

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**AUTOMATIZOVANÉ SPRACOVANIE
CHARAKTERISTICKÝCH VLASTNOSTÍ ODTLAČKOV
PRSTOV**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

EVIDENČNÉ ČÍSLO: FEI-5384-50790

2012

Bc. Pavol Marák

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**AUTOMATIZOVANÉ SPRACOVANIE
CHARAKTERISTICKÝCH VLASTNOSTÍ ODTLAČKOV
PRSTOV**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

EVIDENČNÉ ČÍSLO: FEI-5384-50790

Študijný program: aplikovaná informatika
Číslo a názov študijného odboru: 9.2.9 aplikovaná informatika
Školiace pracovisko: Ústav informatiky a matematiky
Vedúci záverečnej práce: Ing. Alexander Hambalík, PhD.

Bratislava 2012

Bc. Pavol Marák

S T U · ·
· · · · ·
· F E I ·
· · · · ·

ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Pavol Marák**
ID študenta: 50790
Študijný program: aplikovaná informatika
Študijný odbor: 9.2.9 aplikovaná informatika
Vedúci práce: Ing. Alexander Hambalík, PhD.
Miesto vypracovania: Ústav informatiky a matematiky

Názov práce: **Automatizované spracovanie charakteristických vlastností
odtlačkov prstov**

Špecifikácia zadania:

Naštudujte problematiku spracovania odtlačkov prstov. Navrhnite a implementujte systém na automatizované spracovanie odtlačkov prstov.

Úlohