie a údolia medzi líniami. [2]

Detaily odtlačkov prstov je možné rozdeliť do dvoch rôznych skupín podľa spôsobu rozpoznávania. Prvou skupinou je rozdelenie podľa dermatoglyfov, obrazcov, ktoré odtlačky vytvárajú. V tejto skupine sú odtlačky reprezentované mapou lokálnych orientácií ako je ukázané na obrázku 2.3 (b). Mapa zvyčajne obsahuje miesta kde sa lokálne orientácie náhle menia a vytvárajú tak špeciálne úseky zvané singulárne body [6] [16] [17]. Druhou skupinou sú prerušenia a prekríženia papilárnych línií, takzvané markanty (obrázok 2.3 (c)), ktoré budú bližšie popísané v kapitole 2.2.3. [6]



Obrázok 2.3. Úrovne detailov odtlačku. [3]

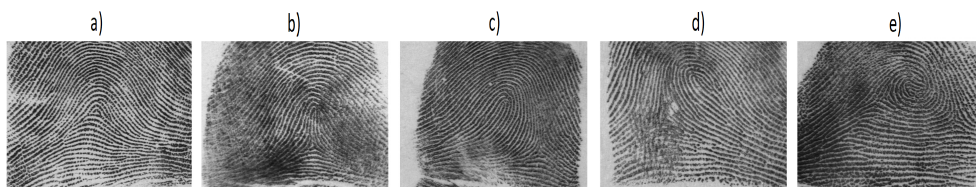
Teraz si popíšeme vyššie uvedené singulárne body - jadro a deltu. Oba z bodov sú vizuálne charakteristické. Jadro, tiež nazývané aj slučka, tvoria papilárne línie ktoré vstupujú z jedného smeru a vrátia sa tým istým (obrázok 2.4 (a)). Táto singularita sa môže využiť ako orientačný bod na zarovnanie odtlačku. Deltu tvoria tri papilárne línie, ktoré sa zbiehajú na jedno miesto a vytvárajú tak vzor trojuholníka (obrázok 2.4 (b)). [6] [16]



Obrázok 2.4. Singulárne body: (a) slučka, (b) delta. [3]

Súbor singulárnych bodov, je možné vnímať ako abstraktnú mapu orientácií, pretože od ich množstva a umiestnenia je možné predpovedať zvyšok odtlačku. Väčšina klasifikačných algoritmov vychádza z Galton-Henryovej klasifikačnej schémy [18] a teda existuje päť najbežnejších tried, do ktorých je možné rozdeliť odtlačky podľa singulárnych bodov (obrázok 2.5):

1. **Oblúk** - neobsahuje ani deltu ani slučku,
2. **vypuklý oblúk** - jadro je priamo nad deltou,
3. **ľavá slučka** - jadro je orientované na ľavú stranu a delta sa nachádza napravo,
4. **pravá slučka** - jadro je orientované na pravú stranu a delta sa nachádza naľavo,
5. **závit** - obsahuje dve delty a dve slučky.



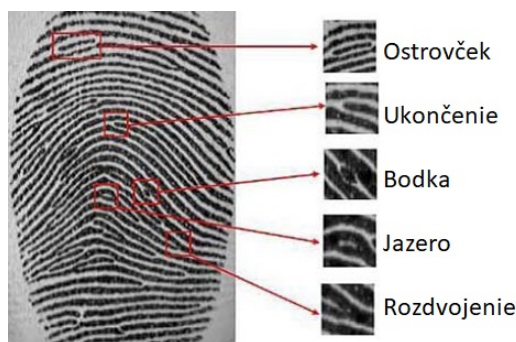
Obrázok 2.5. Príklad bežných 5 tried odtlačkov prstov: a) oblúk, b) stanový oblúk, c) ľavá slučka, d) pravá slučka e) závit. [4]

Rozdelenie tried nie je dostatočné, pretože by dochádzalo k falošným zhodám v identifikácii jedinca. Charakteristika, ktorá dokáže dostatočne detailne rozlíšiť odtlačky a vedie k správnej identifikácii, sa nazýva markanty odtlačku (kapitola 2.2.3).

2.2.3 Markanty

Markanty odtlačku prsta sú drobné detaily tvoriace špecifické znaky papilárnych línií, pomocou ktorých je možné jednoznačne identifikovať jedinca. Práve na základe detekcie markantov je založená väčšina rozpoznávacích metód alebo algoritmov odtlačkov prstov. Ide o spôsoby narušenia kontinuity papilárnych línií, kedy na nich dochádza napríklad k náhlemu ukončeniu, k môžnému rozdeleniu na dve atď. Sir Francis Galton (1822 - 1911) bol prvým, kto kategorizoval markanty a pozoroval, že počas života jednotlivca zostávajú nezmenené. Markanty sa na jeho počesť niekedy nazývajú „Galtonove detaily“. [6]

Pre identifikáciu markantov sú zanedbateľné geometrické a rozmerové hodnoty línií. Podstatnými sú len polohy na odtlačku, kde sa línia vynára, končí, rozdeľuje alebo sa spája s inou. Okrem miesta, kde sa charakteristika nachádza, má ešte 2 ďalšie vlastnosti: smer a typ [6] [3]. Smer markantu je určený lokálnou orientáciou papilárnej línie, na ktorej sa nachádza. Typ markantu je definovaný miestami, kde sa línie krížia alebo končia, čo vytvára niekoľko druhov čít. Patria sem: zakončenia, ostrovček, bodka, rozdvojenie, jazero, háčik, most a prekríženie. Niektoré typy sú zobrazené na obrázku 2.6. [6] [5]



Obrázok 2.6. Ukážka niekoľkých markantov odtlačkov prsta. [5]

Na rozoznanie odtlačku prsta sú využívané len 2 typy markantov, postačujúce na jednoznačnú identifikáciu a to rozdvojenie a zakončenie. Pri snahe analyzovať všetky typy markantov by sa zbytočne výrazne predĺžilo celkové spracovanie odtlačku, pretože popisovanými dvoma typmi je možné všetky ostatné nahradiť. [13] [3]

Kapitola 3

Spracovanie odtlačku

Väčšina algoritmov na rozpoznávanie a klasifikáciu odtlačkov prstov je založená na analýze šedotónového obrázku, a vyžaduje fázu extrakcie významných vlastností. Extrahované vlastnosti môžu mať fyzický charakter (napr. markanty (kapitola 2.2.3)), alebo nemusia súvisieť so žiadnymi fyzickými znakmi (napr. lokálne orientácie (3.1)). Vlastnosti sa môžu použiť buď na porovnávanie, alebo ich výpočet môže slúžiť ako medzikrok na odvodenie ďalších znakov, napríklad sa často vykonávajú niektoré kroky predbežného spracovania a vylepšenia, aby sa zjednodušila úloha extrakcie markantov. [6]

Odtlačky všeobecne obsahujú dva druhy vlastností: lokálne vlastnosti, ako sú markanty alebo singulárne body (jadro a delta) a globálne vlastnosti, ako napríklad orientácia a frekvencia vzoru výstupkov. Lokálne vlastnosti sú používané na identifikáciu jedinca na základe porovnania dvoch sád markantov. Globálna vlastnosť, orientačné pole popisuje lokálnu orientáciu štruktúry papilárnych línií v každom bode odtlačku.

V tejto kapitole bude popísaná analýza a extrakcia prvkov odtlačku prstu po jednotlivých krokoch spracovávania. Najprv sa zníži kolísanie hodnôt stupňov šedej (kapitola 5.1), následne sa extrahujú lokálne orientácie (kapitola 3.1), lokálne frekvencie papilárnych línií (kapitola 3.2) a v poslednom kroku prebehne extrakcia markantov (kapitola 3.4). Pred extrakciou markantov je nutné obrázok filtrovať (kapitola 3.3.1), binarizovať a ztenšiť papilárne línie (kapitola 3.4.1), a až po týchto úpravách je možné extrahovať markanty (kapitola 3.4.2) a vyfiltrovať falošné vzniknuté predošlými úpravami odtlačku alebo spracovaním poškodených častí na pôvodnom (kapitola 3.4.3).

3.1 Lokálne orientácie papilárnych línií

Lokálne orientácie papilárnych línií na pixele $[x, y]$ je uhol θ_{xy} , ktorý by papilárna línia zvierala s horizontálnou osou, keby ďalej pokračovala stále rovnakým smerom. Je vypočítaná vzhľadom k malému okoliu bodu, ktorého stredom je pixel $[x, y]$, Uhol θ_{xy} nadobúda iba hodnoty $0^\circ - 180^\circ$ pretože papilárne línie nemajú smer a vo výsledku by lokálna orientácia s uhlom napríklad 80° bola identická lokálnej orientácií s uhlom 260° . [6] [19]

Najrozšírenejším spôsobom výpočtu orientačného poľa je algoritmus najmenších štvorcov (metóda založená na gradiente). Gradient $\partial(x_i, y_j)$ v bode $[x_i, y_j]$ obrázku I , je dvojdimenzionálny vektor $[\partial_x(x_i, y_j), \partial_y(x_i, y_j)]$, kde ∂_x a ∂_y komponenty sú deriváty pre I v $[x_i, y_j]$ s ohľadom na smer v osi x a y . [6] [19]

Odhad hodnôt orientácie línie je založený na vzťahu gradientu medzi susednými pixelami. Keďže gradienty sú orientácie v mierke pixelov, orientácia línie je kolmá na stredný fázový uhol zmien hodnôt pixelov, naznačený gradientmi. [6] [19] [20]

Algoritmus najmenších štvorcov závisí na významných parametroch:

- Horizontálny a vertikálny operátor gradientu: ∂_x a ∂_y ,
- veľkosť $\omega \times \omega$ priemerovacích blokov.

Pre výpočet lokálnych orientácií je teda v prvom rade potrebné vypočítať gradienty $\partial_x(x, y)$ a $\partial_y(x, y)$ pre každý pixel obrázku odtlačku prsta $I_x(x, y)$. Následne sa pre výpočet lokálnych orientácií v blokoch $\omega \times \omega$, centrovaných na pixeloch (x, y) použijú nasledujúce rovnice [6] [20]:

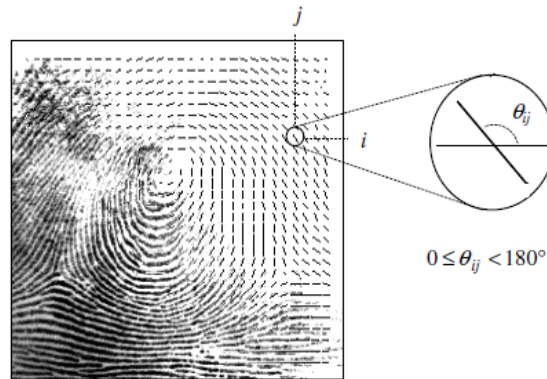
$$v_x(x, y) = \sum_{u=x-\frac{\omega}{2}}^{x+\frac{\omega}{2}} \sum_{v=y-\frac{\omega}{2}}^{y+\frac{\omega}{2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v) \quad (1)$$

$$v_y(x, y) = \sum_{u=x-\frac{\omega}{2}}^{x+\frac{\omega}{2}} \sum_{v=y-\frac{\omega}{2}}^{y+\frac{\omega}{2}} (\partial_x^2(u, v) - \partial_y^2(u, v)) \quad (2)$$

$$\phi(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{v_x(x, y)}{v_y(x, y)} \right) \quad (3)$$

$$\theta_{gr}(x, y) = 90^\circ + \phi(x, y) \quad (4)$$

Odhadnuté orientačné pole podľa popísaných postupov je možné vidieť na obrázku 3.1.



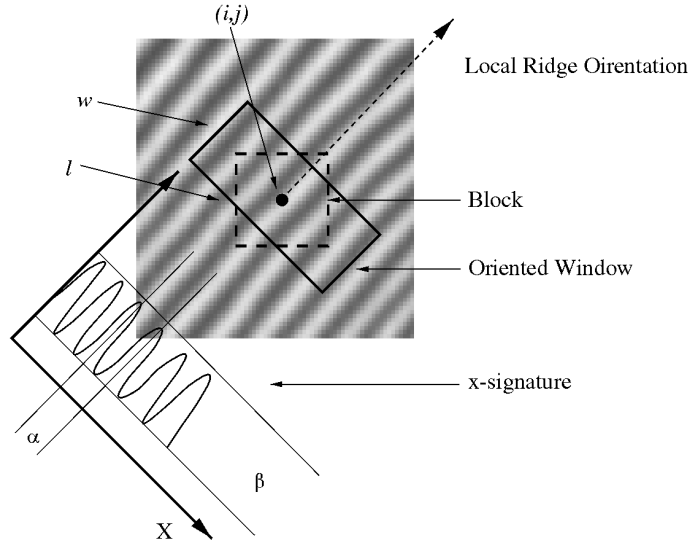
Obrázok 3.1. Obrázok orientačného poľa zodpovedajúceho odtlačku prsta vypočítaného pomocou okna s veľkosťou $\omega \times \omega$. Každý prvok označuje lokálnu orientáciu papilárnych línií odtlačku prsta. [6]

3.2 Frekvencie papilárnych línií

V lokálnom okolí, kde sa nevyskytujú žiadne markanty a singulárne body, úrovne šedej pozdĺž hrán a prehĺbenín môžu byť modelované ako sínusoida v smere kolmom na lokálnu

orientáciu hrany. Preto je lokálna frekvencia ďalšou vlastnosťou odtlačku prsta. Nech \mathcal{G} je normalizovaný obrázok odtlačku a O je orientačné pole, potom kroky zahrnuté v odhade lokálnej frekvencie hrán sú nasledovné [6] [21]:

1. Rozdeliť \mathcal{G} na bloky o veľkosti $w \times w$ (16×16).
2. Pre každý blok so stredom v pixele (i, j) vypočítať orientované okno veľkosti $l \times w$ (32×16), ktoré je definované v súradnicovom systéme hrán (obrázok 3.2).



Obrázok 3.2. Orientované okno a x-signatúra. [6]

3. Pre každý blok so stredom v pixele (i, j) vypočítať x-signatúru, $X[0], X[1], \dots, X[l-1]$, hrán a prehĺbenín v orientovanom okne, kde:

$$X[k] = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} \mathcal{G}(u, v) \quad (5)$$

$$u = i + \left(d - \frac{w}{2}\right) \cos(O(i, j)) + \left(k - \frac{1}{2}\right) \sin(O(i, j)) \quad (6)$$

$$v = j + \left(d - \frac{w}{2}\right) \sin(O(i, j)) + \left(\frac{1}{2} - k\right) \cos(O(i, j)) \quad (7)$$

Ak žiadne markanty a singulárne body sa nevykýtujú v orientačnom okne, x-signatúra vytvára diskretnú sínusovú vlnu, ktorá má v orientačnom okne rovnakú frekvenciu ako hrany a prehĺbeniny. Preto je možné odhadnúť lokálne frekvencie hrán z x-signatúry. Nech $\mathcal{T}(i, j)$ je priemerný počet pixelov medzi dvoma za sebou idúcimi vrcholmi x-signatúry, potom frekvencia $\Omega(i, j)$, je vypočítaná ako: $\Omega(i, j) = 1/\mathcal{T}(i, j)$. Ak neexistujú žiadne po sebe idúce vrcholy z x-signatúry, frekvencii je priradená hodnota -1 pre odlíšenie od platných frekvenčných hodnôt. [21]

3.3 Vylepšenie odtlačku prsta

Na uľahčenie detekcie rysov druhej úrovne (markantov) je odtlačok prsta vylepšený prostredníctvom kontextuálneho filtrovania Gáborovými filterami (kapitola 3.3.1). Vylepšenie, ktoré je riadené orientačným a frekvenčným obrázkom vytvára takmer binárny obraz, ktorý je potom jednoducho binarizovaný pomocou pevného prahu. [6] [22]

3.3.1 Gáborov filter

Orientácie a frekvencie rovnobežných papilárnych línií poskytujú užitočné informácie, ktoré pomáhajú pri odstraňovaní nechceného šumu. Sínusoidy sa menia veľmi pomaly v lokálnej konštantnej orientácii a preto je možné pásmovým filtrom, ktorý je nastavený na odpovedajúcu frekvenciu a orientáciu, účinne odstrániť nežiaduci šum a zachovať skutočnú štruktúru papilárnych línií. [6] [21]

Keďže Gáborov filter má frekvenčne aj orientačne selektívne vlastnosti, je možné ho použiť ako pásmovú priepustnosť. Rovnomerný Gáborov filter je všeobecne definovaný nasledovne: [6] [21]

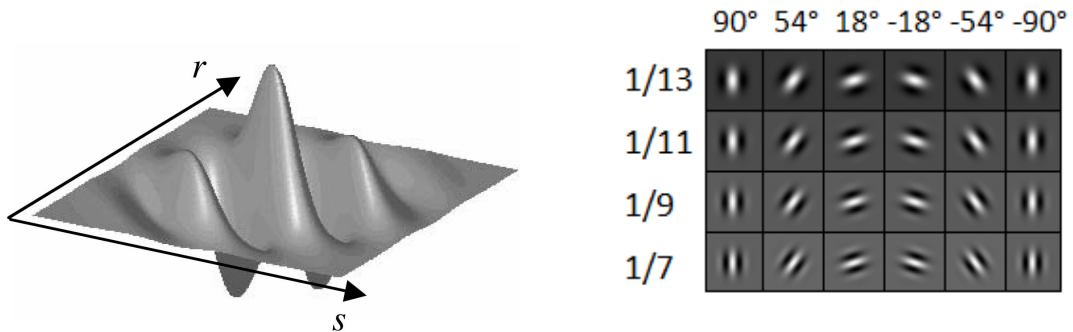
$$h(x, y : \phi, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_\phi^2}{\delta_x^2} + \frac{y_\phi^2}{\delta_y^2} \right] \right\} \cos(2\pi f \cdot x_\phi) \quad (8)$$

$$x_\phi = x \cos(\phi) + y \sin(\phi) \quad (9)$$

$$y_\phi = -x \sin(\phi) + y \cos(\phi) \quad (10)$$

kde ϕ je orientácia Gáborovho filtra, f je frekvencia sínusoidy, δ_x a δ_y sú priestorové konštanty Gaussovej obálky pozdĺž osí x a y .

Frekvencia sínusoidy f je jasne daná lokálnou frekvenciou papilárnych línií a orientácia ϕ je daná lokálnou orientáciou papilárnych línií. Výber hodnôt δ_x a δ_y zahŕňa kompromis. Čím väčšie sú hodnoty, tým robustnejšie sú filtre, ale zároveň aj vzrastá šanca, že filtre vytvoria falošné papilárne línie. So zvolením nižších hodnôt síce klesá šanca na vytvorenie falošných línií, ale taktiež nebude filter tak efektívny v odstraňovaní šumu. Grafickú reprezentáciu popisovanej rovnice 8 je možné vidieť na obrázku 3.3. [6]



(a) 3D reprezentácia Gáborovho filtra. [23]

(b) Ukážka bánk Gáborovho filtra pre rôzne frekvencie (zvislá os) a orientácie (vodorovná os).

Obrázok 3.3. Grafická ukážka banky Gáborovho filtra.

3.3.2 Binarizácia

Nech I je šedotónovým obrázkom odtlačku prsta s g úrovňami šedej, a $I[x, y]$ je úroveň šedej pixelov $[x, y]$ na obrázku. Nech je $z = S(x, y)$ diskretný povrch zodpovedajúci obrázku $I : S(x, y) = I[x, y]$. Priradením bielych pixelov k úrovňam šedej blízkym 0 a čiernych pixelov k úrovňam šedej blízkym $g - 1$ vznikne obrázok, kde línie odtlačku prstu obsahujúce čierne pixely zodpovedajú papilárnym líniam a línie obsahujúce biele hodnoty pixelov zodpovedajú údoliam medzi papilárnymi líniami. [7]

3.4 Extrakcia markantov z papilárných líní

Markanty sú významnými prvkami odtlačku a ako bolo popísané v kapitole 2.2.3, práve na nich je založené množstvo rozpoznávacích metód a algoritmov odtlačkov prstov. V nasledujúcich podkapitolách bude popísaný celkový proces extrakcie markantov a identifikácia falošne označených markantov.

3.4.1 Stenčovanie papilárných líní

Stenčovanie je jeden z najdôležitejších krokov predspracovania obrázku odtlačku prsta pre extrakciu markantov. Ide o prevedenie pôvodnej šírky papilárných líní na šírku jeden pixel. [7] [8] Avšak stenčovacie algoritmy sú dosť kritické a vytvárajú drobné výbežky na výslednej kostre odtlačku, čo môže spôsobiť detekciu falošných markantov. [6]

Binárne digitalizovaný obrázok je definovaný maticou BI , kde každý pixel $BI(i, j)$ je buď 0 alebo 1. Vzor určený na stenčovanie sa teda skladá z pixelov, ktoré majú hodnoty 1. Pri predpoklade, že je využité okno 3×3 pre spracovávanie jednotlivých bodov obrázku, je zrejme, že pre pixel (i, j) budú susediace pixely mať konfigurácie ukázané na obrázku 3.4.

$P9$ $(i - 1, j - 1)$	$P2$ $(i - 1, j)$	$P3$ $(i - 1, j + 1)$
$P8$ $(i, j - 1)$	$P1$ (i, j)	$P4$ $(i, j + 1)$
$P7$ $(i + 1, j - 1)$	$P6$ $(i + 1, j)$	$P5$ $(i + 1, j + 1)$

Obrázok 3.4. 3×3 okno pre spracovávanie jednotlivých bodov obrázku odtlačku prsta. [7]

Pri paralelnom spracovaní obrazu nová hodnota priradená bodu v n -tej iterácii závisí od jeho vlastnej hodnoty, ako aj od hodnôt jeho ôsmich susedov v $(n - 1)$ iterácii, takže všetky body obrázku môžu byť spracované súčasne. [7] [8]

Spôsob extrahovania kostry obrázka spočíva v odstránení všetkých obrysových bodov obrazu s výnimkou tých bodov, ktoré patria do kostry. Aby sa zachovala konektivita kostry, každá iterácia je rozdelená na dve subiterácie ako je vidieť na obrázku 3.5 (a) a 3.5 (b). [7] [8]

V iteráciách na obrázku 3.5 symbol $\#$ označuje novú skupinu potrebných splnených podmienok a odsadenie predstavuje potrebné podmienky pre $A(P_1)$ v rámci jej nadobudnutej hodnoty. $A(P_1)$ je počet „01“ vzorov v zoradenej množine P_2, P_3, \dots, P_9 , ktorej prvky sú ôsmy susedia prvku P_1 (obrázok 3.4). $B(P_1)$ je počet nenulových susedov pre P_1 . Ak

niektorá z podmienok nie je splnená, t. j. podmienky (a) – (d) alebo (a)(e) – (g), tak P_1 nemôže byť zmazané z obrázku. [8]

Algoritmus druhej subiterácie, je identický s prvou, dôjde len k zmene podmienok (c), (d), (f) a (g), a zbytok bude identický (ako je vidieť na obrázku 3.5 (b)). [8]

$$\begin{array}{ll}
 \#(a) \ 2 \leq B(P_1) \leq 7; & \\
 (b) \ A(P_1) = 1: & \\
 \quad (c) \ P_2 * P_4 * P_6 = 0 & (c') \ P_2 * P_4 * P_8 = 0, \\
 \quad \text{and (d)} \ P_4 * P_6 * P_8 = 0; & (d') \ P_2 * P_6 * P_8 = 0, \\
 \#(e) \ A(P_1) = 2: & \#(f') \ P_2 * P_8 = 1 \text{ and } P_4 + P_5 + P_6 = 0, \\
 \quad \#(f) \ P_2 * P_4 = 1 \text{ and } P_6 + P_7 + P_8 = 0 & \#(g') \ P_6 * P_8 = 1 \text{ and } P_2 + P_3 + P_4 = 0, \\
 \quad \text{or } \#(g) \ P_4 * P_6 = 1 \text{ and } P_2 + P_8 + P_9 = 0 & (b)
 \end{array}$$

(a)

Obrázok 3.5. (a) Algoritmus prvej subiterácie, (b) upravené podmienky prvej subiterácie, pre algoritmus druhej subiterácie. [8]

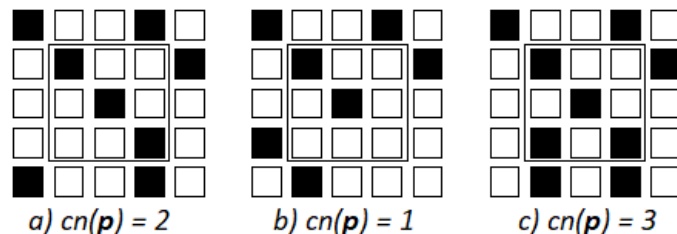
3.4.2 Extrakcia markantov

Po získaní binárnej kostry, jednoduché skenovanie obrázku umožňuje detekciu pixelov, ktoré zodpovedajú markantom. Pixely zodpovedajúce markantom sú charakterizované špeciálnou hodnotou (tzv. *crossing number*), ktorá je rôzna od 2. *Crossing number* $cn(p)$, pixelu p , je definované v binárnom obrázku ako polovica súčtu rozdielov medzi dvojicami pixelov v susedstve ôsmich pixelov p . *Crossing number* je definované nasledovne: [6]

$$cn(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 |val(p_{i \bmod 8} - val(p_{i-1}))| \quad (11)$$

kde pixely p_1, p_2, \dots, p_7 patria do zoradenej postupnosti pixelov, ktoré definujú susedstvo pixelu p a $val(p) \in \{0, 1\}$ je hodnota pixelu. Z rovnice vyplýva že pixel p s hodnotou $val(p) = 1$ [6]:

- $cn(p) = 2$ - je pixel kostry papilárnej línie, neoznačujúci markant (obrázok 3.6 a)).
- $cn(p) = 1$ - zodpovedá markantu typu ukončenie (obrázok 3.6 b)).
- $cn(p) = 3$ - zodpovedá komplexnejšiemu markantu, rozdvojeniu (obrázok 3.6 c)).

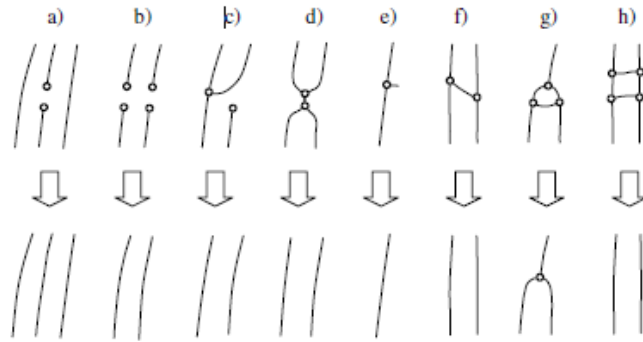


Obrázok 3.6. Typy markantov detekovateľných pomocou *crossing number*. [6]

3.4.3 Filtrovanie markantov

Filtrovanie markantov je fáza dodatočného spracovania odtlačku, ktorej úlohou je odstránenie falošných markantov, vytvorených aplikáciou predošlých krokov na poškodené oblasti odtlačku (napr. stenčovanie). Xiao a Raafat v [9] identifikovali najbežnejšie falošné markanty a zaviedli pre tento účel algoritmus na ich odstránenie (obrázok 3.7). Algoritmus je založený na postupnosti určitých pravidiel a ako vstup vyžaduje určité numerické charakteristiky (popísané v kapitole 3.4.4) priradené k markantom.

Na obrázku 3.7, je vidieť, že v a) a b) odstránenie falošných markantov prebehlo prepojením dvoch protilahlých koncových bodov, v c) odstraňuje rozdvojenia ležiace oproti koncovému bodu alebo v d) oproti inému rozdvojeniu, odstraňuje výbežky v e), mosty v f), trojuholníky v g) a rebríkové štruktúry v h). [9]



Obrázok 3.7. Najbežnejšie typy nepravých markantov a výsledné štrukturálne zmeny po ich odstránení. [9]

3.4.4 Charakteristiky markantov

Ako bolo popisované vyššie, pre analýzu odtlačku prsta z dôvodu odstránenia falošných markantov, sú k markantom priradené určité charakteristiky.

1. Dĺžka papilárnej línie $L_{p_1 p_2}$ je rovná krokom trasovania pozdĺž stenčenej línie z bodu p_1 do bodu p_2 [9].
2. Smer markantu (D_m) je odvodený zo smeru papilárnej línie (D_p), ktorý je možné získať zo susedných bodov línie bodu p . Pri trasovaní t krokov ($\lambda < t < 2\lambda$, kde λ je priemerný počet pixelov, medzi dvoma priľahlými stenčenými líniami) z oboch strán bodu p , dva ďalšie body p_1 a p_2 môžu byť dosiahnuté na tej istej línii. Smer línie je možné vypočítať pomocou nasledujúcej rovnice [9]:

$$D_p = \arctan \frac{Y_{p_1} - Y_{p_2}}{X_{p_1} - X_{p_2}} \quad (12)$$

Keďže už poznáme smer papilárnej línie, tak pre výpočet smeru markantu je potrebné zvážiť 2 možné varianty, pretože rozlišujeme dva rôzne typy markantov (zakončenie a rozdvojenie). Pre zakončenie línii je smer markantu definovaný, ako smer postupujúci zo zakončenia línie. V prípade rozdvojenia je smer markantu definovaný ako priemerná hodnota smeru dvoch línii, ktoré postupujú smerom z rozdvojenia ďalej.

3. Vzdialenosť markantu (R) je euklidova vzdialenosť medzi dvoma markantmi v pixelových jednotkách.

4. Uhol β medzi markantmi M_1 a M_2 je definovaný nasledovne: [9]

$$\beta(M_1, M_2) = \min(|D_{m_1} - D_{m_2}|, 2\pi - |D_{m_1} - D_{m_2}|) \quad (13)$$

Ak je uhol $\beta > \frac{\pi}{2}$, potom M_1 a M_2 je pár protilahlých markantov. [9]

3.4.5 Detekcia falošných markantov

Ako bolo vysvetlené v kapitole 3.4.2, pre detekciu markantov sa využije maska o veľkosti 3×3 . M je detekovaný bod markantu, a $X_1 - X_8$ sú jeho susediace body v poradí hodinových ručičiek (obrázok 3.8). [9]

X_8	X_1	X_2
X_7	M	X_3
X_6	X_5	X_4

Obrázok 3.8. Ukážka 3×3 masky.

Nech R , λ a β sú označenia charakteristík markantov z predošlej kapitoly 3.4.4, N_{mm} je počet čeliacich markantov voči skúmanému markantu a C_m je počet prepojených markantov so skúmaným markantom, kde m predstavuje typ markantu ukončenie (e) alebo rozdvojenie (b), ktorého sa falošná štruktúra týka. Pre všetky typy markantov platí, ak vzdialenosť medzi nimi R je menšia ako 2λ , počet čeliacich markantov N_{mm} sa zvýši o jedna. Podmienka prepojených relácií (C_e alebo C_b) sa líši na základe typov ktorých sa týka. V prípade, že je rozdvojenie prepojené s ukončením a vzdialenosť markantu R je menšia ako λ potom zvýšime počet C_e o jedna. Ak je rozdvojenie prepojené s iným rozdvojením a ich vzdialenosť R je menšia ako 2λ tak zvýšime počet C_b o jedna. V algortime z [9] je zvolená λ ako prah, pretože papilárna línia odtlačku sa nemôže zle spojiť s inou líniou ako susednou.

S postupom uvedeným v predchádzajúcej časti 3.4.2 sa maska posúva pixel po pixeli. Všetky markanty sú následne klasifikované ako pravé a falošné, o čom rozhodujú tieto pravidlá [9]:

- Skutočné ukončenie, nebude čeliť žiadnemu inému markantu (teda počet $N_{ee} = 0$).
- Skutočné rozdvojenie, nebude prepojené s inými rozdvojeniami ani so žiadnym ukončením (teda $C_e = C_b = 0$).

Na obrázku 3.7, je vidieť, že s využitím vyššie uvedených pravidiel, sú napríklad markanty v a) falošné, pretože v malom okolí ($R < 2\lambda$), proti sebe čelia 2 markanty ukončenia, takže počet $N_{ee} = 2$ a teda markant je falošný. Po analýze celého odtlačku, falošné markanty sa zaregistrujú s ich charakteristikami a štruktúrnymi typmi, aby mohli byť odstránené v ďalších krokoch. [9]

Prvým krokom, v odtraňovaní markantov je prepojenie prerušených línií. Vzhľadom na kontinuitu línií, páry markantov ukončenia, by mali byť spojené s maximálnou β hodnotou. Tento postup je nutné vykonať na základe zostupných hodnôt N_{mm} , aby sa zabránilo nesprávnemu prepojeniu párov koncových bodov (markantov ukončenia). [9]

Nasledovne sa spracujú štruktúry vidlíc. V tejto fáze sú rozdvojenia odstránené z odtlačku a potom sú prerušené línie spojené tak, aby vznikli paralelné (obrázok 3.7 c)). Keďže prerušené línie boli navzájom prepojené, všetky ľavé štruktúry môžu byť eliminované ako falošné markanty. [9]

Aby sa odstránili nesprávne prepojené štruktúry, posledným krokom je cyklický postup spracovania vo vzostupných hodnotách atribútu C_b . V prvom cykle sú z obrázku odtlačku odstránené štruktúry mostov s $C_b = 1$. Až keď sa všetky štruktúry mostov neodstránia úplne, postup pokračuje druhým cyklom na odstránenie trojuholníkových štruktúr. Posledným krokom je cyklus na odstránenie rebríkových štruktúr na obrázku. Týmto postupom je možné aj odstrániť zložité štruktúry nesprávnych prepojení, a to rozdelením na základné falošné štruktúry markantov. [9]

Kapitola 4

Morfing odtlačkov prstov

Morfovaný odtlačok prsta je odtlačok, ktorý vznikol kombináciou dvoch alebo viacerých rôznych odtlačkov, a to takým spôsobom, aby výsledný odtlačok spĺňal nasledujúce požiadavky [10]:

- Rysy odtlačkov (lokálne orientácie, frekvencie, markanty), by mali byť zkombinované tak, aby algoritmus rozpoznávania odtlačkov prstov priradil výsledný odtlačok prsta k obidvom subjektom.
- Mal by byť vizuálne realistický (tj. bez zjavných artefaktov), a to tak aby ľudské oko nerozpoznalo že ide o umelo vytvorený odtlačok.

Experimenty na Západnej Virgínskej univerzite (WVU) a FVC2002 súbory údajov [24] ukazujú, že morphing (miešanie) odtlačkov prstov má niekoľko výhod: a) možno ho použiť na generovanie virtuálnej identity z dvoch rôznych prstov; b) možno ho použiť na zakrytie informácií prítomných na snímke odtlačkov prstov jednotlivca, pred ich uložením do centrálnej databázy; a (c) môže sa použiť na vytvorenie potlačiteľnej šablóny odtlačkov prstov, t. j. šablóna sa môže resetovať, ak je zmiešaný odtlačok prstov ohrozený. [25]

Kombinovať odtlačky je taktiež možné niekoľkými spôsobmi. Prvou možnosťou je kombinovať na úrovni detailov, kedy sa proces začína extrakciou lokálnych orientácií, frekvencií a markantov z pôvodných odtlačkov prstov a následne sa vygeneruje syntetický obrázok odtlačku. Druhou možnosťou je skombinovať odtlačky na úrovni obrázku a to priamym spájaním častí pôvodných odtlačkov. [10]

V tejto práci bude podrobne prebraný postup spracovania dvoch rôznych odtlačkov prstov a postup vygenerovania morfovaného odtlačku na úrovni obrázku pomocou metódy rezu popisovanej v [10]. V prvom rade sa jednotlivé odtlačky zanalizujú a extrahujú sa potrebné prvky k morfovaniu, tj. lokálne orientácie, frekvencia papilárnych línií a markanty odtlačkov. Pre optimálne zarovnané odtlačky sa získa vhodná línia rezu odtlačkov a extrahujú sa vhodné lokálne orientácie, frekvencie a markanty, ktoré sú následne využité k vygenerovaniu nového morfovaného odtlačku s identitami oboch pôvodných. [10]

Pre dané dva odtlačky F^1 a F^2 je teda nutné vykonať nasledujúce kroky [10]:

1. Zistiť podobnosť orientačných polí odtlačkov (kapitola 4.1).
2. Zistiť optimálnu reznú líniu odvodenú z podobnosti odtlačkov (kapitola 4.2).
3. Vygenerovať morfovanú šablónu odvodenú z optimálnej reznej línie odtlačkov (kapitola 4.3).
4. Vygenerovať morfovaný odtlačok z predpripravenej šablóny.

4.1 Podobnosť odtlačkov prstov

Podobnosť odtlačkov prstov sa určuje na základe ich lokálnych orientácií. Ide o priemernú hodnotu podobnosti medzi jednotlivými vzájomne prekrytými orientáciami v preložených orientačných poliach O^1 a O^2 .

Lokálne orientácie O^1 a O^2 dvoch odtlačkov sú blokovo vypočítané (v krokoch b_{size} pixelov) pozdĺž horizontálnej a vertikálnej osi pomocou techniky na základe gradientu, vysvetľovanej v kapitole 3.1, s priemerovacím oknom $\omega_{size} \times \omega_{size}$ pixelov. Každý orientačný prvok $o_{i,j} = (\theta_{i,j}, r_{i,j})$ pozostáva z uhla $\theta_{i,j} \in [0, \pi]$ a hodnoty $r_{i,j} \in \langle 0, 1 \rangle$ označujúcej spoľahlivosť odhadu ($r_{i,j}$ sa rovná nula pre prvky patriace do oblasti pozadia). [10]

Všeobecne je možné podobnosť medzi dvoma orientačnými poľami vypočítať nasledovne:

$$s(O^1, O^2) = \frac{\sum_{(i,j) \in (V_{O^1}, V_{O^2})} (r_{i,j}^1 + r_{i,j}^2) \cdot \psi(\theta_{i,j}^1, \theta_{i,j}^2)}{\sum_{(i,j) \in (V_{O^1}, V_{O^2})} (r_{i,j}^1 + r_{i,j}^2)} \quad (14)$$

kde $\psi(\theta_{i,j}^1, \theta_{i,j}^2)$ je podobnosť medzi dvoma orientačnými uhlami θ_1, θ_2 [10]:

$$\psi(\theta_{i,j}^1, \theta_{i,j}^2) = 1 - \frac{2 \cdot |\theta_1 - \theta_2|}{\pi} \quad (15)$$

a V_O obsahuje súradnice orientačných prvkov orientačného poľa O , ktoré patria do oblasti popredia [10]:

$$V_O = \{(i, j) | o_{i,j} \in O \vee r_{i,j} > 0\} \quad (16)$$

4.2 Línia rezu

Línia rezu je určená pokusom súčasne dosiahnuť nasledujúce ciele:

1. Zvoliť líniu rezu, ktorá má v svojom okolí najvyššie ohodnotenie podobnosti vzoru papilárnych línií.
2. Zachovať dostatočný počet markantov z oboch pôvodných odtlačkov prstov.

Prvý cieľ je zameraný pri vytváraní vzoru odtlačku, ktorý vyzerá realisticky pre ľudské oko v okolí línie rezu (t. j. najkritickejšej oblasti). Ten pomáha vytvárať odtlačky prstov, ktoré majú vysokú šancu priradiť sa k obom pôvodným odtlačkom prstov. [10]

Nech (dx^*, dy^*, γ^*) sú najlepšie parametre posunutia a rotácie, ako bolo vysvetľované v predchádzajúcej časti 4.1, potom [10]:

- F_A^2 a O_A^2 sú získané zarovnaním odtlačku prstu F^2 a jeho lokálnych orientácií O^2 vzhľadom na (dx^*, dy^*, γ^*) .
- \hat{F}^1 a \hat{F}^2 sú priesečníkové oblasti pre F^1 a F_A^2 .
- \hat{O}^1 a \hat{O}^2 sú priesečníkové oblasti pre O^1 a O_A^2 .

Lokálne frekvencie línií hrán Υ^1 a Υ^2 pre \hat{F}^1 a \hat{F}^2 sú odhadnuté postupom popisovaným v kapitole 3.1. Každý frekvenčný prvok je hodnota $v_{i,j} \in R$, kde R je oblasť odtlačku, označujúca inverzný priemer periódy línie hrany odhadovanej v jej okolí.

Šablóny markantov T^1 a T^2 sú extrahované z \hat{F}^1 a \hat{F}^2 , použitím algoritmu popisovaného v kapitole 3.4. Každý markant m je štvorica $m = (x_m, y_m, \theta_m, t_m)$ kde x_m a y_m je pozícia markantu, θ_m je smer markantu a t_m je typ markantu (t. j. ukončenie alebo rozdvojenie).

Ohodnotenie línie rezu znázornenej na obrázkoch 4.1, 4.2 a 4.3 je získané nasledujúcim spôsobom [10]:

$$S_c = \omega_o \cdot S_o + \omega_v \cdot S_v + \omega_m \cdot S_m \quad (17)$$

kde:

- S_o a S_v merajú podobnosť orientácie hrán a frekvencií popri línií rezu l (s cieľom vygenerovania vzoru odtlačku realistického pre ľudské oko), ktoré vychádzajú z nasledujúcich rovníc [10]:

$$S_o = \frac{\sum_{(i,j) \in C} (r_{(i,j)}^1 + r_{(i,j)}^2) \cdot \psi(\theta_{i,j}^1, \theta_{i,j}^2)}{\sum_{(i,j) \in C} (r_{(i,j)}^1 + r_{(i,j)}^2)} \quad (18)$$

$$S_v = \frac{\sum_{(i,j) \in C} \left(1 - \frac{|v_{(i,j)}^1 + v_{(i,j)}^2|}{(\max_F - \min_F)} \right)}{|C|} \quad (19)$$

kde C obsahuje súradnice, ktorých vzdialenosť od l je menšia alebo rovná ako d_{max} (hranica priesečníkovej oblasti od línie rezu) a miesto kde obidve orientačné polia predstavujú nenulové prvky (viď zvýraznené oblasti v obrázkoch 4.1 a 4.2) [10]:

$$C = \{(i, j) | (i, j) \in (V_{\hat{O}_1} \cap V_{\hat{O}_2}) \wedge \text{dist}_l(i, j) \leq d_{max}\} \quad (20)$$

$$\text{dist}_l(x, y) = \frac{|a_l \cdot x + b_l \cdot y + c_l|}{\sqrt{a_l^2 + b_l^2}} \quad (21)$$

- S_m je hodnotenie odvodené z dvoch šablón markantov (bude popísané v nasledujúcich odsekoch) s cieľom vygenerovať odtlačok prsta, ktorý sa zhoduje s oboma pôvodnými odtlačkami [10]:

$$S_m = \max(\zeta_m(T^1, T^2), \zeta_m(T^2, T^1)) \quad (22)$$

$$\zeta_m(A, B) = \frac{Z(|A|_l^P, \mu_m, \tau_m) + Z(|B|_l^N, \mu_m, \tau_m)}{2} \quad (23)$$

kde $|T|_l^P$ a $|T|_l^N$ označujú kardinalitu markantov T , ktoré spadajú na pozitívnu alebo negatívnu stranu línie l , pre každé zvlášť [10]:

$$|T|_l^P = |\{m \in T | \Phi_l(m_x, m_y) \geq 0\}| \quad (24)$$

$$|T|_l^N = |\{m \in T | \Phi_l(m_x, m_y) < 0\}| \quad (25)$$

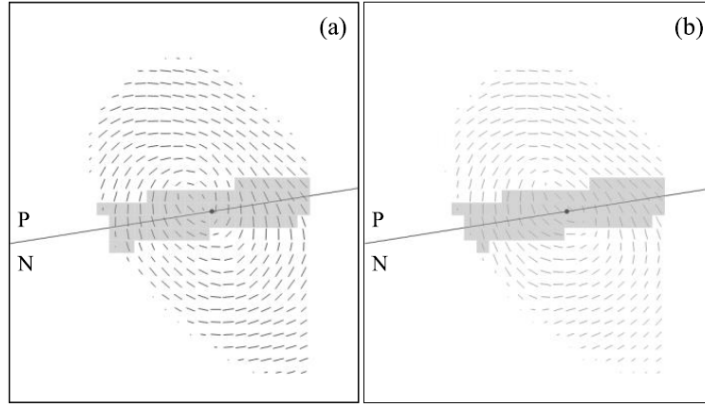
kde Z je sigmoidná funkcia, riadená dvoma parametrami (μ_m a τ_m), ktorá obmedzuje príspevok kardinálneho operátora ($|\cdot|$) a zabezpečuje aby výsledná hodnota bola v rozsahu $[0, 1]$. Sigmoidná funkcia je definovaná nasledovne [10]:

$$Z_{(v, \mu, \tau)} = \frac{1}{1 + e^{-\tau(v - \mu)}} \quad (26)$$

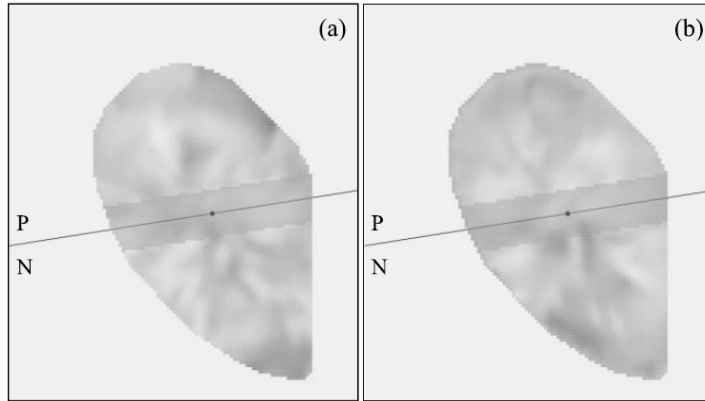
- $\omega_o, \omega_v, \omega_m \in [0, 1], \omega_o + \omega_v + \omega_m = 1$ sú tri váhové faktory

Rovnicu priamky, ktorá predtavuje líniu rezu prechádzajúcu cez ťažisko priesečníkovej oblasti $\rho = (\rho^x, \rho^y)$ s uhlom β je možné získať nasledujúcim spôsobom [10]:

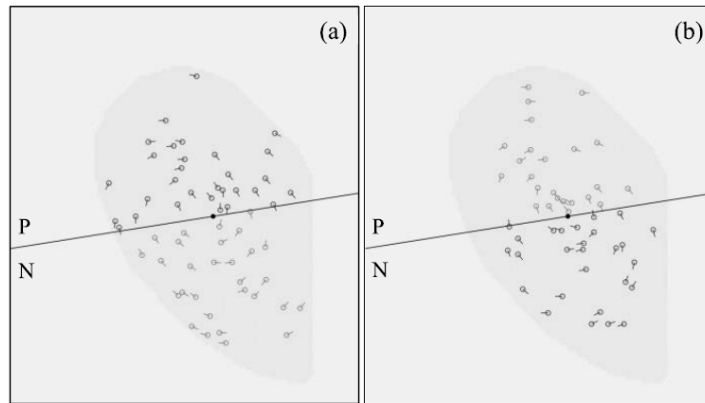
$$\begin{aligned} a_l \cdot x + b_l \cdot y + c_l &= 0 \\ a_l &= \sin(\beta), b_l = \cos(\beta), \\ c_l &= -\rho_x \cdot \sin(\beta) - \rho_y \cdot \cos(\beta) \end{aligned} \quad (27)$$



Obrázok 4.1. Detail priesečníkových oblastí medzi dvoma zarovnanými lokálnymi orientáciami O^1 (a) a O_A^2 (b). Zvýraznené prvky orientačného poľa sú využité na výpočet S_0 . P a N predstavujú pozitívnu a negatívnu stranu s ohľadom na líniu rezu l_{max} . [10]



Obrázok 4.2. Detail lokálnych frekvencií papilárnych línií Υ^1 (a) a Υ^2 (b) odhadnutých z priesečníkových oblastí. Svetlé časti označujú vyššie frekvencie. Zvýraznené prvky sú využité k vypočítaniu S_ν . P a N predstavujú pozitívnu a negatívnu stranu s ohľadom na líniu rezu l_{max} . [10]



Obrázok 4.3. Detail markantov extrahovaných T^1 (a) a T^2 (b) z priesečníkových oblastí. P a N predstavujú pozitívnu a negatívnu stranu s ohľadom na líniu rezu l_{max} . Tmavé a šedé markanty sú markanty, ktoré sú využité v rovnici 22 na výpočet $\zeta_m(T^1, T^2)$ a $\zeta_m(T^2, T^1)$. [10]

4.3 Generovanie morfovaného odtlačku prstu

Ako je písané v [26] a [23], realistický odtlačok prsta je možné synteticky zrekonštruovať na základe informácií dostupných v štandardnej šablóne markantov a je možné odhadnúť rôzne aspekty pôvodného odtlačku prsta (t. j. oblasť odtlačku, lokálne orientácie a lokálne frekvencie).

Vzhľadom na líniu rezu l_{max} , informácie o odtlačkoch prstov použité na rekonštrukciu pozitívnej (p) a negatívnej (n) časti nového obrázka sa vyberú na základe výsledného počtu markantov (rovnica 22) nasledovne [10]:

$$(p, n) = \begin{cases} (1, 2) & \zeta_m(T^1, T^2) \geq \zeta_m(T^2, T^1) \\ (2, 1) & \text{inak} \end{cases} \quad (28)$$

Morfované lokálne orientácie \tilde{O} , frekvencie \tilde{Y} a šablóna markantov \tilde{T} sú spočítané zlučením pozitívnych a negatívnych častí [10]:

$$\tilde{O}(x, y) = w_{x,y}^{l_{max}} \cdot \hat{O}^p(x, y) + (1 - w_{x,y}^{l_{max}}) \cdot \hat{O}^n(x, y) \quad (29)$$

$$\tilde{Y}(x, y) = w_{x,y}^{l_{max}} \cdot \hat{Y}^p(x, y) + (1 - w_{x,y}^{l_{max}}) \cdot \hat{Y}^n(x, y) \quad (30)$$

$$\tilde{T} = \{m \in T^p, \Phi_{l_{max}}(m_x, m_y) \geq 0\} \cup \{m \in T^n, \Phi_{l_{max}}(m_x, m_y) < 0\} \quad (31)$$

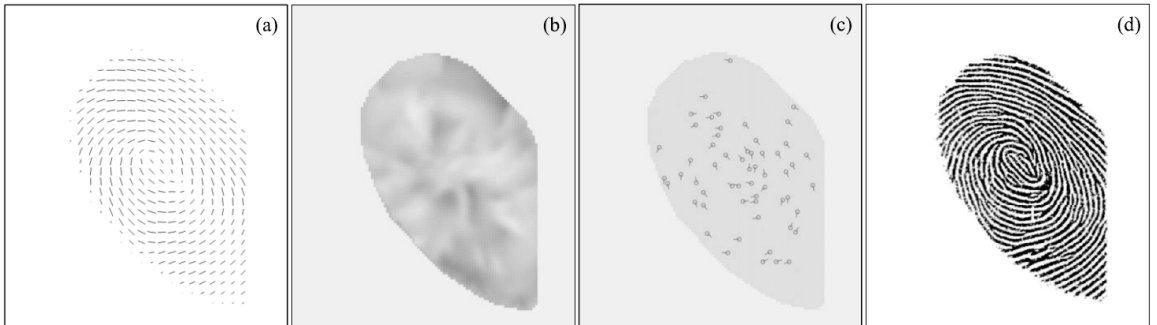
kde $w_{x,y}^{l_{max}} \in [0, 1]$ je váhový faktor na vyrovnanie morfovania v blízkosti línie rezu l_{max} :

$$w_{x,y}^{l_{max}} = \begin{cases} 1 - \max\left(0, \frac{d_{max} - \text{dist}_{l_{max}}(x,y)}{2 \cdot d_{max}}\right) & \text{ak } a_{l_{max}} \cdot x + b_{l_{max}} \cdot y + c_{l_{max}} \geq 0 \\ \max\left(0, \frac{d_{max} - \text{dist}_{l_{max}}(x,y)}{2 \cdot d_{max}}\right) & \text{inak} \end{cases} \quad (32)$$

a $\Phi_{l_{max}}(m_x, m_y)$ je hodnota rovnice priamky 27 po dosadení pozície markantu:

$$\Phi_{l_{max}}(m_x, m_y) = a_{l_{max}} \cdot m_x + b_{l_{max}} \cdot m_y + c_{l_{max}} \quad (33)$$

Aby sa predišlo problémom s kruhovou závislosťou uhlov [6], výpočet uhlov \tilde{O} (rovnica 29) sa v skutočnosti vykonáva zdvojnásobením uhlov a súčtom x a y komponentov. Nakoniec je možné morfovaný odtlačok D^F (obrázok 4.4) synteticky vygenerovať spôsobom popisovaným v [26] a [23], pričom ako vstup sa použijú \tilde{O} , \tilde{Y} a \tilde{T} .



Obrázok 4.4. Lokálne orientácie \tilde{O} (a), frekvencie \tilde{Y} (b) a markanty \tilde{T} (c), odvodené z pôvodných odtlačkov prstov. Synteticky vygenerovaný morfovaný odtlačok (d). [10]

Kapitola 5

Návrh aplikácie

Hlavným cieľom aplikácie je kombinácia dvoch odtlačkov prstov do jedného výsledného odtlačku. Ďalšími podmienkami takéhoto odtlačku, ako bolo podrobnejšie popisované v kapitole 4, je realistický vzor odtlačku pre ľudské oko a zároveň musí mať dostatok aspektov z oboch pôvodných odtlačkov, aby bol voči nim overiteľný. Práca zahŕňa aj implementáciu rozpoznávania odtlačkov, ktoré sa využíva pred samotným morfovaním. Je nutné o odtlačkoch zistiť určité informácie, čo zahŕňa pre každý z nich nasledujúce kroky:

1. Príprava odtlačku k spracovaniu (rozmazanie, normalizácia, segmentácia) (kapitola 5.1).
2. Extrakcia lokálnych orientácií z odtlačku, pričom každej je priradená určitá hodnota r , ktorá hovorí o spoľahlivosti odhadu (lokálne orientácie mimo odtlačku majú automaticky priradenú hodnotu 0) (kapitola 5.2).
3. Extrakcia frekvencií z odtlačku (kapitola 5.3).
4. Vylepšenie odtlačku (kapitola 5.4).
5. Extrakcia markantov z odtlačku (kapitola 5.5).

Po vykonaní vyššie uvedených krokov, máme všetky informácie o odtlačkoch potrebné k morfovaniu. Avšak aby bolo možné samotný morfing odtlačkov uskutočniť, sú potrebné ešte ďalšie kroky vzajomného spracovávanía extrahovaných vlastností odtlačkov. Je potrebné extrahované informácie vhodne roztriediť a vybrať také, z ktorých bude vygenerovaný výsledný morfovaný odtlačok spĺňať všetky potrebné podmienky (kapitola 4). Zvolenou metódou morfovania je metóda rezom [14], ktorej predspracovanie odtlačkov zahŕňa nasledujúce kroky:

1. Zarovnanie odtlačkov prstov (kapitola 5.6).
2. Odhad optimálnej línie rezu zarovnaných odtlačkov (kapitola 5.7).
3. Vytvorenie šablóny pre generovanie morfovaného odtlačku a generovanie morfovaného odtlačku z vytvorenej šablóny (kapitola 5.8).

Po vygenerovaní odtlačku je následne možné porovnanie s pôvodnými a získanie skóre odpovedajúce morfovaného odtlačku voči každému z pôvodných.

5.1 Príprava odtlačku k spracovaniu

Príprava odtlačku k spracovaniu zahŕňa rozmazanie, normalizáciu a segmentáciu odtlačku. Rozmazanie odtlačku je dosiahnuté aplikáciou Gaussovho filtra na pôvodný obrázok (viď obrázok 5.1 (b)). Výhodou rozmazania odtlačku je odstránenie prudkých zmien odtieňov šedej z obrázku, čo zlepšuje získavanie gradientu (pozitívny vplyv na lokálne orientácie, kapitola 3.1) a rozoznanie sínusoidy pri získavaní lokálnych frekvencií.

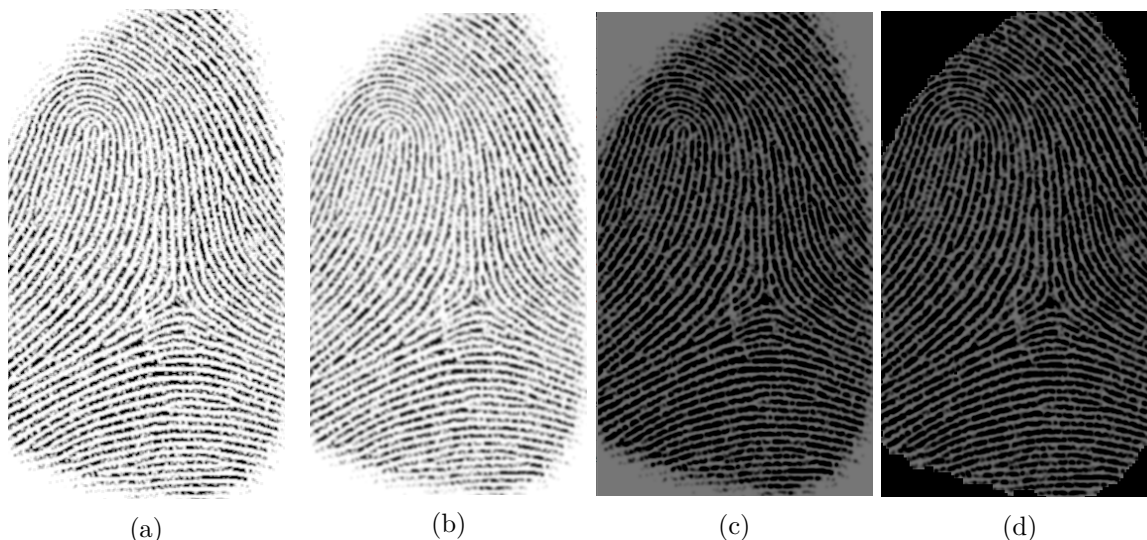
Nasledujúcim procesom prípravy odtlačku, je **normalizácia** rozmazaného odtlačku (obrázok 5.1 (c)). Keďže normalizácia je operácia nad pixelmi, nijako nezmení a ani nepoškodí vzor papilárnych línií. Jej hlavným účelom je len znížiť kolísanie hodnôt stupňov šedej pozdĺž hrán a prehĺbenín. [6] [21]

Nech $I(i, j)$ označuje stupeň šedej na pixeli (i, j) , M a VAR označuje odhadnutý priemer a odchýlku pre I a $\mathcal{G}(i, j)$ označuje normalizovanú hodnotu stupňa šedej na pixeli (i, j) . Normalizovaný obrázok je definovaný nasledovne [21]:

$$\mathcal{G}(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}} & \text{pre } I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}} & \text{inak} \end{cases} \quad (34)$$

kde M_0 a VAR_0 sú požadované hodnoty priemeru a odchýlky.

Posledným krokom je oddelenie odtlačku od pozadia (segmentácia, obrázok 5.1 (d)). Obrázok je rozdelený na bloky 8×8 a následne je pre každý spočítaný rozptyl šedých tónov v danom bloku. V prípade že odhadnutý rozptyl nepresahuje určenú hodnotu prahu VAR , tak blok odtlačku je vyhodnotený ako pozadie.



Obrázok 5.1. Ukážka prípravy obrázku (a) k spracovaniu. (a) pôvodný odtlačok, (b) rozmazaný odtlačok, (c) normalizovaný odtlačok, (d) segmentácia odtlačku.

5.2 Extrakcia lokálnych orientácií z odtlačku

Lokálne orientácie sú odhadnuté postupom popisovaným v kapitole (3.1). Avšak kvôli prítomnosti rušivých aspektov na odtlačku (napr. šum, poškodené línie, markanty...) odhadovaná orientácia nemusí byť vždy správna. Keďže pre orientácie línií nie je typické, že prudko

menia smer (okrem miest obsahujúcich singulárne body), je možné odhadnúť orientácie vyhladiť pomocou Gaussového filtra s veľkosťou priemerovacieho okna 5×5 a odchýlkou 1. Na vyhladenie orientácií je v prvom rade potrebné ich previesť na vektorové pole nasledovne [21]:

$$\Phi_x(i, j) = \cos(2\Theta(i, j)), \quad (35)$$

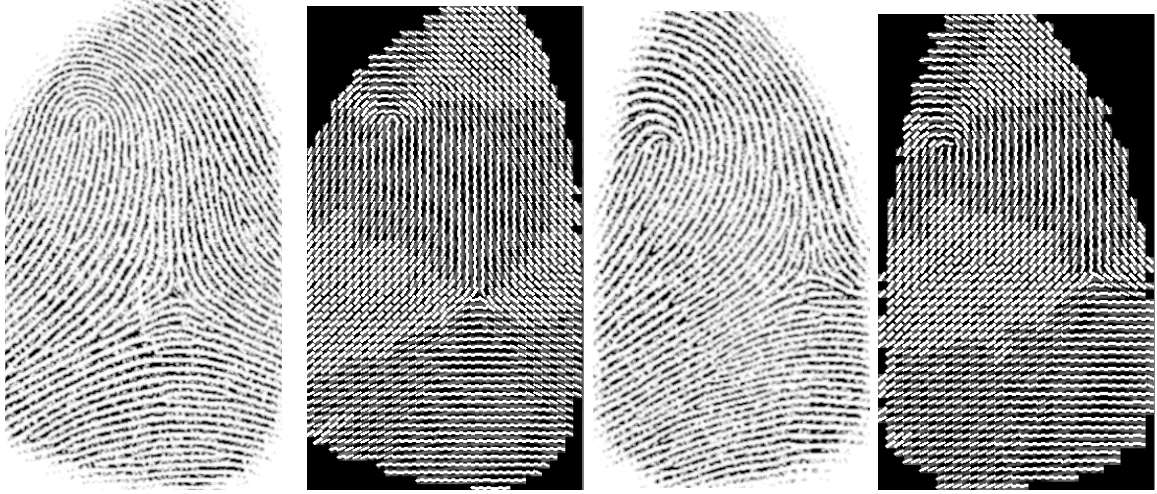
a

$$\Phi_y(i, j) = \sin(2\Theta(i, j)), \quad (36)$$

Po prevedení je možné aplikovať popisovaný Gaussov filter a zo získaných vyfiltrovaných hodnôt $\Phi_x'(i, j)$ a $\Phi_y'(i, j)$ odhadnúť vyhladené orientačné pole [21]:

$$O(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_y'(i, j)}{\Phi_x'(i, j)} \right), \quad (37)$$

Výsledné orientačné pole je možné vidieť na obrázku 5.2.



Obrázok 5.2. Ukážka odhadnutia lokálnych orientácií z odtlačkov prstov.

5.3 Extrakcia lokálnych frekvencií z odtlačku

Pre odtlačok prsta naskenovaného pri fixnom rozlíšení, hodnota frekvencie hrán a prehĺbenín v lokálnom okolí (odhadnutá postupom popisovaným v kapitole 3.2) leží v určitom rozsahu. Napríklad pre 500 dpi obrázok je rozsah: $[1/3, 1/25]$. Preto, ak je odhadovaná hodnota frekvencie mimo tohto rozsahu, frekvencii sa priradí hodnota -1, čo naznačuje, že platnú frekvenciu nemožno získať. [21]

Bloky, v ktorých sa vyskytujú markanty, singulárne body alebo oba súčasne, alebo sú poškodené papilárne línie, netvorí dobre definovanú sínusovú vlnu. Frekvenčné hodnoty týchto blokov je potrebné interpolovať z frekvencie susedných blokov, ktoré majú dobre definovanú frekvenciu. Interpolácia sa uskutočňuje nasledujúcim spôsobom [21]:

1. Pre každý blok so stredom (i, j) ,

$$\Omega'(i, j) = \begin{cases} \Omega(i, j) & \text{ak } \omega(i, j) \neq -1 \\ \frac{\sum_{u=-w_{\Omega}/2}^{w_{\Omega}/2} \sum_{v=-w_{\Omega}/2}^{w_{\Omega}/2} W_g(u, v) \mu(\Omega(i-uw, j-vw))}{\sum_{u=-w_{\Omega}/2}^{w_{\Omega}/2} \sum_{v=-w_{\Omega}/2}^{w_{\Omega}/2} W_g(u, v) \delta(\Omega(i-uw, j-vw)+1)} & \text{inak} \end{cases} \quad (38)$$

kde:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{ak } x \leq 0 \\ x & \text{inak} \end{cases} \quad (39)$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 0 & \text{ak } x \leq 0 \\ x & \text{inak} \end{cases} \quad (40)$$

W_g je diskkrétne gaussove jadro so strednou hodnotou a odchýlkou 0 a 9, a $w_\Omega = 7$ je veľkosť jadra.

2. Ak existuje aspoň jeden blok s hodnotou frekvencie -1, potom sa navzájom vymenia Ω a Ω' a pokračuje sa krokom 1.

Vzdialenosti medzi hranami sa výrazne nemenia v lokálnom okolí. Na odstránenie odľahlých hodnôt môže byť použitý dolnopriepustný filter [21]:

$$F(i, j) = \sum_{u=-w_\Omega/2}^{w_\Omega/2} \sum_{v=-w_\Omega/2}^{w_\Omega/2} W_l(u, v) \Omega'(i - uw, j - vw) \quad (41)$$

kde W_l je dvojrozmerný dolnopriepustný filter s integrovanou jednotkou a $w_l = 7$ je veľkosť filtra. Frekvencie odtlačku odhadnuté popisovaným postupom je možné vidieť na obrázku 5.3. Keďže odhad frekvencie je počítaný ako inverzná hodnota priemernej vzdialenosti vrcholov sínusoidy (viď kapitola 3.2), hodnoty sú blízke 0, čiže grafická reprezentácia je veľmi tmavá.



Obrázok 5.3. Ukážka odhadnutia lokálnych frekvencií z odtlačkov prstov.

5.4 Vylepšenie odtlačku

Po extrakcii lokálnych orientácií \mathcal{O} (kapitola 3.1) a lokálnych frekvencií \mathcal{F} (kapitola 3.1) je možné na odtlačok aplikovať Gáborov filter, ktorý vyhladí šum na obrázku a dokreslí prerušenia v líniiach. Gáborov filter bol použitý podľa postupu popisovaného v kapitole 3.3.1 a výber priestorových konštánt Gaussovej obálky je podľa [6] nastavený na $\delta_x = 4$ a $\delta_y = 4$, veľkosť okna je experimentálne zvolená na $w_g = 6$. Gáborov filter na normalizovaný obrázok \mathcal{G} je aplikovaný nasledujúcim spôsobom [21]:

$$\mathcal{E}(i, j) = \sum_{u=-w_\Omega/2}^{w_\Omega/2} \sum_{v=-w_\Omega/2}^{w_\Omega/2} h(u, v : \mathcal{O}(i, j), \mathcal{F}(i, j)) \mathcal{G}(i - u, j - v) \quad (42)$$

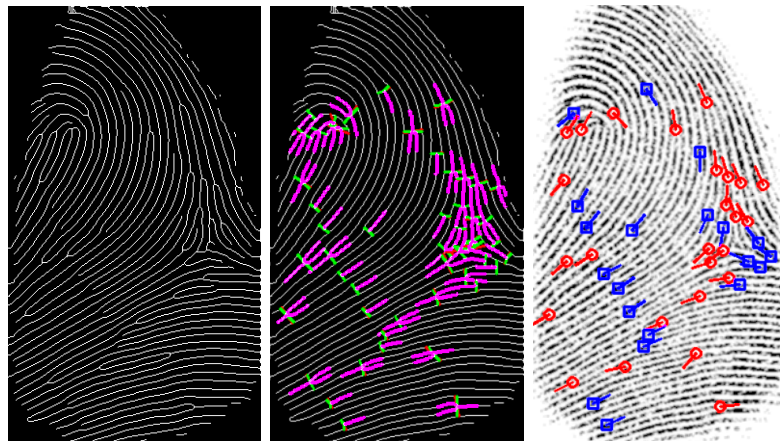
Posledným krokom vylepšenia odtlačku je jeho binarizácia. Keďže odtlačok sfiltrovaný Gáborovým filtrom prevedie obrázok do skoro binárnej podoby, postačí už len na základe určitého prahu previesť jednotlivé pixely do formátu, v ktorom každý pixel obsahuje len hodnoty 0 alebo 1. Výsledný obrázok, bude teda obsahovať len čiernu a bielu farbu. Tento krok je veľmi dôležitý pri extrakcii markantov, pretože extrakciu markantov predchádza ztenšovanie línií, alebo extrakcia kostry odtlačku. Odtlačok je prevedený do binárnej podoby postupom popísaným v kapitole 3.3.2 (viď obrázok 5.4). [7]



Obrázok 5.4. Ukážka aplikácie Gáborovho filtru a binarizácie na odtlačok prstu.

5.5 Extrakcia markantov z odtlačku

Po prevedení odtlačku do binárnej podoby je potrebné ztenšiť papilárne línie (postupom popisovaným v kapitole 3.4.1), čím sa získa kostra odtlačku. Následne je možné identifikovať miesta, kde sa nachádzajú markanty, postupom z kapitoly 3.4.2. Keďže algoritmy ztenšovania línií sú dosť kritické a vytvárajú rôzne výbežky [7] [8] je potrebné odstrániť markanty, ktoré sú falošné (kapitola 3.4.5), alebo sa nachádzajú na okraji odtlačku (keďže, zakončenie obrázku vytvára ukončenie línií, čo je algoritmom kapitoly 3.4.2 vyhodnotené ako markant typu ukončenie). Princíp odhadovania markantov je možné vidieť na obrázku 5.5.



Obrázok 5.5. Ukážka získavania markantov z odtlačku.

5.6 Zarovnanie odtlačkov prstov

Táto technika zarovná dva odtlačky určením najvyššej podobnosti orientácií línií v ich priesečníkoch, pre akékoľvek primerané posunutie a rotáciu. Využíva k tomu metódu získavania podobností orientačných polí popisovaných v kapitole 4.1.

Ako bolo popísané v kapitole 4, k morfovaniu odtlačkov je potrebné nájsť ich optimálne zarovnanie, k čomu slúžia lokálne orientácie (kapitola 3.1). Aby sa našlo najlepšie zarovnanie, sú určené všetky možné posunutia (v krokoch b_{size} pixelov) a rotácie (v krokoch δ_y) orientačného poľa O^2 s ohľadom na O^1 (kapitola 4.1). Následne sú vyradené zarovnania s veľmi malým prekrytím, podľa predom určeného prahu prekrytia:

$$\frac{|V_{O^1}, V_{O^2}|}{\max(|V_{O^1}, V_{O^2}|)} \geq \min_{VR} \quad (43)$$

Pre zarovnania, ktoré prekročili prah prekrytia odtlačkov sa otočia predom odhadnuté lokálne orientácie odtlačku, tak aby boli odpovedajúce pre aktuálnu rotáciu odtlačku a následne sa odhadne ohodnotenie podobnosti odtlačkov v jednotlivých zarovnaniach, podľa rovnice 14 (po otočení orientačného poľa, je nutné jednotlivé orientácie natočiť späť o uhol rotácie poľa, aby odpovedali lokálnym orientáciám rotovaného odtlačku). Ako ideálne zarovnanie odtlačkov sa zvolí to, ku ktorému je priradené najvyššie ohodnotenie podobnosti lokálnych orientácií [10]. Príklad optimálneho zarovnania je vidieť na obrázku 5.6, z ktorého prekrytá oblasť bude vybraná k ďalším krokom morfovania.



Obrázok 5.6. Ukážka zarovnaných odtlačkov prstov.

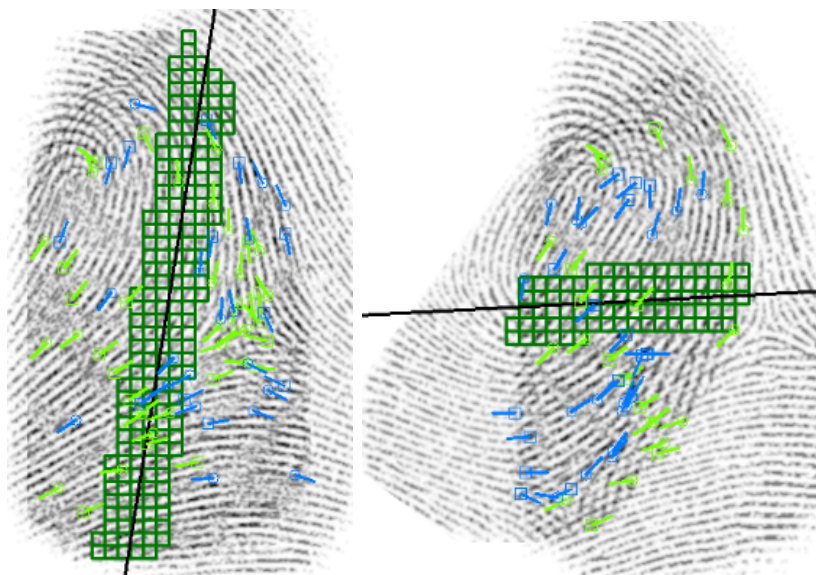
5.7 Odhad optimálnej línie rezu zarovnaných odtlačkov

Podľa popisu v kapitole 4.2 optimálna línia rezu je založená na dvoch ohodnoteniach:

1. Podobnosť papilárnych línií v kritickej oblasti (oblasť línie rezu).
2. Zachovaný dostatočný počet markantov z oboch pôvodných odtlačkov.

Pre úspešnú realizáciu prvého bodu je v prvom rade potrebné určiť priesečníkovú oblasť, je to vodorovné pásmo so šírkou d_{max} , ktoré sa v krokoch δ posúva po priestore zarovnaných odtlačkov. V každom kroku posunutia sa určí jej ťažisko a v krokoch beta sa okolo neho otáča línia rezu. Po aplikovaní posunov priesečníkovej oblasti a rotácie línie rezu okolo ťažiska oblastí vznikne niekoľko línií pre ktoré je potrebné spočítať ohodnotenie kritickej oblasti. Toto ohodnotenie, podľa rovnice 17, spočíva v podobnosti orientácií (rovnica 18) a frekvencií (rovnica 19) papilárnych línií v kritickej oblasti, pretože v mieste rezu nesmie dochádzať k prudkým zmenám smerov papilárnych línií, ktoré by vo výslednom vzore odtlačku prsta vytvárali nerealistický dojem. Posledným faktorom ohodnotenia línie je počet markantov na pozitívnej a negatívnej strane zarovnaných odtlačkov (rovnica 22), na ktoré ich rozdeľuje.

K jednotlivým líniám sa odhadne ohodnotenie kritickej oblasti, podľa vyššie popísaného postupu a ako optimálna línia rezu sa zvolí línia s najvyšším ohodnotením. Príklad odhadnutej línie rezu je vidieť na obrázku 5.7.



Obrázok 5.7. Ukážka odhadnutia optimálnej línie rezu. Modré markanty patria zarovnávanému odtlačku a zelené odtlačku, voči ktorému sa zarovnáva. Markanty sú zobrazené len v morfovannej oblasti.

5.8 Vytvorenie a generovanie z šablóny morfovaného odtlačku

Po získaní optimálnej reznej línie zarovnaných odtlačkov prstov je posledným krokom vytvorenie šablóny zmorfovaného odtlačku postupom popísaným v kapitole 4.3. Keďže línia rezu rozdeľuje oba zarovnané odtlačky na dve časti, pozitívnu a negatívnu, je potrebné rozhodnúť, aká časť z ktorého odtlačku bude využitá pre vygenerovanie šablóny. Toto rozhodnutie prebieha na základe markantov. Jednoducho povedané, vyberú sa tie časti odtlačkov, ktoré spoločne obsahujú viac markantov (viď rovnica 28).

Po výbere ideálnych častí zarovnaných odtlačkov určených k morfovaniu je potrebné zlúčiť informácie, ktoré obsahujú. Zlúčenie však zahŕňa vyváženie morfovania v kritickej oblasti pomocou váhového faktora pre šablónu markantov \tilde{T} [10]:

$$\tilde{T} = m \in T^p, \Phi_{l_{max}}(m_x, m_y) \geq 0 \cup m \in T^n, \Phi_{l_{max}}(m_x, m_y) \geq 0 \quad (44)$$

Po aplikovaní popísanej techniky zlúčenia informácií obsiahnutých v odtlačkoch je pripravená šablóna pre vygenerovanie morfovaného odtlačku. Keďže cieľom práce je vytvorenie morfovaného odtlačku s čo najrealistickejším vzhľadom, k morfovaniu sú využívané pôvodné obrázky odtlačkov. Získaním potrebných morfovaných šablón s informáciami z pôvodných odtlačkov postupmi z 4.3, je následne jednoducho rozhodnuté ktorá časť z ktorého odtlačku bude zvolená k morfovaniu. V mieste kde je spočítaná ideálna línia rezu dochádza k prepojeniu pôvodných odtlačkov vyvážením pixelových hodnôt pôvodných obrázkov. K vyváženiu pixelových hodnôt je využitý nasledujúci vzťah:

$$D^I(x, y) = w_{x,y}^{l_{max}} \cdot \hat{F}^p(x, y) + (1 - w_{x,y}^{l_{max}}) \cdot \hat{F}^n(x, y) \quad (45)$$

kde $w_{x,y}^{l_{max}} \in [0, 1]$ je váhový faktor 32 na vyrovnanie morfovania v blízkosti línie rezu l_{max} . Celý proces morfovania je možné vidieť na obrázku 5.8, kde posledný krok je popisovaný postup generovania morfovaného odtlačku z odhadnutej reznej línie.



Obrázok 5.8. Ukážka celého procesu morfovania dvoch odtlačkov.

Kapitola 6

Implementácia

K implementácii navrhutej aplikácie bol zvolený jazyk C++ a knižnica OpenCV (Open Source Computer Vision Library) verzia 4.1.2¹. K uloženiu a práci s obrázkami je použitá dátová štruktúra *cv::Mat*, ktorú poskytuje knižnica OpenCV. V podstate sa jedná o maticu hodnôt určitého dátového typu. Táto dátová štruktúra je ďalej použitá nielen k uloženiu medzistavov a výsledkov spracovania obrázku, ale tiež k uloženiu získaných vlastností odtlačku, morfovacích informácií a šablón novo generovaného odtlačku. K zisteniu odpovedajúcemu skóre odtlačkov, bolo do aplikácii integrované *Minutia Cylinder-Code SDK* [27].

V tejto kapitole bude popísaný spôsob implementácie navrhutej aplikácie a diskutované zvolené postupy k vylepšeniu výsledkov.

Jedná sa o GUI aplikáciu implementovanú v *Qt*², ktorá je závislá na troch statických knižniciach:

1. **Processing** (extrakcia informácií z odtlačku prsta a vylepšenie kvality odtlačku) - podporuje základné spracovanie odtlačku zahrňujúce aj vylepšenie kvality.
2. **Morphing** (morfovanie odtlačkov prstov) - knižnica umožňujúca zmorfovať odtlačky spracované pomocou knižnice z bodu 1.
3. **Matching** (overovanie morfovaného odtlačku voči každému z pôvodných) - umožňuje overiť 2 odtlačky využitím vyššie spomenutého *Minutia Cylinder-Code SDK*.

6.1 Extrakcia informácií z odtlačku prsta a vylepšenie kvality odtlačku

Knižnica podporujúca základné spracovanie odtlačku. K jednotlivým úkonom sú implementované triedy, ktoré zabezpečujú danú funkčnosť a ich diagram je možné vidieť na obrázku 6.1. Lokálne orientácie z kapitoly 5.2 sú získavané prostredníctvom *OrientationEstimator::estimate()*, lokálne frekvencie z kapitoly 5.3 prostredníctvom *FrequenciesEstimator::estimate()*, vylepšenie kvality (kapitola 5.4) prostredníctvom *GaborFilter::filter()*, extrakcia markantov (kapitola 5.5) prostredníctvom *MinutiaeEstimator::estimate()* a odfiltrovanie falošných markantov (kapitola 3.4.3) prostredníctvom *FakeMinutiaeDetector::find()* a *FakeMinutiaeDetector::remove()*. Markanty sa ukladajú do špeciálnej dátovej štruktúry *Minutiae*, obsahujúcej základné charakteristiky 3.4.4 a informácie o tom či daný markant je

¹<https://opencv.org/about/>

²<https://www.qt.io/>

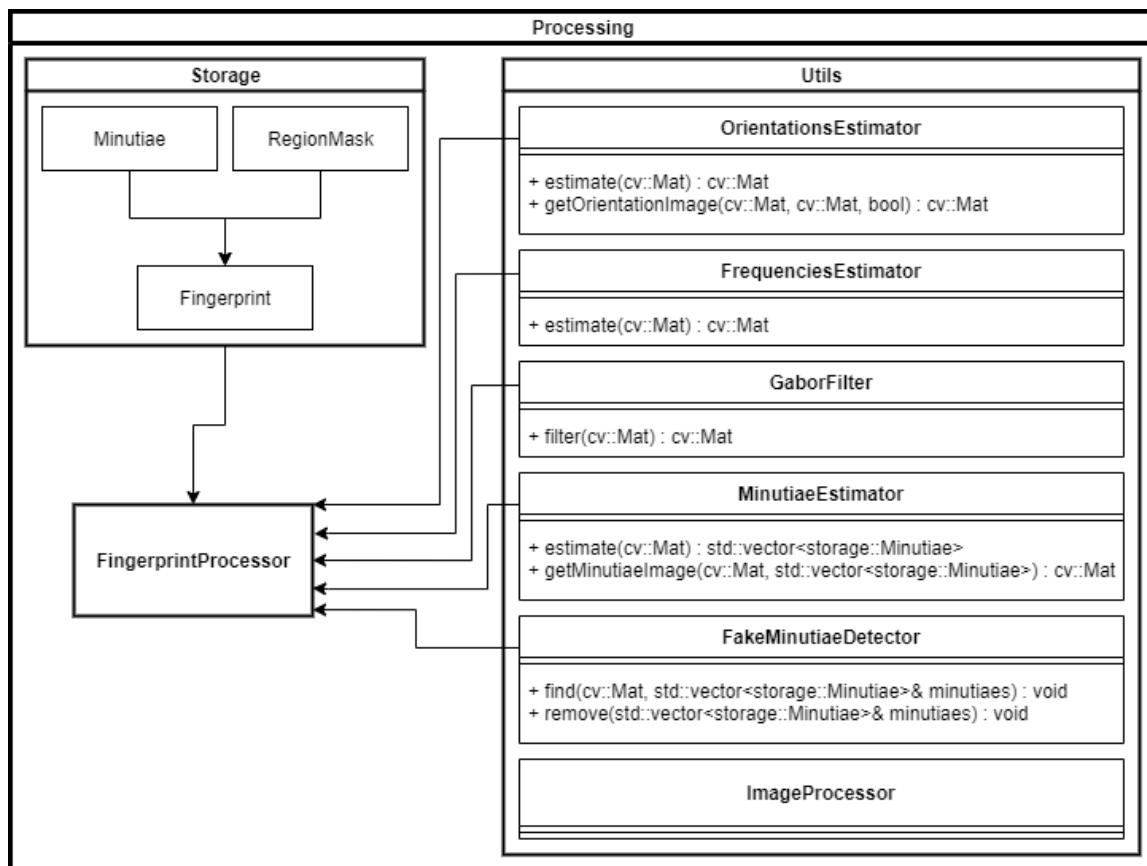
falošný alebo pravý. V prípade falošného markantu je k nemu priradená aj štruktúra ktorú reprezentuje.

Základné operácie nad obrázkom, ako je napríklad prevod dátových typov, zmena veľkosti obrázku a základné operácie nad pixelmi napríklad ekvalizácia histogramu [28] (využitie celého rozsahu poskytovaného dátovým typom), normalizácia (kapitola 5.1), binarizácia (kapitola 3.3.2) či ztenšenie papilárnych línií (kapitola 3.4.1) zapuzdruje trieda *ImageProcessor* implementovaná formou kontajnera statických metód.

Všetky popisované algoritmy boli implementované bez využitia nástrojov, či metód knižníc okrem dátových štruktúr knižnice *OpenCV*. Výnimkou je Gáborov filter na vylešenie kvality odtlačku a Gaussov filter aplikovaný na obrázok, za účelom rozmazania alebo spriemerovania hodnôt v matici.

Samotný odtlačok je uložený pomocou triedy *Fingerprint*. Jedná sa o dátovú štruktúru *cv::Mat*, rožšírenú o možnosť ukladania ostatných vlastností odtlačku (orientácie, frekvencie...). Trieda zabezpečuje aj niektoré základné operácie ako napríklad počet blokov popredia, ktoré odtlačok obsahuje.

Celú funkčnosť spracovávania odtlačkov zapuzdruje vyššia trieda *FingerprintProcessor*, ktorá deleguje činnosť práce nad odtlačkom na popisované nižšie triedy. Tieto triedy slúžia k predspracovaniu odtlačkov prstov a pre získavanie informácií o odtlačkoch. Získané informácie a kroky spracovania následne ukladá do triedy *Fingerprint*, čím uľahčuje prácu s balíčkom a štandardizuje použitie jednotlivých funkcionalít.



Obrázok 6.1. Diagram tried knižnice **Processing**.

6.1.1 Stenčovanie papilárnych línií

Prístup k stenčovaniu bol upravený z návrhu 3.4.1, kvôli množstvu chýb spôsobených pôvodným algoritmom (množstvo výbežkov). Na základe testov a podľa [8] sa nestenčujú samotné papilárne línie, ale priestory medzi nimi. Následne však došlo k malej zmene pri identifikácií markantov. Keďže sa už markanty neidentifikujú na základe stenčených línií, ale na základe stenčených priestorov medzi nimi, je potrebné zameniť typy markantov. V prípade ukončenia priestoru medzi líniami ide o rozdvojenie papilárnej línie a v prípade rozdvojenia priestoru medzi líniami o ukončenie papilárnej línie.

6.1.2 Maska oblasti odtlačku

V rámci testovania vylepšovania kvality (kapitola 7.1.3) bol odhalený problém celkového rušivého vylepšenia kvality reálnych aj syntetických odtlačkoch, ak sú jeho papilárne línie príliš široké, poprípade príliš úzke vzhľadom na veľkosť obrázku. Tento problém je možné vyriešiť len upravením veľkosti spracovávaného bloku a orientovaného okna, čo vedie k lepšiemu odhadu frekvencií a následne k správne vylepšeniu odtlačku (obrázok 6.2).

Keďže je zjavný silný parametrický vplyv na veľkosť okna Gáborovho filtra, je doimplementovaná dodatočná funkcionalita pri vyhodnocovaní vrcholov z odhadnutej sínusoidy (proces pri odhade frekvencií, kapitola 3.2), uchovávanie informácie o ich vzdialenosti a následne zo všetkých vzdialeností odhad priemernej. Na základe priemernej hodnoty sa určí veľkosť vylepšovaného bloku, čím sa zautomatizuje parametrický efekt na vylepšenie. Získané informácie sa ukladajú do triedy *RegionMask*. Maska rozširuje triedu *cv::Mat* a boli do nej presunuté aj informácie o oblasti odtlačku.



Obrázok 6.2. Ukážka upravenia parametrov spracovania (veľkosť bloku a orientovaného okna).

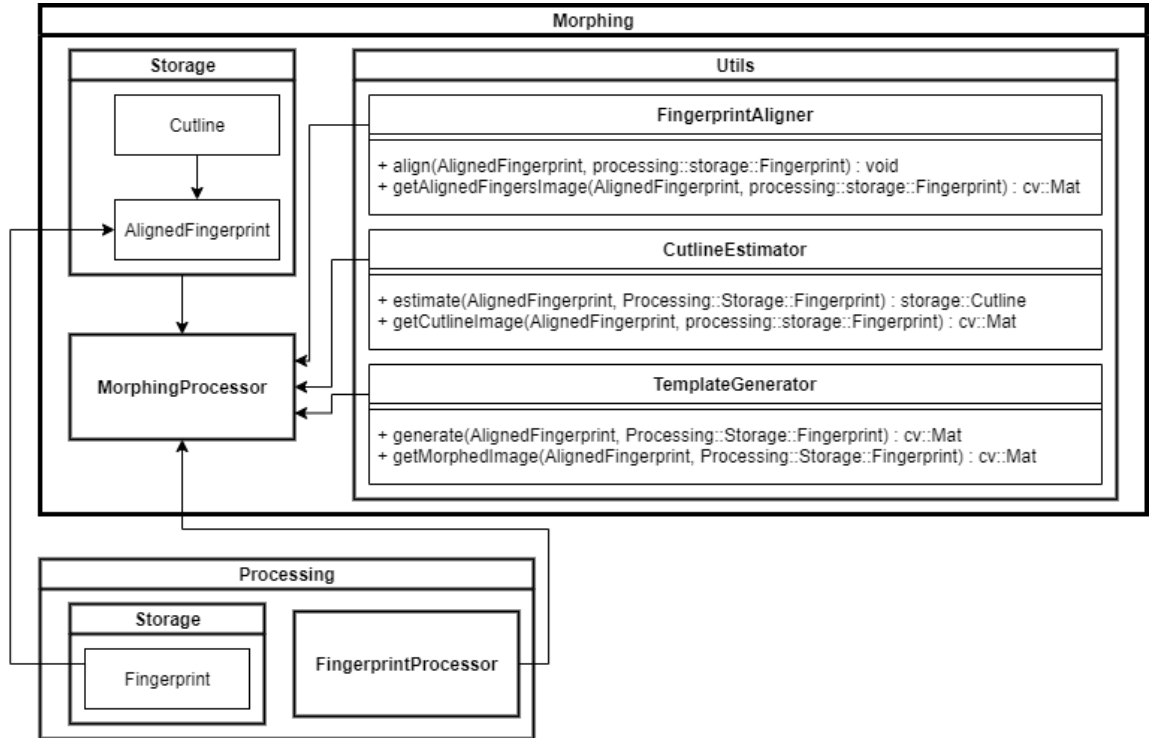
6.2 Morfovanie odtlačkov prstov

Funkčnosť knižnice zapuzdruje trieda *MorphingProcessor* delegujúca prácu na nižšie triedy a balíček základného spracovania odtlačku (balíček popísaný v kapitole 6.1). Hlavné tri triedy zabezpečujúce funkcionalitu sú:

1. *FingerprintAligner* - trieda zarovnávajúca voči sebe dva odtlačky.
2. *CutlineEstimator* - trieda slúžiaca k odhadnutiu optimálnej reznej línie zarovnaných odtlačkov.

3. *TemplateGenerator* - trieda generujúca morfovacia šablónu na základe odhadnutej optimálnej reznej línie.

Pre potreby ukladania dodatočných morfovacích informácií o odtlačkoch bola rozšírená trieda *Fingerprint* z balíčku 6.1 na *AlignedFingerprint*. Rozšírená trieda obsahuje navyše informácie o zarovnaní s druhým odtlačkom a informácie potrebné k morfovaniu (umiestnenie reznej línie, šablóny morfovaných markantov, morfovaných lokálnych orientácií atď). Návrh implementácie a závislosť na knižnici **Processing** je možné vidieť na obrázku 6.3.



Obrázok 6.3. Diagram tried knižnice **Morphing**.

6.2.1 FingerprintAligner

Trieda zabezpečujúca zarovnanie dvoch odtlačkov voči sebe a nasledné uloženie informácie do *AlignedFingerprint*. Zarovnanie prebieha na základe posunutí a rotácií jedného odtlačku voči druhému z ktorých sa následne určuje veľkosť prekrytia, podmienená aspoň 70% prekrytím. Dôvodom je, že pri malých prekrytiach, dochádza k veľmi nízkemu počtu markantov a nie je tým pádom možné získať morfovaný odtlačok overiteľný oproti obom pôvodným (obrázok 6.4 (a) a 6.4 (b)).

V prípade splnenia podmienky prekrytia sa k zarovnávanému odtlačku uloží rozdiel pozícií odtlačkov p^m a odhadnú lokálne orientácie. Následne sa podľa prekrytia a zarovnávaczej pozície odtlačkov premapujú indexy blokovo odhadnutých lokálnych orientácií nasledovne:

$$\begin{aligned} i &= k - \hat{p}_x \\ j &= l - \hat{p}_y \end{aligned} \tag{46}$$

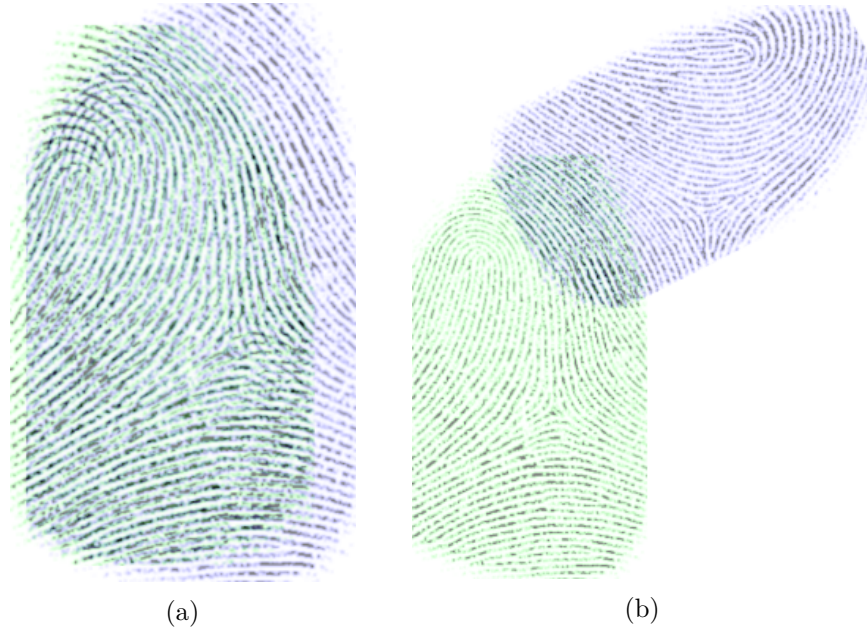
kde k a l sú súradnice aktuálne porovnávaných orientácií v prekrytí a \hat{p} pre pôvodný odtlačok je určené nasledovne:

$$\hat{p}_x = \begin{cases} 0 & \text{ak } p_x^m > 0 \\ -p_x^m & \text{inak} \end{cases}, \quad \hat{p}_y = \begin{cases} 0 & \text{ak } p_y^m > 0 \\ -p_y^m & \text{inak} \end{cases} \quad (47)$$

a \hat{p} pre zarovnávaný odtlačok je určené nasledovne:

$$\hat{p}_x = \begin{cases} p_x^m & \text{ak } p_x^m > 0 \\ 0 & \text{inak} \end{cases}, \quad \hat{p}_y = \begin{cases} p_y^m & \text{ak } p_y^m > 0 \\ 0 & \text{inak} \end{cases} \quad (48)$$

a určí sa ohodnotenie zarovnania podľa návrhu z kapitoly 5.6 za použitia premapovaných indexov lokálnych orientácií.



Obrázok 6.4. (a) Zarovnanie s podmienkou prekrytia 70 %, (b) Zarovnanie s podmienkou prekrytia 20 %.

Prekrytie odtlačkov

Prekrytie odtlačkov sa určuje formou „2D bounding boxu“, ná základe kroku posunutia zarovnávaného odtlačku a veľkostí oboch odtlačkov. Prekrytie je určené najmenšou súradnicou ľavého dolného spoločného miesta b_1 :

$$\begin{aligned} b_1 &= [x, y] \\ x &= \max(p_x, p_x^a) \\ y &= \max(p_y, p_y^a) \end{aligned} \quad (49)$$

a súradnicou pravého horného spoločného miesta b_2 :

$$\begin{aligned} b_2 &= [x, y] \\ x &= \min(p_x + w, p_x^a + w^a) \\ y &= \min(p_y + h, p_y^a + h^a) \end{aligned} \quad (50)$$

Kde p , w a h sú súradnice pozície odtlačku, jeho výška a šírka, a p^a , w^a a h^a sú súradnice aktuálnej pozície zarovnaného odtlačku, jeho výška a šírka (pozícia je určená pozíciou ľavého dolného rohu obrázku odtlačku).

6.2.2 CutlineEstimator

Trieda zabezpečuje odhad optimálnej línie rezu. Pomocou balíčku 6.1 sa odhadnú lokálne frekvencie, markanty a následne pomocou prekrytia, premapovania indexov lokálnych frekvencií a odfiltrovania markantov mimo tohto prekrytia sa odhadne optimálna línia rezu, postupom popisovaným v kapitole návrhu 5.7. Získaná línia sa následne uloží ako atribút triedy *AlignedFingerprint* vo formáte *cv::Vec3* (dátová štruktúra poskytovaná knižnicou OpenCV).

Keďže je potrebné k reznej línii uložiť aj iné informácie, ako jej reprezentáciu priamky v priestore, bola implementovaná trieda *Cutline* rozširujúca atribúty dátovej štruktúry *cv::Vec3* o šablóny vlastností odtlačkov určených k morfovaniu. Vlastnosťami sú jednotlivé strany (pozitívna a negatívna) na ktoré odtlačok, tým pádom aj všetky jeho vlastnosti, rozdeľuje. Pre optimalizáciu nasledujúcich krokov morfovania, sa do triedy *Cutline* priamo ukladajú okrem typu rozdelenia (výber pozitívnej strany z jedného z odtlačkov a negatívnej strany z druhého odtlačku) aj šablóny lokálnych orientácií, frekvencií a markantov jednotlivých strán odtlačkov na ktoré ich rezná línia delí.

Vyhľadávanie optimálnej línie rezu v okolí ťažiska morfovaného odtlačku

Pri vyhodnocovaní výsledného vzhladu morfovaného odtlačku (viď kapitola 7.2.1) bol spozorovaný problém produkovania najvýraznejších artefaktov, vytváraných práve singulárnymi bodmi typu jadro (kapitola 2.2.2). Pri nevhodnom zarovnaní spôsobujú zdvojené útvary, prípadne vytvoria netypickú triedu odtlačku nepriraditeľnú k žiadnej z popisovaných v klasifikácii z kapitoly 2.2.2. Práve tento problém bol podnetom na implementáciu rozšírenia vyhľadávania reznej línie aj v okolí ťažiska ρ morfovaného odtlačku v definovanej vzdialenosti $dist_\rho$.

O rozšírenie sa stará metóda *CutlineEstimator::computeDynamic()*, ktorá ako parameter prijíma požadovanú vzdialenosť $dist_\rho$. Vo vzdialenosti $dist_\rho$ sa následne prehľadá okolie ťažiska ρ za účelom nájdania reznej línie, ktorá bude nadobúdať vyššie ohodnotenie, než línia odhadnutá z ťažiska. K odhadu ohodnotenia dynamickej línie sú využité rovnaké podmienky ako boli popísané v kapitole 4.2. Dynamické vyhľadávanie optimálnej línie rezu, však nezavrhuje možnosť, že optimálna línia rezu sa naozaj v ťažisku nachádza. Dôvodom je skutočnosť, že ak aj napriek artefaktom spôsobených jadrami je línia najoptimálnejšia, tak práve na jej základe prebehne morfovanie.

6.2.3 TemplateGenerator

Trieda je schopná vygenerovať morfovaný odtlačok zo zarovnaní pôvodných odtlačkov aplikovaním informácií uložených v triede *Cutline*, postupom popisovaným v návrhu generovania 5.8. K morfovaniu využíva obrázky pôvodných odtlačkov a v oblasti prierezu sa vávajú hodnoty pixelov línii, čím získa hladký priebeh (za podmienky, že boli správne určené parametre odhadu optimálnej línie rezu) z jedného odtlačku do druhého.

Odstránenie hranatých okrajov

V rámci testovania výsledného výzoru morfovaných odtlačkov (viď kapitola 7.2.1) za účelom vyhladenia hranatých okrajov morfovaných odtlačkov, je doimplementované rozšírenie procesu generovania odtlačku. Bol k tomu využitý upravený váhový faktor z rovnice 32 a voliteľná šedotónová farba pozadia g . Proces rozmazávania okrajov vykonáva metóda *TemplateGenerator::applyBorderWeightToPixel()*. Úprava spočíva v rozšírení rozsahu váhy z $\langle 0, 5; 1 \rangle$ na $\langle 0; 1 \rangle$, výsledný vzťah teda vyzerá nasledovne:

$$w_{x,y}^b = \max \left(0, \frac{b_{width} - dist_b(x, y)}{b_{width}} \right) \quad (51)$$

kde b je označenie okraju odtlačku, b_{width} šírka rozmazávaného okraju a $dist_b(x, y)$ je vzdialenosť bodu od okraju odtlačku.

Výber bodov určených k váhovému rozmazaniu s pozadím je určený na základe jeho vzdialenosti od okraja odtlačku v rámci šírky rozmazávaného okraju b_{width} . Nech \hat{F}^p je označenie pozitívnej strany morfovaného odtlačku, \hat{F}^n negatívna strana morfovaného odtlačku, r^1 a r^2 sú regióny pôvodných odtlačkov, kde $r(x, y) = 0$ je oblasť pozadia a $r(x, y) = 1$ oblasť popredia.

Pre každý bod $\hat{F}_{V_r}^p(x, y)$, kde pozitívna strana morfovaného odtlačku bola prebraná z odtlačku s regiónom r^1 a negatívna z odtlačku s regiónom r^2 platí, ak v jeho okolí vo vzdialenosti b_{width} sa nachádzajú body $p(x, y)$ so splnenou podmienkou:

$$(x, y) \notin V_{r^1} \vee ((x, y) \in V_{r^1} \wedge (x, y) \notin V_{r^2}) \quad (52)$$

tak pre najkratšiu vzdialenosť $dist_b(x, y)$ z nájdených bodov $p(x, y)$ k okraju odtlačku (t. j. prvé miesto kde bola podmienka 52 porušená) v smere ku skúmanému bodu sa spočíta váha $w_{x,y}^b$ (rovnica 51). Následne je váha aplikovaná na pixel, ktorý daný bod predstavuje, spolu so zvolenou šedotónovou farbou pozadia g vzťahom:

$$\hat{F}_{blurred}^p(x, y) = w_{x,y}^b \cdot \hat{F}^p(x, y) + (1 - w_{x,y}^b) \cdot g \quad (53)$$

V_r sú dvojice súradníc regiónu popredia:

$$V_r = \{(x, y) | r(x, y) > 0\} \quad (54)$$

Pre rozmazanie okraju negatívnej strany morfovaného odtlačku $\hat{F}_{V_r}^n(x, y)$, platia rovnaké vzťahy s výmenou porovnávaných regiónov odtlačkov. Podmienka pre identifikáciu bodu pozadia odtlačku bude vyzeráť:

$$(x, y) \notin V_{r^2} \vee ((x, y) \in V_{r^2} \wedge (x, y) \notin V_{r^1}) \quad (55)$$

a aplikácia váhy na pixel, ktorý skúmaný bod predstavuje:

$$\hat{F}_{blurred}^n(x, y) = w_{x,y}^b \cdot \hat{F}^n(x, y) + (1 - w_{x,y}^b) \cdot g \quad (56)$$

Pri vyhladzovaní okrajov oblasti prierezu je potrebné popisované rozmazanie okrajov použiť zároveň na pozitívnu a zároveň aj na negatívnu stranu a na tieto rozmazané pixelové hodnoty ($\hat{F}_{blurred}^p(x, y)$ a $\hat{F}_{blurred}^n(x, y)$) aplikovať prechod (rovnica 45) medzi jednotlivými stranami odtlačkov.

6.3 Overovanie morfovaného odtlačku voči každému z pôvodných

Pre lepšiu verifikáciu a vyvodenie výsledkov z testov implementovanej metódy morfovania je do aplikácie integrované nad rámec zadania *Minutia Cylinder-Code SDK* [27]. *MCC SDK* je knižnica .Net DLL, ktorá umožňuje vyvíjať aplikácie na overovanie odtlačkov prstov pomocou Minutia Cylinder Code algoritmov [29]. SDK nepodporuje všetky typy šablón markantov, pretože rozsah orientácií markantov (kapitola 3.4) je $\langle 0, 2\pi \rangle$, čo nespĺňajú šablóny uložené v NIST databáze³, pretože sú 180° mimo tohto rozsahu. Orientácie musia byť teda prevedené do rozsahu podporovaného knižnicou. [27]

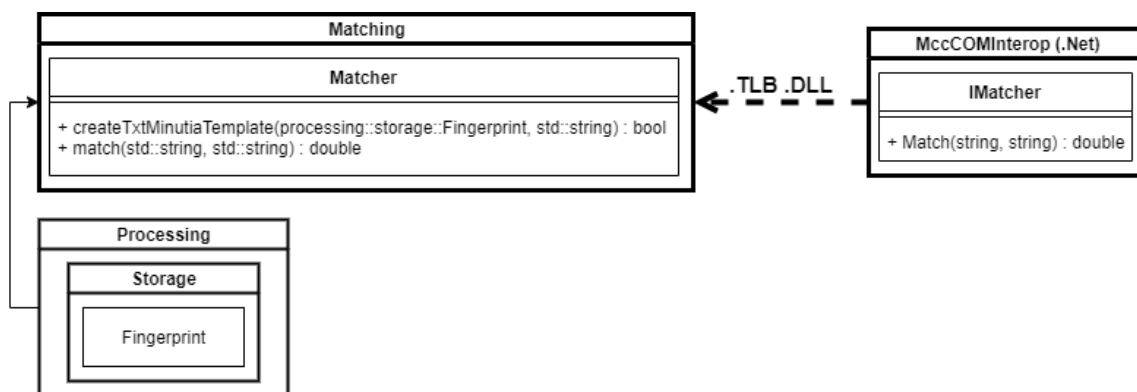
MCC SDK rozpoznáva odtlačky s ohodnotením $\langle 0, 1 \rangle$, pre ktoré podľa pokynov FRONTEX⁴ s cieľom simulovať realistický útok na nejaký systém, sú prahové hodnoty rozpoznávania odtlačkov prstov nastavené na 3 miery nesprávneho overenia (FAR) [10]:

Tabuľka 6.1: Ohodnotenie FAR metriky pre MCC SDK.

FAR (%)	1	0,1	0,01
MCC SDK	0,1083	0,1205	0,1329

Ohodnotenia v tabuľke 6.1 znamenajú, že pre FAR 1 % je potrebné aby porovnanie dvoch šablón markantov, pomocou *MCC SDK*, nadobudlo ohodnotenie aspoň 0,1083. Podobne to platí pre ostatné FAR hodnoty, teda pre 0,1 % FAR musí ohodnotiť MCC SDK odtlačky skóre 0,1205 a 0,01 % FAR potrebuje nadobudnúť aspoň 0,1329.

Diagram implementácie popísanej v nasledujúcich odsekoch, je možné vidieť na obrázku 6.5. Keďže je *MCC SDK* k dispozícii len v jazyku C#, bolo nutné v samostatnom C# projekte *MccCOMInterop* (dynamická knižnica) zapuzdriť potrebné metódy do public interface *IMatcher*, ktoré bolo zviditeľnené pre *Common Object Model (COM)*⁵. Následná registrácia a zviditeľnenie public objektov pre *COM* pri buildovaní knižnice vygenerovalo .DLL⁶ a .TLB⁷ súbor, ktorý bol importovaný do C++ projektu.



Obrázok 6.5. Diagram tried knižnice **Matching**.

³<https://www.nist.gov/srd/shop/special-database-catalog>

⁴<https://frontex.europa.eu/>

⁵<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/com/component-object-model--com--portal>

⁶<https://support.microsoft.com/en-us/help/815065/what-is-a-dll>

⁷<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/midl/com-dcom-and-type-libraries>

Po importovaní .TLB súboru v triede *Matcher* je implementované volanie *COM* objektov prostredníctvom namespace *MccCOMInterop*. Šablóna markantov vygenerovaná zo statickej knižnice *Processing* je pomocou metódy *Matcher::createTxtMinutiaTemplate()* prevedená do formátu kompatibilného s *Minutia Cylinder-Code SDK* a následne metóda *Matcher::match()* volá metódy *COM interface IMatcher*, ktoré ohodnotia jeden odtlačok odpovedajúcim skóre voči druhému (obrázok 6.5).

6.4 Demonštračná GUI aplikácia

Ako ďalšie rozšírenie pre lepšiu prehľadnosť procesu bola vytvorená GUI aplikácia implementovaná v *Qt* [30]. *Qt* je framework umožňujúci vytvárať softvér nezávislý od platformy. Jej primárnymi komponentami sú widgety, prvky určené k vytváraniu užívateľského rozhrania. Widgety môžu zobrazovať údaje a informácie o stave, prijímať vstup od užívateľov a poskytovať kontajnery pre ďalšie widgety. Komunikácia medzi týmito užívateľskými prvkami prebieha na základe signálov a slotov. V princípe ide o zasielanie notifikácií (signálov) o zmene stavu určitého prvku, na ktorý reaguje iný prvok, očakávajúci odoslaný typ správy (správu prijíma pomocou slotu). [30]

Hlavným komponentom demonštračnej aplikácie je rodičovská trieda *DemoApp* starajúca sa o inicializáciu GUI prostredia, o prepojenie jednotlivých widgetov aplikácie pomocou signálov a slotov a uchováva si informáciu o aktuálne zvolenom senzore (Bergdata, SecuGen, Sagem MSO, Syntetický). Voľba senzoru je sprostredkovaná pomocou menu „Change Sensor“ a jeho výber signalizuje *sensorChanged()*, na ktorý jednotlivé *SelectFingerprint* combo boxy reagujú načítaním zvolených dát.

V aplikácií sa tiež nachádzajú 3 okná *DisplayFingerprint*. Dve z nich slúžia na zobrazenie odtlačkov určených na morfovanie a tretie na zobrazenie výsledku morfovania. Dáta do okien pôvodných odtlačkov sú prenášané signálom combo boxov *SelectFingerprint currentIndexChanged()*. Do tretieho okna je morfovaný odtlačok vložený až po odoslaní signálu *clicked()* z tlačítka „Start Morphing“, čím je prebraná celá konfigurácia parametrov a pomocou triedy *ActionManager* sú pre nastavené jednotlivé nástroje z popisovaných knižníc **Processing**, **Morphing** a **Matching**. Následne aplikácia produkuje signál pre štart morfovania zvolených odtlačkov, ktorého výsledok je uložený do posledného okna.

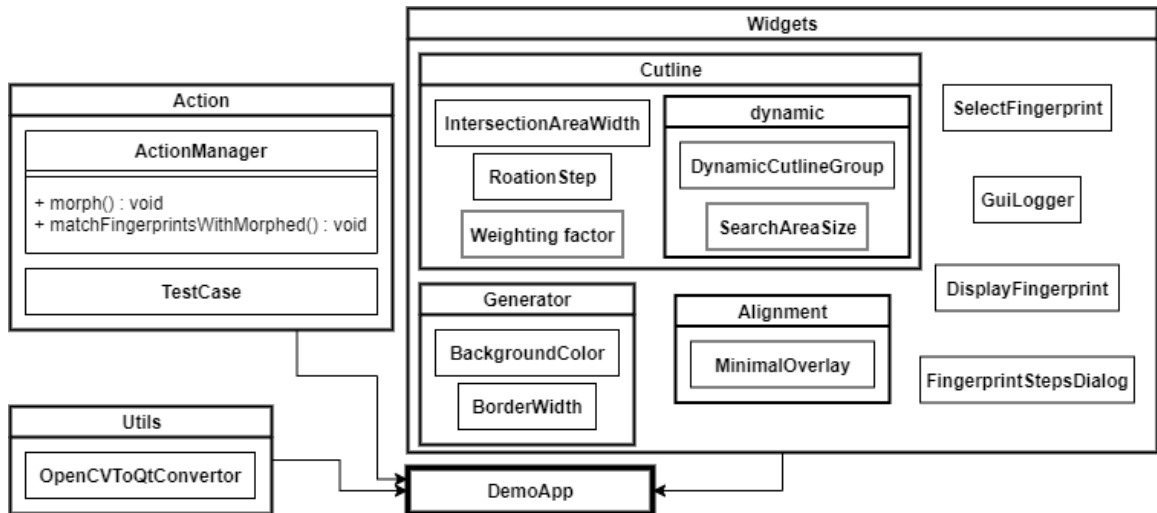
Textové pole v aplikácií je určené pre logovanie priebehu spracovávaní. Signálom *reportProgress()* od jednotlivých komponentov sú predávané loggeru informácie určené k zápisu. Logger je využitý aj pre výpis výsledkov morfovania, t. j. skóre, ktorým odpovedá morfovaný odtlačok voči každému z pôvodných.

Ďalšou funkcionalitou aplikácie sú tlačítka nad jednotlivými oknami, určené k zobrazeniu krokov spracovávaní odtlačkov, či krokov morfovania. Kliknutím na tlačítko sa pošle signál triede *ActionManager*, ktorý z dát uložených v objektoch *Fingerprint* a *AlignedFingerprint* vytiahne potrebné informácie a pomocou *getImage()* motód v knižniciach (viď obrázky 6.1 a 6.3) pošle dáta určené k zobrazeniu do nového dialógového okna *FingerprintStepsDialog*.

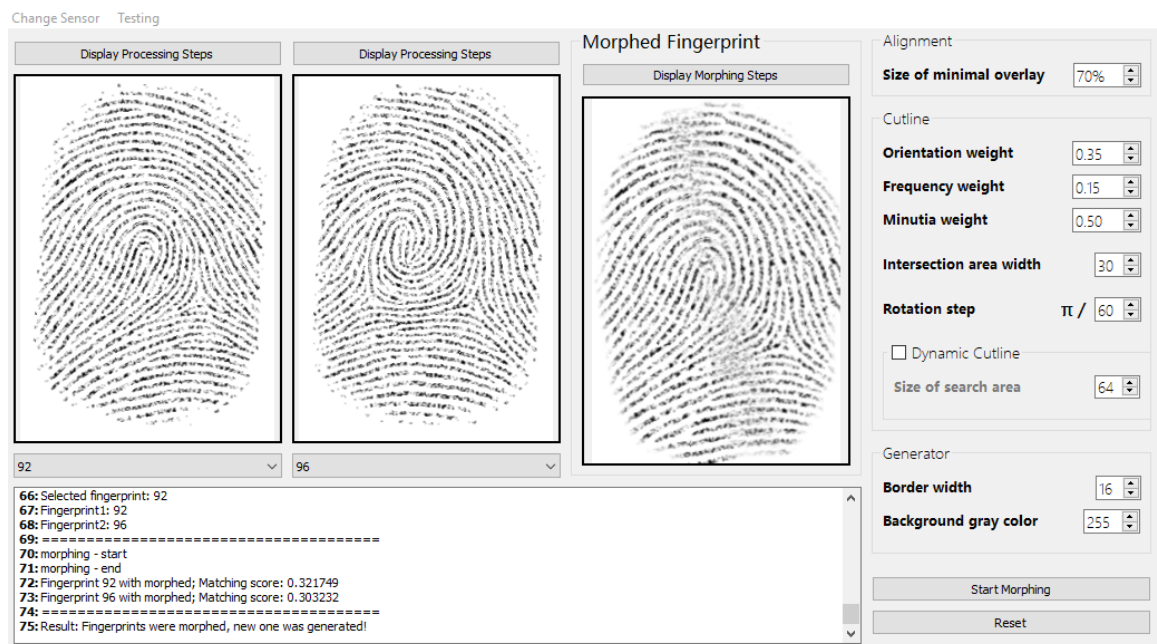
Menu „Testing“ je určené k hromadnému testovaniu odtlačkov, o krého priebehu je zodpovedná trieda *TestCase*. *TestCase* prijíma signál a na základe zvoleného senzora spustí zvolený typ testov. Výsledné obrázky ukladá do zložky a ohodnotenie odtlačkov do textového súboru.

Významnou triedou aplikácie je trieda *OpenCVToQtConverter* schopná previesť dáta z OpenCV do Qt formátu a upraviť škálu farieb tak, aby boli obrázky zobraziteľné v Qt komponentoch. Mínusom GUI nástroja je chýbajúca podpora na multivláknové spracovanie,

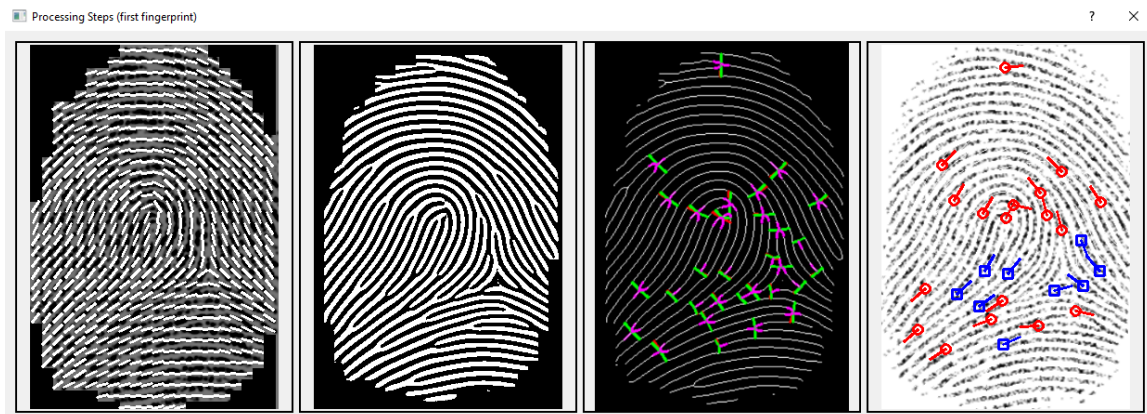
čiže je možné súčasne otvoriť len jedno reagujúce okno. Diagram tried pre popisovanú implementáciu je možné vidieť na obrázku 6.6, detail GUI aplikácie je možné vidieť na obrázku 6.7, rozkliknuté okno krokov spracovávaní na obrázku 6.8 a rozkliknuté okno krokov morfovania na obrázku 6.9.



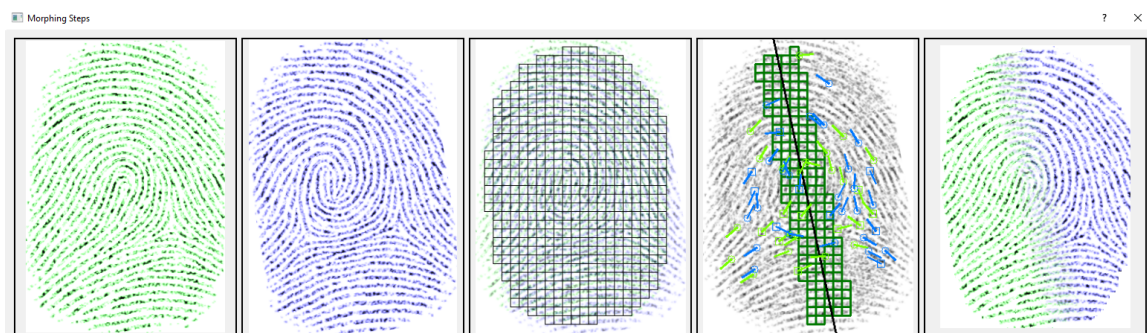
Obrázok 6.6. Diagram tried demonštračnej aplikácie.



Obrázok 6.7. GUI aplikácia určená k demonštrácii morfovania odtlačkov.



Obrázok 6.8. Okno s krokmi extrakcie informácií z odtlačku.



Obrázok 6.9. Okno s postupom morfovania dvoch odtlačkov.

Kapitola 7

Testovanie

Táto kapitola sa zaoberá testovaním implementovanej aplikácie a balíčku na rozpoznanie odtlačku prsta. Testovanie prebehlo prostredníctvom spracovania databázy syntetických a reálnych odtlačkov prstov, ktorá sa skladá celkom z 1679 odtlačkov. Z nich je 950 reálnych odtlačkov, 550 odtlačkov bolo vygenerovaných pomocou nástroja Anguli¹ a 160 odtlačkov nástrojom SFinGe². Priebeh testovania bol rozdelený na 2 fázy:

- **1. fáza** - testovanie balíčku na extrakciu informácií z odtlačku (testy segmentácie odtlačku, testy na získavanie lokálnych orientácií odtlačku, testy vylepšovania kvality odtlačku a testy získania markantov odtlačku).
- **2. fáza** - testovanie morfovania a následnej overiteľnosti morfovaného odtlačku voči obom pôvodným.

7.1 1. fáza - testovanie extrakcie informácií z odtlačku

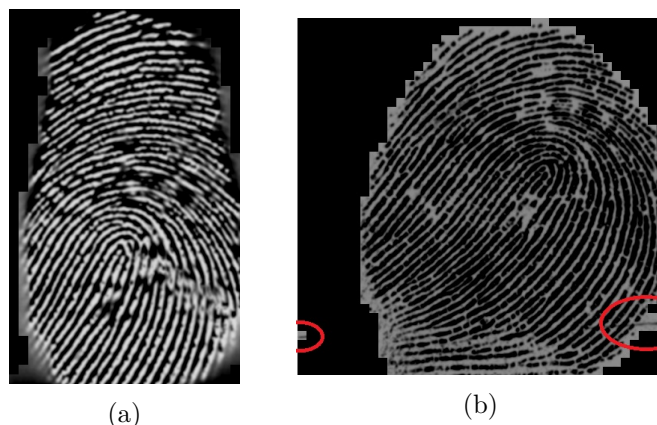
Keďže extrakcia informácií z odtlačku nebola predmetom témy práce, ale bola doimplementovaná ako rozšírenie, je primárne nastavené na kvalitné odtlačky bez významných poškodení. Testovanie však ukázalo pozitívne výsledky aj pri mierne poškodených odtlačkoch s jazvami či odtlačkoch s vysokou prítomnosťou šumu. Dôraz v testovaní sa kládol na segmentáciu odtlačku, získavanie lokálnych orientácií, vylepšenie kvality a identifikácia markantov 2 typov (ukončenie a rozdvojenie). Pre proces extrakcie informácií z odtlačku bola zvolená veľkosť spracovávaného bloku pre lokálne orientácie a frekvencie 12×12 (kapitola 3.1) a veľkosť orientovaného okna frekvencií 30×12 (kapitola 3.2).

7.1.1 Segmentácia

Z testov vyplýva, že segmentácia funguje správne, ako pri syntetických, tak aj pri reálnych, v prípade, že sa v okolí odtlačku nenachádzajú žiadne rušivé faktory (napr. nečistoty), alebo v prípade nekvalitných odtlačkov, splynutie línií, či prítomnosť iných poškodení vyvoláva nesprávnu identifikáciu oblasti odtlačku. Problém by bolo možné vyriešiť implementáciou algoritmu získavania masky poškodených oblastí popisovaného v [21]. Správne vykonanú segmentáciu je možné vidieť na obrázku 7.1 (a) a nesprávnu za prítomnosti rušivých faktorov na obrázku 7.1 (b).

¹<https://dsl.cds.iisc.ac.in/projects/Anguli/userguide.html>

²<http://biolab.csr.unibo.it/research.asp?organize=Activities&select=&selObj=12&pathSubj=111%7C%7C12&>

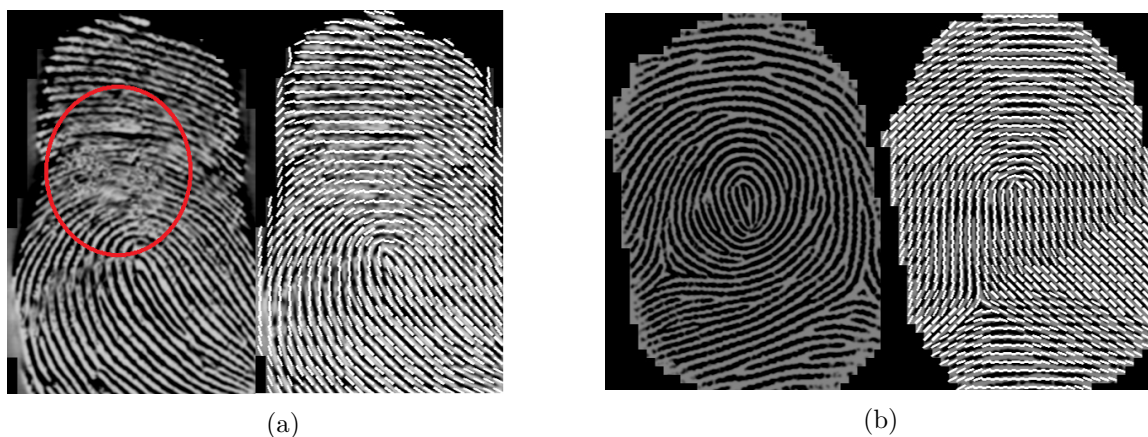


Obrázok 7.1. (a) Ukážka správnej segmentácie odtlačku, (b) ukážka nesprávnej segmentácie odtlačku za prítomnosti rušivých faktorov.

7.1.2 Lokálne orientácie

Získavanie lokálnych orientácií z odtlačkov vo všetkých prípadoch prebieha bez významných nezrovnalostí. Pozitívny efekt má využitie Gaussovho filtra na získané orientácie (obrázok 7.2 (b)), ktorý ich vyhladzuje a zabraňuje tak výraznému vplyvu poškodených oblastí na výsledné orientácie. Odhad lokálnych orientácií z kvalitného odtlačku je možné vidieť na obrázku 7.2 (a).

Vhodným rozšírením tejto funkcionality by bolo uchovávanie informácie o pravdivosti lokálnej orientácie na základe poškodenia oblasti, v ktorej bola odhadnutá. Algoritmus je popísaný v [6] a jeho implementácia by mala pozitívny efekt aj na zarovnanie odtlačkov pri morfovaní, ktoré je prispôbené na zakomponovanie tejto informácie do priebehu vyhodnotenia znížením váhy vplyvu orientácie na výsledné vyhodnotenie. Pravdivosť odhadnutej lokálnej orientácie by sa do rovnice 14 vnášala prostredníctvom r hodnôt, ktoré budú v rozsahu $\langle 0, 1 \rangle$, kde 0 označuje oblasť mimo odtlačku a hodnoty blížiacie sa k 1 pravdivosť odhadnutej orientácie (1 znamená orientácia odhadnutá v kvalitnej oblasti odtlačku). Takto vážené orientácie by ovplyvnili výsledné ohodnotenie podobnosti, pretože vplyv orientácií z nekvalitných oblastí sa rapídne zníži nízkou hodnotou r .



Obrázok 7.2. (a) Ukážka získavania orientácií z kvalitného odtlačku, (b) Ukážka získavanie orientácií v poškodených oblastiach.

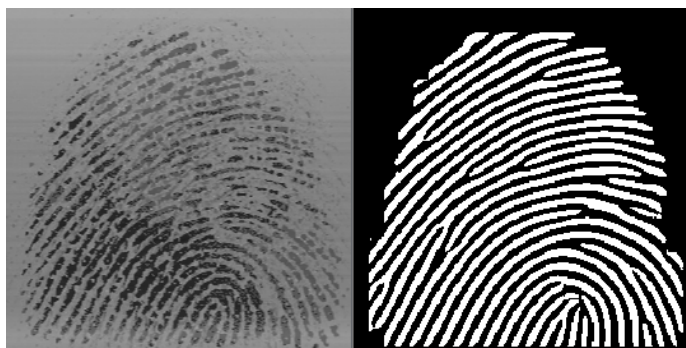
7.1.3 Vylepšenie odtlačku

Z testov je pozorovateľných niekoľko problémov pri vylepšovaní kvality odtlačkov. Prvým je, že v oblastiach singulárnych bodov (ako pri reálnych, tak aj pri syntetických) niekedy dochádza k zlému dokresleniu línií, čo následne má vplyv na nesprávnu identifikáciu markantov. Problémom je odhad orientácií a následne frekvencií v týchto miestach, pretože dochádza k odvodeniu sínusoidy z línií, ktoré nie sú kolmé na odhadnuté orientované okno (obrázok 7.3). Riešením je implementácia získavania frekvencií pomocou zakriveného orientovaného okna opísaná v [31].



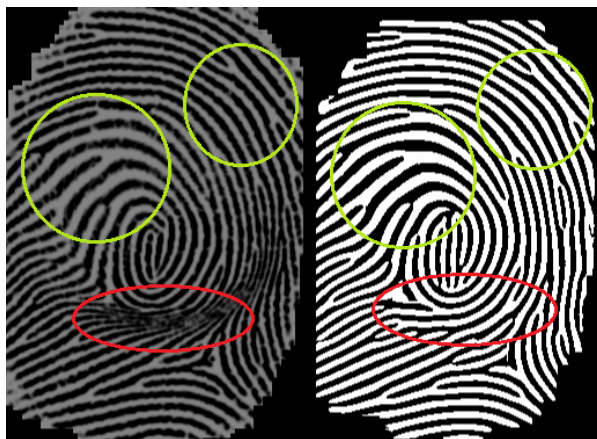
Obrázok 7.3. Ukážka rozpojenia línií pri vylepšovaní singulárnych bodov.

Ďalším problém je občasné odpojenie línie v mieste, kde sa nachádza markant typu rozdvojenie alebo prepojenie markantu typu ukončenie s líniou v prípade, že sa susedná línia nachádza príliš blízko. Na druhú stranu je z testov pozorovateľné, že v prípade prítomnosti menších jaziev, miernych poškodení, či zlej kvality línií, sú línie správne dokreslené a prerušenia vyplnené vďaka interpolácií frekvencií a vplyvu Gaussovho filtra na ich vyhladenie (obrázok 7.4).



Obrázok 7.4. Ukážka rekonštrukcie línií nekvalitného odtlačku.

Napriek tomu, že bol doimplementovaný odhad priemernej vzdialenosti medzi líniami (viď kapitola 6.1.2), v niektorých prípadoch stále dochádza k rušivému vylepšeniu, dokreslovaniu falošných línií, či prekresleniu viaceru línií za jednu. Jedná sa o veľmi špecifické prípady a prevažne o syntetické odtlačky. Ako je vidieť na obrázku 7.5 problémy spôsobuje súčasný výskyt širokých línií a príliš tenkých línií. Dôvodom je odhad priemernej vzdialenosti niekde medzi potrebnými k vylepšeniu týchto častí odtlačkov. Problémom je aj zle viditeľná sínusoida (viď kapitola 3.2), v označenej oblasti červenou farbou, a tým pádom dôjde k nesprávnemu odhadu frekvencie. Na druhú stranu, ako je vidieť na obrázku 7.5, rozšírenie regionálnej masky z kapitoly 6.1.2 má pozitívny efekt pri vylepšovaní nepomerne širokej línie vzhľadom na odtlačok, čo je možné vidieť v oblastiach označených zelenou farbou.



Obrázok 7.5. Vylepšeniu odtlačku za pomoci regionálnej masky. Zelené označenie znázorňuje pozitívny efekt vylepšovania nepomerne širokých línií, červené označenie znázorňuje kritické miesto, kde stále dochádza k nesprávnemu vylepšeniu.

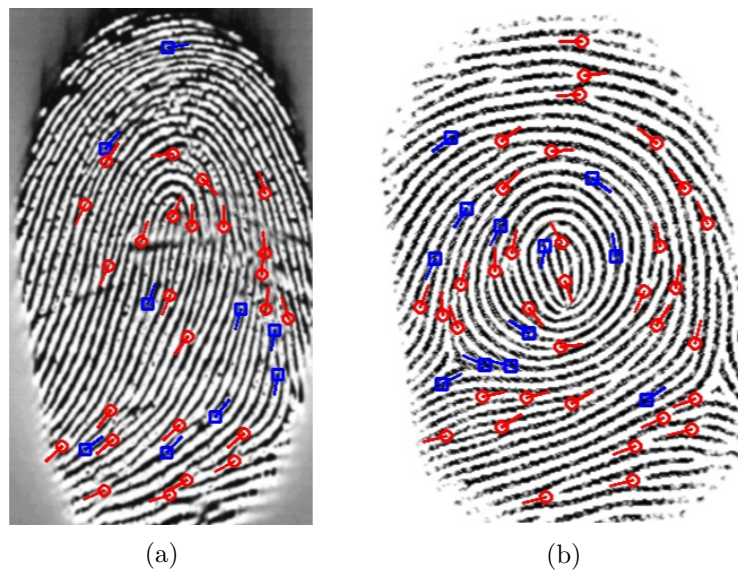
V ostatných prípadoch, kedy je odtlačok kvalitný, papilárne línie sú dobre viditeľné a nenachádzajú sa na ňom žiadne poškodenia, vylepšenie odtlačku prebieha spoľahlivo. Popríklad upravením veľkosti spracovávaného bloku sú získané adekvátne výsledky.

7.1.4 Identifikácia markantov

Identifikácia markantov nie je závislá na tom, či je odtlačok syntetický alebo reálny, ale na spôsobe vylepšenia kvality odtlačku, z čoho vyplýva, že identifikácia markantov prebieha spoľahlivo na správne vylepšených odtlačkoch. Na základe testov nedochádza k nesprávnemu označeniu polohy markantu na vylepšených odtlačkoch. Výnimkou sú syntetické odtlačky, ktoré majú široké priestory medzi líniami v miestach zakončení. Gáborov filter, kvôli vyhladzovaniu frekvencií Gaussovým filtrom, líniu dokreslí a markant je tým pádom označený o niečo ďalej, ako sa nachádza reálne zakončenie línie v odtlačku (obrázok 7.6). Falošné markanty vytvorené stenčovaním línií, či rekonštrukciou poškodených oblastí (drobné výbežky, rebríkové štruktúry...), sú vo väčšine prípadov správne identifikované a vhodne odstránené, a na odtlačkoch sú ponechané len pravé. Občas však dochádza k vytvoreniu falošného markantu v blízkosti pravého, čo spôsobí na základe štatistických pravidiel (z kapitoly 3.4.5) odstránenie oboch markantov, falošného aj pravého. Problém popisovaný s vylepšením singulárnych bodov v kapitole 7.1.3, očakávateľne tiež vyvoláva problém s identifikáciou markantov. Hoci je markant identifikovaný správne, nesprávnym vylepšením sa s vysokou pravdepodobnosťou vytvoria aj ďalšie falošné a následne štatistickými pravidlami sú všetky aj s pravým odstránené. Na obrázku 7.7 je znázornený odhad markantov v reálnom a syntetickom odtlačku.



Obrázok 7.6. Dokreslenie línií, kvôli veľkým medzerám v syntetickom odtlačku



Obrázok 7.7. (a) Ukážka získavania markantov z reálneho odtlačku, (b) Ukážka získavania markantov zo syntetického odtlačku.

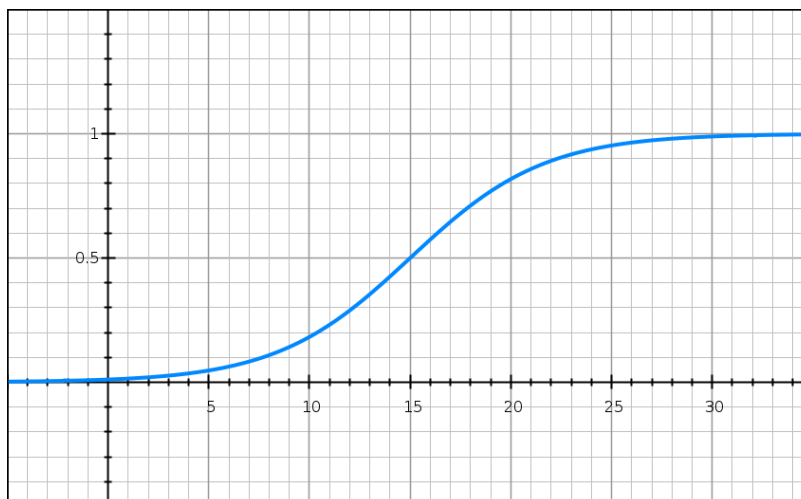
7.2 2. fáza - morfovanie odtlačkov

Testovanie prebiehalo na syntetických a reálnych odtlačkoch. Z testovacej databázy bolo vygenerovaných 2186 morfovaných syntetických odtlačkov a 2832 morfovaných reálnych odtlačkov. Dokopy teda bolo vygenerovaných 5018 morfovaných odtlačkov. K tomu každý morfovaný odtlačok bol ohodnotený odpovedajúcim skóre voči obom pôvodným. Pre morfované syntetické odtlačky teda bolo získaných 4373 ohodnotení a pre morfované reálne 5665 ohodnotení, z ktorých bude vyhodnotená štatistika overiteľnosti morfovaného odtlačku voči pôvodnému.

Zarovnanie odtlačkov z kapitoly 5.6 bolo podmienené aspoň 70% prekrytím. Pre vyhodnotenie ideálnej línie rezu v rovnici 17 boli zvolené váhy na podobnosť orientácií $S_o = 0,35$, popodobnosť frekvencií $S_v = 0,15$ a váha ohodnotenia pre výskyt markantov na odtlačku $S_m = 0,5$. Bola nastavená vyššia váha na podobnosť orientácií voči podobnosti frekvencií, pretože v orientáciách na odtlačkoch sú zásadné odlišnosti aj po nájdení najlepšieho zarovnanania, zatiaľ čo rozdiely vo frekvenciách na odtlačkoch v rámci jednotlivých senzorov nie sú príliš odlišné. Polovicu váhy ohodnotenia tvorí ohodnotenie počtu markantov na odtlačkoch, a to z dôvodu, že okrem nájdenia najlepšieho miesta podobnosti línií je aj dôležitým faktorom morfovania množstvo markantov na jednotlivých stranách, aby výsledný odtlačok získal dvojitú identitu, v opačnom prípade by morfovanie nemalo zmysel.

Parametre sigmoidnej funkcie 26 na ohodnotenie množstva markantov na jednej zo strán morfovaných odtlačkov boli nastavené na $\mu = 15$ a $\tau = \frac{3}{10}$. Graf ohodnotenia markantov je možné vidieť na obrázku 7.8.

V tejto kapitole budú podrobne rozobrané výsledky morfovania vzhľadom na realističnosť morfovaného odtlačku a výsledky ohodnotení dvojitých identít morfovaných odtlačkov, ktoré boli získané prozdredníctvom *Minutia Cylinder-Code SDK* (viď kapitola 6.3).



Obrázok 7.8. Graf ohodnotenia sigmoidnej funkcie 26 s parametrami $\mu = 15$ a $\tau = \frac{3}{10}$, kde vodorovná os predstavuje počet markantov a horizontálna ohodnotenie ich početnosti.

7.2.1 Vzhľad morfovaných odtlačkov

Na základe výsledkov testov výsledný vzhľad morfovaných odtlačkov závisí od množstva faktorov, ktorými sú pozície a typy singulárnych bodov (kapitola 2.2.2) na odtlačkoch, triedy odtlačkov, či podobnosť celkového vzhľadu odtlačkov (napríklad morfovanie odtlačkov získaných z iných senzorov alebo rozdielna prítomnosť šumu produkuje výsledok s veľmi viditeľným miestom, v ktorom prebehlo morfovanie).

Vo všetkých ostatných prípadoch morfovanie metódou rezom dokáže vygenerovať odtlačok s dvojitou identitou, kde nie je vôbec rozoznateľné miesto morfovania, alebo sú vygenerované mierne artefakty, ktoré v prípade reálnych odtlačkov nie sú identifikovateľné ako produkty morfovacej metódy. V prípade syntetických odtlačkov, kde sa obrázok odtlačku nachádza na bielom pozadí, sú vo viacerých prípadoch pozostatky morfovania zreteľnejšie. Dochádza pri nich totiž k produkcii šumu inej farby, než je farba šumu syntetického odtlačku. Ukážky morfovaných odtlačkov je možné vidieť v príkladoch dobre zvládnutého morfovania na konci tejto podkapitoly na obrázku 7.18.

Podobnosť vzhľadu odtlačkov

Najväčší vplyv na kvalitu morfovania má podobnosť vzhľadu odtlačkov. Keďže cieľom práce je vytvoriť odtlačok s dvojitou identitou čo najviac podobný reálnemu, sú využívané pôvodné časti odtlačkov, na ktoré je aplikovaný vyvážený prechod medzi nimi. Morfovanie syntetických odtlačkov s rozdielnym množstvom šumu spôsobuje veľmi viditeľný prechod v ideálnej línii rezu pre pôvodné odtlačky (ako je vidieť na obrázku 7.9).

Hromadné testovanie na odtlačkoch z rôznych senzorov neprebíhalo, pretože nevhodné výsledky boli očakávané a vzhľadom na zvolenú metódu zrejmé. Celkový vzhľad odtlačkov je úplne odlišný a tým pádom je jasne vidieť, kde morfovanie prebehlo (obrázok 7.10). Tento problém bohužiaľ pri zvolenej morfovacej metóde, za účelom najrealistickejších výsledkov, nie je možné vyriešiť, aby odtlačok vyzeral realisticky. Jednou z možností je odtlačok synteticky vygenerovať [23] z vygenerovanej morfovanej šablóny, za cenu straty reálneho vzhľadu, čo v tomto prípade nie je drahá záležitosť.



Obrázok 7.9. Morfované syntetické odtlačky s rozdielnym šumom.



Obrázok 7.10. Morfované odtlačky získané z rôznych senzorov.

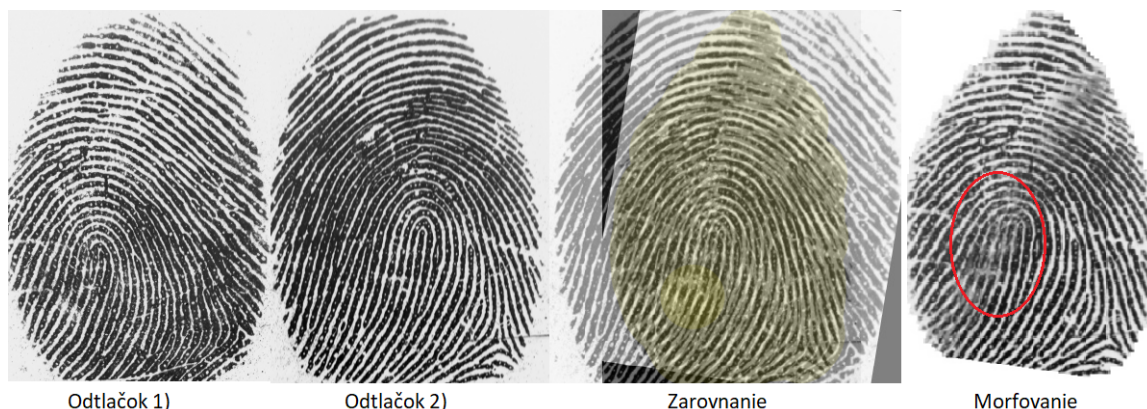
Pozícia a typ singulárnych bodov

Ďalším faktorom kvality morfovania sú singulárne body, ktorých vplyv na morfovanie je možné rozdeliť do 3 skupín:

1. **Pozícia jadra a delty** (ak sa obidve nachádzajú na odtlačku).
2. **Absencia singulárnych bodov na odtlačkoch.**
3. **Protichodné orientácie jadra na odtlačkoch.**

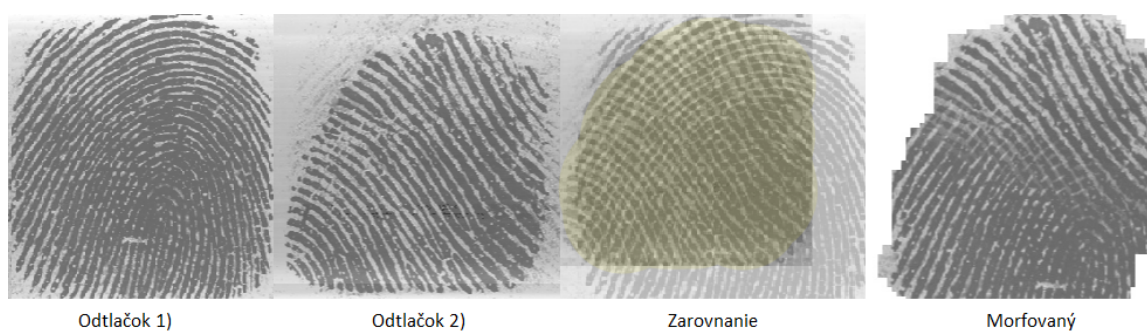
Problém bodu **1** spočíva v rozdielnej vzdialenosti delty od jadra na pôvodných odtlačkoch. Dochádza potom k problematickému zarovnaniu, pretože singulárne body obsahujú príliš rozličné orientácie a kvôli iným polohám na odtlačkoch dôjde k zarovnaniu len voči jednému z nich (vo väčšine prípadov dôjde k zarovnaniu voči delte, pretože ak delty nie sú prekryté, ohodnotenie podobnosti orientácií je rázne znížené, kvôli zhluku rôznych orientácií, ktoré delta obsahuje). Avšak výsledok morfovania pre reálne odtlačky nie je výrazne zlý a na prvý pohľad vyzerá realisticky, dochádza len k vyššiemu počtu artefaktov vytvorených morfovaním v oblasti reznej línie (obrázok 7.11). Syntetické vygenerovanie odtlačku nie je v tomto prípade väčšinou potrebné, pretože artefakty vytvorené morfovaním sú veľmi

podobné šumu a poškodeniam odtlačkov získaných z daných senzorov. V snahe odstrániť vplyv delty na zarovnanie je vhodná úprava rovnice 18. Navrhoval by som ju rozšíriť o váhu zarovnania jadier odtlačkov (ak oba odtlačky jadra obsahujú), čím by sa eliminoval výsledný vzhľad zdvojených jadier, či zdvojených iných útvarov. Úprava by pravdepodobne aj zrýchlila celkový proces vyhľadávania ideálneho zarovnania, pretože v prípade veľkej vzdialenosti jadier by mohlo byť zarovnanie automaticky odmietnuté, bez zložitého procesu vyhodnocovania.



Obrázok 7.11. Odlišné rozmiestnenie singularných bodov. Artefakty spôsobené zlým zarovnaním spôsobené prítomnosťou dvoch singularných bodov v odlišnej vzdialenosti.

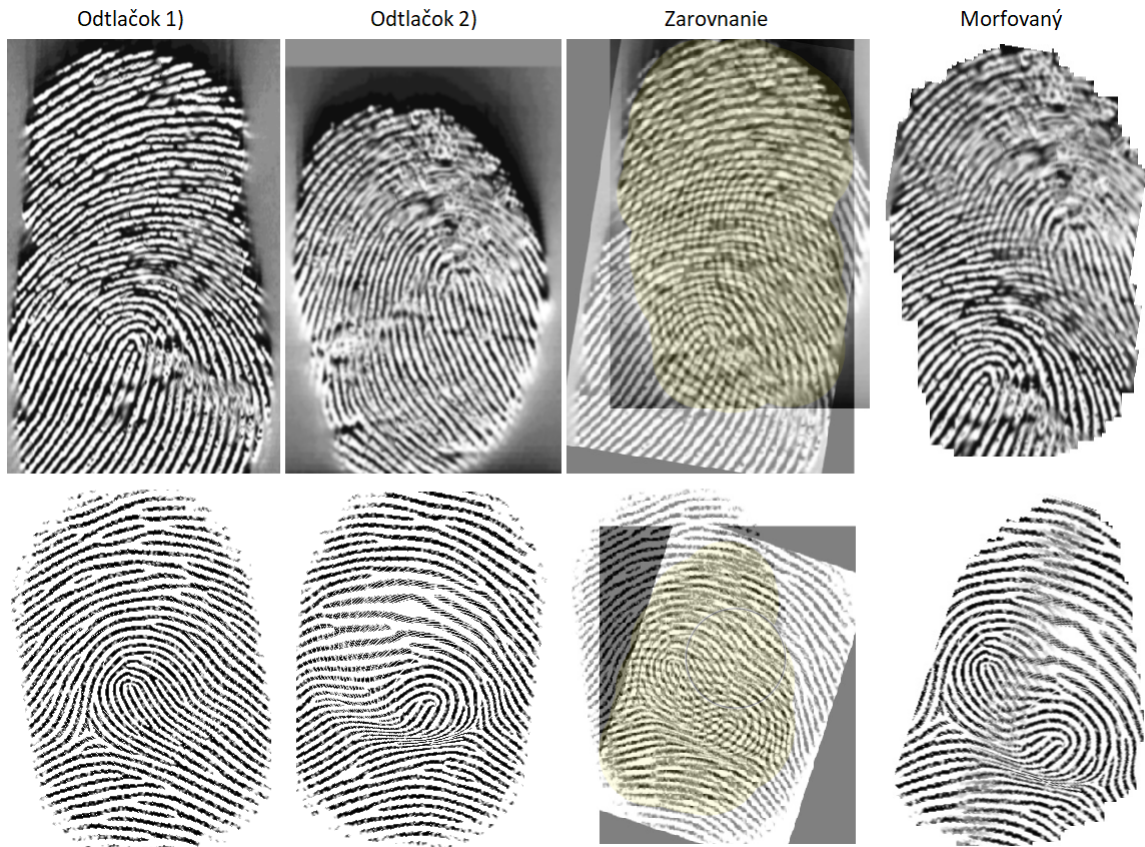
Bod 2 sa týka morfovania odtlačkov ktoré neobsahujú singularne body s odtlačkami, ktoré singularne body obsahujú. Dôvodom problému je absentujúce dostatočné zakryvenie línií pre odtlačky bez singularných bodov, aby mohli byť ideálne prepojené a tým pádom dôjde k vytvoreniu viditeľných artefaktov morfovania v oblasti reznej línie. Problém nie je ani riešiteľný vygenerovaním syntetického odtlačku [23], pretože opäť dochádza k neskombinovateľným zmenám orientácií papilárnych línií, ktoré môžu vytvoriť singularny bod na netypickom mieste, čo vedie k nemožnému zaradeniu odtlačku do definovaných tried (viď obrázok 7.12).



Obrázok 7.12. Morfovanie odtlačkov, kde jeden neobsahuje singularny bod.

V bode 3 dochádza k problematickému zarovnaní a následne aj morfovaniu ľavej slučky s pravou a naopak. Dôvodom je úplná odlišnosť orientácií v odtlačku, čo produkuje zvláštne morfované odtlačky s 2 jadrami, ktoré nazapadajú ani do jednej z definovaných tried odtlačkov a vo výstupe je množstvo viditeľných artefaktov spôsobených zlým napojením línií (obrázok 7.13). Tento problém však nie je riešiteľný pre zvolenú metódu rezom. Syntetické

vygenerovanie [23] morfovaného odtlačku vyprodukuje taktiež zvláštny odtlačok, ktorý nezapadá do definovaných tried odtlačkov.



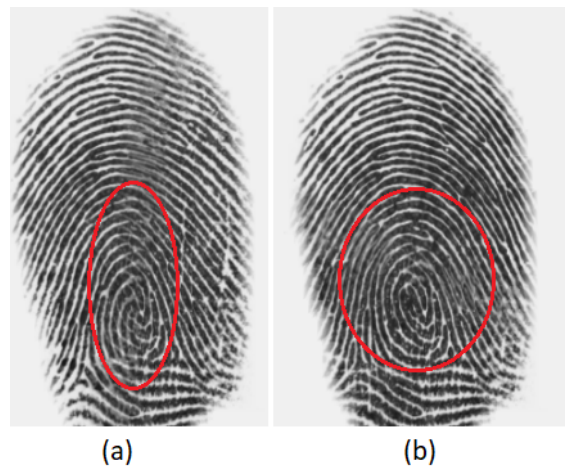
Obrázok 7.13. Protichodné orientácie jadier, definujúce nemorfovateľné triedy pravá slučka s ľavou a opačne.

Vplyv dynamickeho odhadu reznej línie na výsledný vzhľad

Odhad dynamickej línie rezu (rozšírenie z kapitoly 6.2.2) priaznivo vplyva na výsledný vzhľad. Z vyššie popisovaných problémov dokáže vo veľa prípadoch zamedziť tvorbe artefaktov. Jej hlavná myšlienka vo vyhnutí sa odhadovania z ťažiska morfovanej oblasti má pozitívny efekt na zamedzenie vplyvov singulárnych bodov na rez. Ako je vidieť na obrázku 7.14 (a) došlo k vytvoreniu nedefinovanej triedy, vďaka čomu je jasne pozorovateľné, že nejde o typický odtlačok. Aplikáciou dynamickeho odhadu v okolí ťažiska je problém odstránený (obrázok 7.14 (b)) a je vytvorený odtlačok s triedou závit. Odhad dynamickej línie v mnohých prípadoch rieši aj zlé zarovnanie odtlačkov, kedy dochádza k popisovaným problémom o zdvojení singulárnych bodov v mieste morfovania (obrázok 7.15).



Obrázok 7.14. (a) Morfovaný odtlačok s netypickou triedou, (b) korekcia morfovania pomocou dynamickej línie.

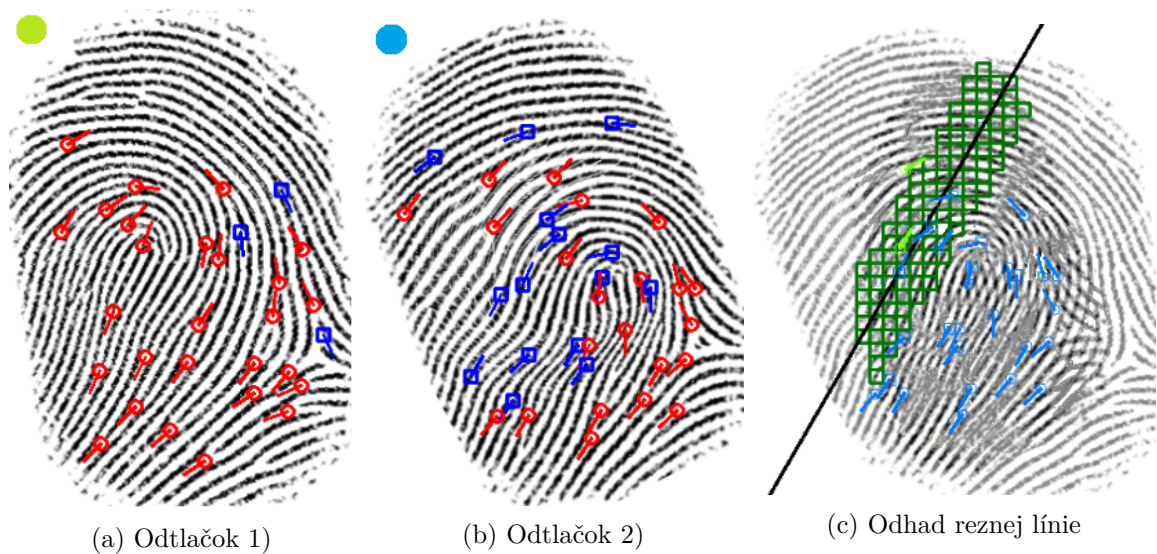


Obrázok 7.15. (a) Morfovaný odtlačok so zdvojeným jadrom, (b) korekcia morfovania pomocou dynamickej línie.

Implementácia tohto rozšírenia odhalila zásadný problém s ohodnotením markantov na jednotlivých stranách morfovanej oblasti. Problémom je práve spôsob ohodnotenia výskytu markantov na jednotlivých stranách morfovanej oblasti rovnice 23. Autori práce [10], pravdepodobne počítajú s tým, že je rezná línia odhadovaná z ťažiska morfovanej oblasti a nemôže nastať situácia, že na jednej zo strán nebude príliš veľký nedostatok markantov. Ak na jednej zo strán je nedostatok markantov, vyhodnotenie má nepravdivé výsledky. Problém sa dá ukázať na jednoduchom príklade. Máme jeden odtlačok s 30 markantmi (obrázok 7.16 (a)) a druhý s 37 (obrázok 7.16 (b)). Rezná línia rozdeľuje odtlačok na dve strany, kde na jednej z nich sú len 2 (markanty odtlačku na obrázku 7.16 (a)) a na druhej 25 (markanty odtlačku na obrázku 7.16 (b)). Pre 2 markanty je výsledná hodnota sigmoidnej funkcie z rovnice 26 = 0,0198 a pre hodnotu 25 je ohodnotenie 0,9526. Použitím získaných hodnôt v rovnici 23 dostaneme skóre 0,4862. Keď zameníme strany a spočítame si ohodnotenie z rozdelenia markantov 8 (markanty obrázku 7.16 (b)) a 20 (markanty obrázku 7.16 (a)) získame ohodnotenie sigmoidnou funkciou 0,1090 (8) a 0,8175 (20), z čoho je priemer 0,4633. Pomocou rovnice 22 sú potom zvolené strany s rozdelením markantov 2 a 25. Morfovaný odtlačok s takýmto rozdelením markantov rozhodne nemôže nadobudnúť dve identity, kvôli nedostatku markantov na jednej zo strán, zatiaľ čo by pre odmietnuté rozdelenie nadobudnúť mohol. Zvolená rezná línia obsahuje aj vysokú podobnosť orientácií a frekvencií papilárnych línií, čiže je vytvorený morfovaný odtlačok na základe nesprávneho vyhodnotenia.

Problémom však nie je len výsledný odhad reznej línie, ale aj ostatné odhady, ktoré boli počas morfovania vyhodnocované. Dôvodom je skutočnosť, že aj veľmi silné dvojidentitné šablóny, sú práve kvôli tomuto chybnému vyhodnocovaniu odmietnuté. Napríklad ak by sme mali dva odtlačky s 15 a 30 markantmi a rezná línia by rozdelila kombinácie markantov na 2 a 20, a pre opačné rozdelenie na 13 a 10, prvé rozdelenie nadobudne ohodnotenie 0,42 a druhé 0,265. Na tomto príklade je vidieť spôsob vyhodnocovania rozdielu počtosti markantov na jednotlivých stranách, ktorý prevažuje ohodnotenie sily dvoch identít.

Veľmi jednoduchým riešením problému je určenie minimálnej prahovej hodnoty pre výskyt markantov na jednotlivých stranách, vďaka čomu by boli takéto situácie odmietnuté už pred vyhodnocovaním. Ako komplexnejšie a vhodnejšie riešenie by som navrhoval prepra-



Obrázok 7.16. Zle odhadnutá rezná línia. Zelené a modré označenie pri odtlačkoch (a) a (b) znázorňuje farbu markantov, ktoré dané odtlačky nadobúdajú v odhade reznej línie (c).

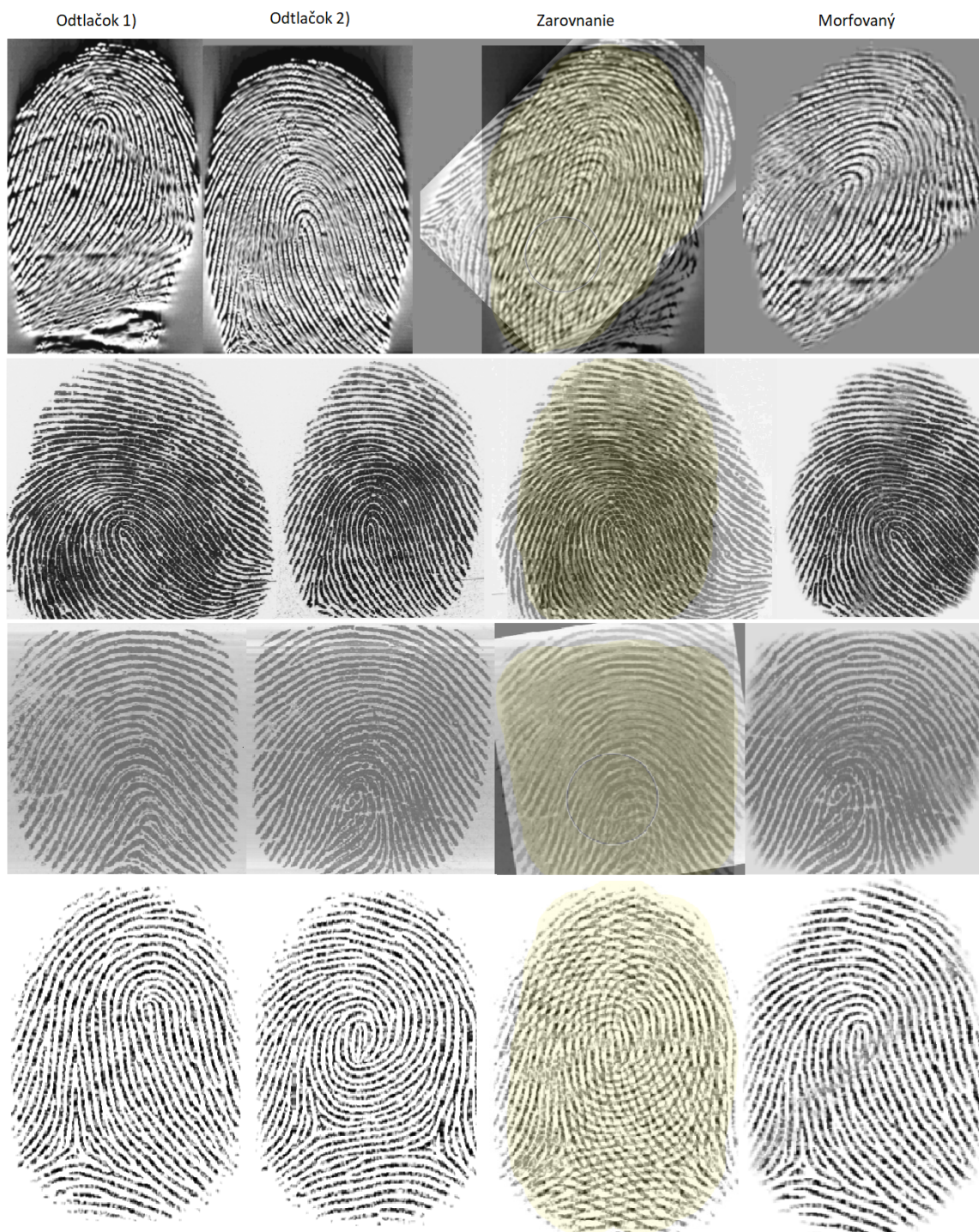
covať celý algoritmus vyhodnocovania markantov a skôr využiť percentuálne ohodnotenie predelených strán, na základe pomeru počtu markantov na jednej strane morfovannej oblasti, k celkovému počtu markantov na danom odtlačku. To znamená, že výsledné ohodnotenie by určoval pomer výskytu markantov prekračujúci určitú percentuálnu prahovú hodnotu, čím sa získa dynamický prah prispôbujúci sa spracovávaným odtlačkom. Nepochádzalo by tak k nemožnosti splnenia podmienky, ktorá naopak existuje v prípade zvolenia pevného prahu. Ak by pomer výskytu markantov na strane morfovannej oblasti neprekročil prah, ohodnotenie tejto kombinácie bude automaticky 0.

Rozmazanie hranatých okrajov

Implementované rozšírenie z kapitoly 6.2.3 rozmazávania okrajov za účelom vyhľadania hranatých okrajov a tým pádom dosiahnutie reálnejšieho vzhľadu morfovaného odtlačku funguje spoľahlivo. Z testov neboli identifikované žiadne problémy a cieľ rozšírenia bol dosiahnutý. Ako je vidieť na obrázku 7.17 rozmazanie okrajov dodá morfovanému odtlačku reálnejší vzhľad, než odtlačok s hranatými okrajmi.



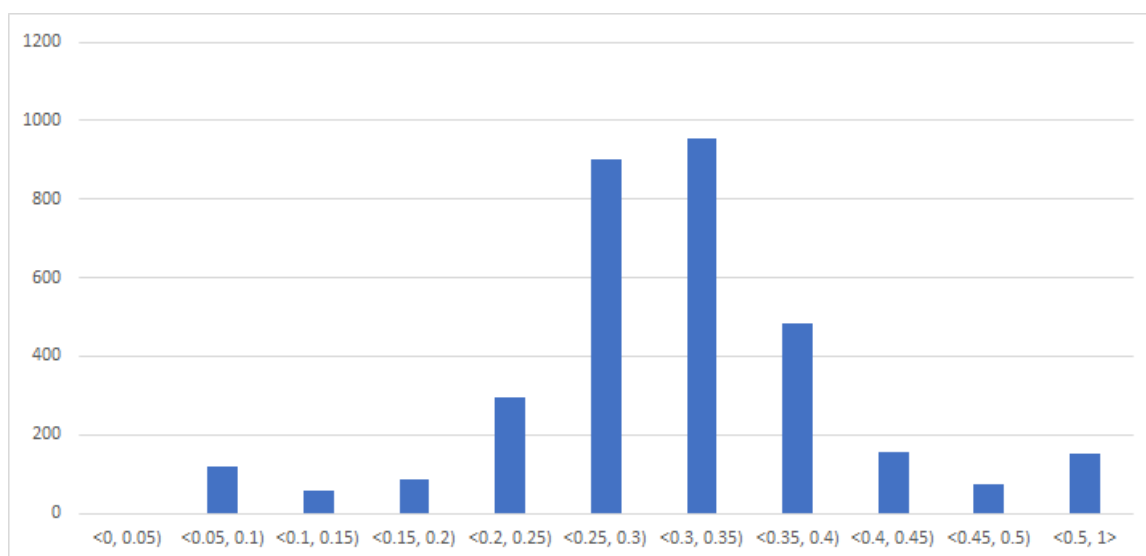
Obrázok 7.17. Ukážka rozmazania okrajov odtlačku.



Obrázok 7.18. Ukážka morfovania odtlačkov, ktoré spĺňajú podmienky pre kvalitné výsledky.

7.2.2 Ohodnotenie dvojitého identít morfovaných odtlačkov

Šanca vygenerovať odtlačok s dvojitou identitou taktiež nie je 100%. Vplyv na výsledok má nedostatočné množstvo markantov nachádzajúcich sa na odtlačku určenom k morfovaniu alebo v prípade dostatočného množstva ich nevhodné rozmiestnenie. Nevhodné rozmiestnenie spôsobuje problematické určenie reznej línie, vytvorenie artefaktov pri morfovaní a nemožnosť vytvorenia odtlačku s dvojitou identitou, kvôli absencii dostatočného množstva markantov na jednej zo strán morfovaného odtlačku. Výsledky uvedené v grafoch v tejto kapitole sú postavené len na morfovaní syntetických odtlačkov, kvôli zamedzeniu negatívneho vplyvu nedostatku markantov zo zle odobraných odtlačkov a zamedzeniu negatívneho vplyvu prítomnosti poškodení na výsledky morfovania. Dáta v grafoch vyplývajú z ohodnotení odtlačkov voči sebe pomocou nástroja *MCC SDK* (kapitola 6.3), ktorý k porovnávaní využíva priamo šablóny markantov, takže pomocou knižnice **Processing** (kapitola 6.1) sú z odtlačkov extrahované a následne použité k porovnaniu.

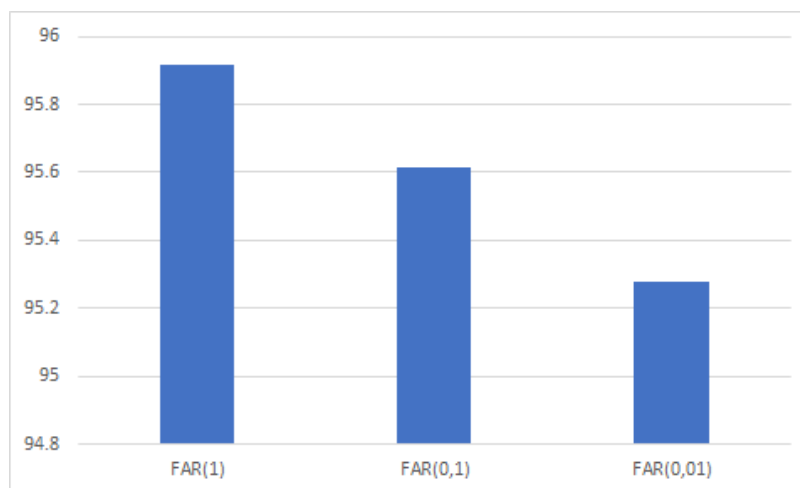


Obrázok 7.19. Graf znázorňujúci ohodnotenie morfovaného odtlačku voči pôvodným. Predstavuje početnosť ohodnotení (vertikálna os) voči odpovedajúcim odtlačkom v intervaloch po 0,5 nadobudnutého skóre verifikácie (horizontálna os). V prípade porovnania dvoch rovnakých odtlačkov nadobudnuté skóre sa pohybuje od 0,65 vyššie. Výsledky boli získané z pôvodnej metódy morfovania bez zásahov rozšírení.

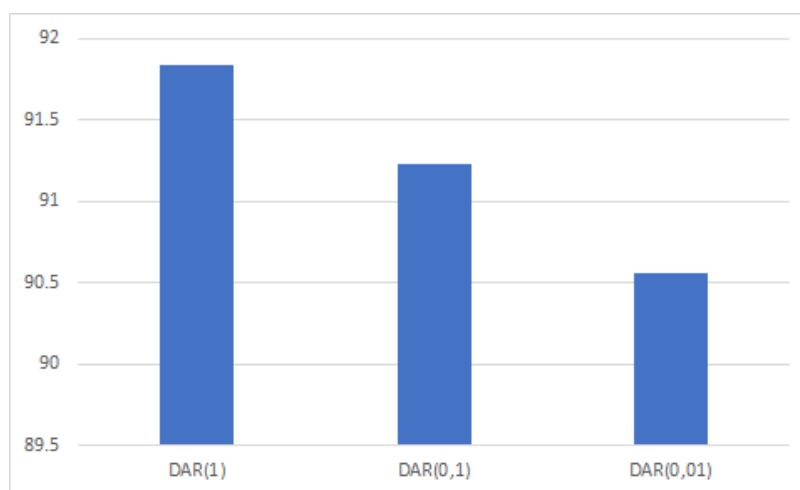
Obrázok 7.19 znázorňuje výsledky morfovania pomocou reznej línie odhadovanej priamo z ťažiska morfovanej oblasti odtlačkov. Hodnoty označujú skóre podobnosti morfovaných odtlačkov voči pôvodným. Výsledky sú celkom priaznivé, avšak neznamená, že výskyt skóre viac ako 0,4 je dobrý, pretože z testov vyplynulo, ak morfovaný odtlačok bol ohodnotený tak vysokým skóre voči jednému z pôvodných odtlačkov, druhý sa nachádzal niekde vo veľmi nízkom skóre podobnosti.

Popisovaný problém je vidieť na obrázkoch 7.20 (a) a 7.20 (b). Obrázok 7.20 (a) ukazuje pomer morfovaných odtlačkov priradených aspoň k jednému z pôvodných na základe mier nesprávneho prijatia *FAR* (kapitola 6.3), zatiaľ čo obrázok 7.20 (b) ukazuje pomer morfovaných odtlačkov priradených zároveň k obom pôvodným, taktiež na základe miery *FAR*. Ako je vidieť napríklad pre *FAR* (1 %), 95,9 % morfovaných odtlačkov bolo ohodnotených dostatočným skóre aspoň voči jednému z pôvodných, zatiaľ čo morfovaný odtlačok

nadobudol dve identity (obsahoval dostatočné skóre podobnosti pre oba pôvodné) v 91,7 % prípadoch. Spôsobuje to zlé vyhodnocovanie ideálnej reznej línie pre markanty, popisované v kapitole 7.2.1. Ideálne ohodnotenie pre morfovaný odtlačok je teda v intervale $\langle 0, 25; 0, 35 \rangle$ (skóre vodorovnej osi na obrázku 7.19), kde výsledky grafu dosahujú najvyšší výskyt ohodnotení. Ohodnotenie morfovaného odtlačku, kedy sa ešte dá povedať, že nadobúda 2 identity je v intervale $\langle 0, 15; 0, 45 \rangle$, ale sú v ňom zahrnuté aj veľmi okrajové hodnotenia.



(a) Rozpoznanie aspoň jednej identity morfovaných odtlačkov v %.

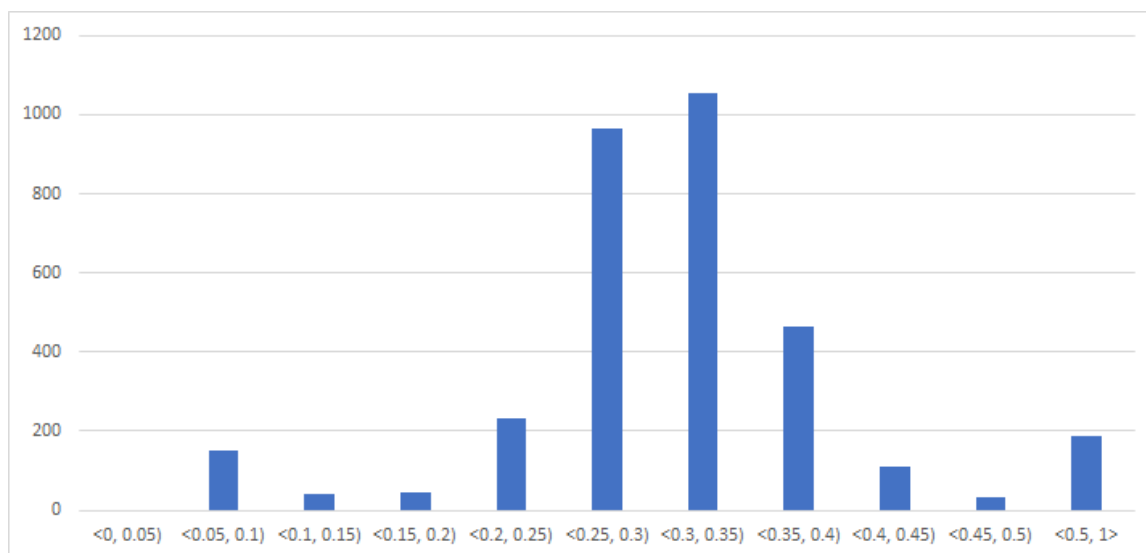


(b) Rozpoznanie oboch identít morfovaných odtlačkov v % (DAR metrika je rozpoznanie dvoch identít na základe FAR metriky).

Obrázok 7.20. Grafy pre vyhodnotenie priradení k identitám podľa FAR. Vertikálna os predstavuje početnosť v percentách a horizontálne vyhodnotenie na základe FAR metriky (viď kapitola 6.3).

Druhý graf znázorňuje vyhodnotenie doimplementovaného rozšírenia dynamického vyhľadávania reznej línie z kapitoly 6.2.2. Ako je vidieť na obrázku 7.21, dynamická línia zároveň zlepšila skóre podobnosti morfovaného odtlačku voči pôvodným a zároveň zhoršila. Zlepšila v zmysle potlačenia viac ohodnotení do rozsahu skóre $\langle 0, 25; 0, 35 \rangle$, kedy obe identity odtlačku nadobúdajú vyrovnanú silu podobnosti. No dynamická línia aj navýšila

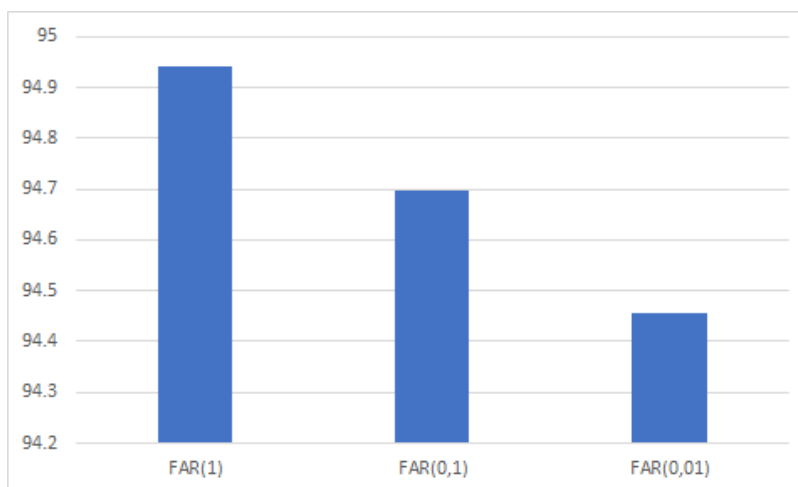
počty okrajových prípadov, t. j. situácie kedy morfovaný odtlačok nadobúda nevyrovnané pomery markantov z pôvodných odtlačkov. Dôvodom sú pokusy vyhľadávania optimálnej línie na viacerých miestach, než v ťažisku. Častejšie tak dôjde k nesprávnemu ohodnoteniu markantov na stranách morfovej oblasti (odhalený problém popísaný v kapitole 7.2.1), čiže sa aj navyšuje šanca kombinácie nesprávneho ohodnotenia markantov s vysokou podobnosťou lokálnych orientácií (kapitola 3.1) a frekvencií (kapitola 3.2) papilárnych línií. Prejav zhoršenia výsledkov je najmä vidieť na obrázkoch 7.22 (a) a 7.22 (b), kde došlo o pár percent k zníženiu skóre podobnosti, čiže nastalo menej priradení morfovaných odtlačkov k pôvodným. Na druhú stranu je však pri porovnaní obrázku 7.21 s 7.19 pozorovateľné, že svoj cieľ dynamická línia splnila. Aj keď bolo rozšírenie dynamickej reznej línie doimplementované za účelom zlepšenia výzoru morfovania, efektívna bola zo štatistického hľadiska, aj vo vylepšení ohodnotenia podobnosti a potlačila početnosť výskytu ohodnotení do ideálnych hodnôt pre morfovanie v rozsahu $(0, 25; 0, 35)$, za cenu straty niekoľko dvojitéch identít (častejšie došlo k chybe vyhodnocovania markantov).



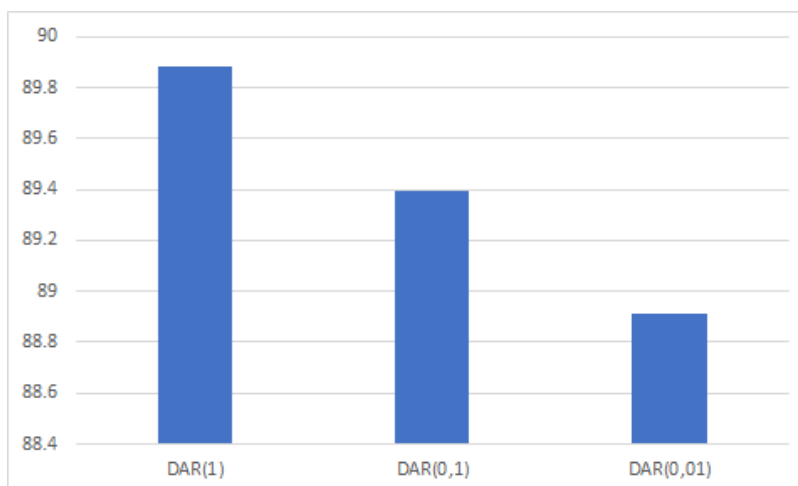
Obrázok 7.21. Graf znázorňujúci ohodnotenie morfovaného odtlačku voči pôvodným. Predstavuje početnosť ohodnotení (vertikálna os) voči odpovedajúcim odtlačkom v intervaloch po 0,5 nadobudnutého skóre verifikácie (horizontálna os). V prípade porovnania dvoch rovnakých odtlačkov nadobudnuté skóre sa pohybuje od 0,65 vyššie. Výsledky boli získané pomocou rozšírenia dynamickej reznej línie z kapitoly 6.2.2.

Posledným bodom, na ktorý je veľmi dôležité upozorniť je fakt, že tieto štatistické výsledky o nadobudnutí dvoch identít odtlačku metódou rezu (kapitola 4), neznamenajú reálnu možnosť s úspešnosťou presahujúcou 90 % vytvoriť z dvoch odtlačkov morfovaný. Ani úpravou problému pri vyhodnocovaní (popisovaný v kapitole 7.2.1), kedy sa pravdepodobne eliminujú výsledky len s jednou identitou, sa vždy morfovaný odtlačok metódou nevytvorí, aj keď dve identity nadobudne v každom prípade. Dôvodom je skutočnosť, že odtlačok nadobúdajúci dve identity nepôsobí pre ľudské oko alebo detektory živosti [32] ako pravý. Čiže hoci je podmienka morfovania o priradení k obom kľúčová, výsledný odtlačok musí v skutočnosti mať aj realistický vzhľad, aby mohol byť prehlásený za úspešne zmorfovaný. Úspešnosť teda klesne asi na 60 % kvôli problémom výsledného vzhľadu a podmienkam,

ktoré je potrebné splniť pre realistický výzor morfovaného odtlačku, popisovaných v kapitole 7.2.1.



(a) Rozpoznanie aspoň jednej identity morfovaných odtlačkov v %.



(b) Rozpoznanie oboch identít morfovaných odtlačkov v % (DAR metrika je rozpoznanie dvoch identít na základe FAR metriky).

Obrázok 7.22. Grafy pre vyhodnotenie priradení k identitám podľa FAR. Vertikálna os predstavuje početnosť v percentách a horizontálne vyhodnotenie na základe FAR metriky (viď kapitola 6.3).

Kapitola 8

Záver

Cieľom práce bol návrh algoritmu pre spojenie dvoch odtlačkov dohromady s čo najuveriteľnejšou hranou prechodu. K dosiahnutiu cieľa práce bolo okrem naštudovania morfovacej metódy rezom, potrebné sa zoznámiť s pohľadom biometrie na odtlačok prsta a s celým procesom základného spracovávanía odtlačkov prstov, t. j. extrakcia informácií (lokálne orientácie, lokálne frekvencie a markanty) a zoznámiť sa s princípmi a metrikami opätovného overenia dvoch odtlačkov voči sebe na základe markantov. Extrakcia informácií z odtlačku a morfovacia metóda rezom bola implementovaná algoritmami popísanými v tretej kapitole, bez využitia knižníc alebo nástrojov, okrem dátových štruktúr knižnice OpenCV. Implementácia taktiež zahŕňala aj vylepšenie kvality odtlačku pred extrakciou markantov, keďže bolo mojim zámerom vykonať morfovanie aj na reálnych odtlačkoch alebo syntetických odtlačkoch s prítomnosťou šumu. V práci je tiež popísaný problém silnej parametrickej závislosti metódy vylepšovania kvality, k čomu bolo doimplementované rozšírenie na zautomatizovanie výberu správnej konfigurácie vylepšovania kvality.

Zvolená metóda morfovania bola podrobne naštudovaná a rozobraná. V práci sa tiež nachádzajú aj dve rozšírenia a to úprava vyhľadávania reznej línie zo statickej pozície na dynamickú, t. j. vyhľadanie línie vo viacerých miestach, a rozmazanie okrajov morfovaného odtlačku. Okrem toho sa v práci nachádzajú aj rôzne návrhy na vyriešenie problémov, na ktoré som narazil pri testovaní, ako napríklad vyvarovanie sa nevhodnému zarovnaniu voči singulárnym bodom odtlačkov, či pri vyhľadávaní ideálneho zarovnania zakomponovať k lokálnej orientácii váhu kvality odtlačku v mieste, v ktorom bola odhadnutá. Počas testovania bol odhalený zásadný problém pri vyhodnocovaní optimálnej reznej línie pôvodného algoritmu metódy rezom, ktorý je podrobne popísaný v druhej fáze testovania pri vyhodnocovaní výsledného vzhladu morfovaných odtlačkov. V práci sa tiež nachádzajú dva typy návrhov riešení na možnú elimináciu týchto nesprávnych vyhodnotení.

Porovnanie morfovaných odtlačkov prebiehalo pomocou nástroja *Minutia Cylinder-Code*, ktorý bol ako rozšírenie integrovaný do aplikácie, vďaka čomu sú výsledky morfovania okamžite k dispozícii po prepojení odtlačkov.

Ciele práce boli splnené, bola implementovaná aplikácia, schopná vytvoriť odtlačok s dvojitou identitou a to pri mnohých výsledkoch bez možnosti spoznania miesta rezu, prípadne s drobnými artefaktmi vytvorenými prechodom medzi odtlačkami. Avšak existuje aj mnoho neúspešných prípadov morfovania, ktorých dôvody neúspechu sú podrobne rozpisované v práci. V 90 % prípadov došlo k verifikácii na obe identity a v 10 % k verifikácii len s jedným odtlačkom. Výsledný vzhľad odtlačkov je zo 60 % chválitebný, k rušivému morfovaniu dochádza v prípade rozdielneho umiestnenia singulárných bodov, protichodnej orientácii jadier a pri absencii singulárných bodov, keď línie nemajú dostatočné zakrivenie (výnimkou

je morfovanie dvoch odtlačkov bez singulárnych bodov). Manuálna implementácia algoritmov extrakcie informácií mi dodala lepší a podrobnejší pohľad na problematiku morfovania, vďaka čomu som bol schopný lepšie porozumieť zvolenej metóde. Pre lepšiu demonštráciu bola implementovaná GUI aplikácia, kde sa nachádza celá nastaviteľná konfigurácia morfovania. Umožňuje vidieť jednotlivé kroky spracovania odtlačku, kroky morfovania a taktiež aj okamžité vyhodnotenie skóre podobnosti morfovaného odtlačku s pôvodnými.

Literatúra

- [1] Li S.Z. and Jain A.K. *Encyclopedia of Biometrics*. New York, NY: Springer, 2015.
- [2] Chowdhury C. and Saha B. Efficient fingerprint matching based upon minutiae extraction. *International Journal of Advanced Computer Research*, 2015.
- [3] Jain A.K., Ross A.A., and Nandakumar K. *Introduction to biometrics*. New York: Springer, 2011.
- [4] Cao K., Pang L., Liang J., and Tian J. Fingerprint classification by a hierarchical classifier. *Pattern Recognition*, 2013.
- [5] Thakkar D. Minutiae based extraction in fingerprint recognition. <https://www.bayometric.com/minutiae-based-extraction-fingerprint-recognition/>. [Online; navštívené 24.05.2020].
- [6] Maltoni D. *Handbook of fingerprint recognition*. London : Springer, 2009.
- [7] Zhang T.Y. and Suen C.Y. A fast parrallel algorithm for thinning digital patterns. *Communications of the ACM*, 1984.
- [8] Yung-Sheng C. and Wen-Hsing H. A modified fast parrallel algorithm for thinning digital patterns. *Pattern Recognition Letters*, 1988.
- [9] Xiao Q. and Raafat H. Fingerprint image postprocessing: A combined statistical and structural approach. *Pattern Recognition*, 1991.
- [10] Ferrara M., Cappelli R., and Maltoni D. On the feacibility of creating double-identity fingerprints. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2017.
- [11] Lee H.C. and Gaensslen R.E. *Advances in Fingerprint Technology*. London: CRC Press, 2 edition, 2001.
- [12] inc. VERIFY group. The history of fingerprinting. <https://verifygroup.com/the-history-of-fingerprinting/>. [Online; navštívené 11.10.2020].
- [13] Kanich O. *Fingerprint damage simulation: a simulation of fingerprint distortion, damaged sensor, pressure and moisture*. Saarbrücken: Lambert academic publishing, 2 edition, 2014.
- [14] Gomez-Barrero M., Rathgeb C., Scherhag U., and Busch C. Is your biometric system robust to morphing attacks? *5th International Workshop on Biometrics and Forensics (IWBF)*, 2017.

- [15] Tilborg H. *Encyclopedia of Cryptography and Security*. Boston, MA: Springer US, 2011.
- [16] Dudáková E. Daktyloskopické stopy a jejich využití v praxi. Master's thesis, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013.
- [17] Šišková J. Pojem a podstata daktyloskopie. Master's thesis, Univerzita Karlova v Praze, 2010.
- [18] Henry E.R. *Classification and uses of finger prints*. London: H.M. Stationery Office, 1905.
- [19] Cappelli R., Ferrara M., and Maio D. A fast and accurate palmprint recognition system based on minutiae. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2012.
- [20] Wieclaw L. Gradient based fingerprint orientation field estimation. *Journal of Medical Informatics and Technologies*, 2013.
- [21] Hong L., Wan Y., and Jain A. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998.
- [22] Cappelli R. and Ferrara M. A fingerprint retrieval system based on level-1 and level-2 features. *Expert Systems With Applications*, 2012.
- [23] Cappelli R., Lumini A., Maio D., and Maltoni D. Fingerprint image reconstruction from standard templates. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007.
- [24] Ngo C.L.D., Teoh A.B.J., and Hu J. *Biometric Security*. Cambridge Scholars Publishing, 2015.
- [25] Othman A. and Ross A. On mixing fingerprints. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2013.
- [26] Galbally J., Cappelli R., Lumini A., Maltoni D., and Fierrez J. Fake fingertip generation from a minutiae template. *2008 19th International Conference on Pattern Recognition*, 2008.
- [27] Cappelli R., Ferrara M., Maltoni D., and Maio D. *MCC Software Development Kit (SDK) - Documentation*. University of Bologna, 2015.
- [28] Kumar S.P., Kumar M.S., and Rajeeesh J. Palmprint enhancement using recursive histogram equalisation. *The Imaging Science Journal*, 2013.
- [29] Cappelli R., Ferrara M., and Maltoni D. Minutia cylinder-code: A new representation and matching technique for fingerprint recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010.
- [30] The Qt Company Ltd. Qt 5.14. <https://doc.qt.io/qt-5/index.html>. [Online; navštívené 24.05.2020].

- [31] Gottschlich C. Curved-region-based ridge frequency estimation and curved gabor filters for fingerprint image enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing*,, 2012.
- [32] LivDet. Livdet - liveness detection competitions. <http://livdet.org/>. [Online; navštívené 22.05.2020].

Príloha A

Obsah priloženého DVD

xdovic01.pdf - elektronická verzia textu tejto práce.

xdovic01.zip - zdrojové súbory textu tejto práce.

manual.pdf - popis závislostí aplikácie, návod na konfiguráciu pre spustenie.

MorphingOffingerprints.zip - zdrojové súbory implementovanej aplikácie.

DemoApp.zip - spustiteľná verzia aplikácie.

Database.zip - databáza odtlačkov na ktorej prebehlo testovanie.

Results.zip - výsledky testovania, vygenerované odtlačky.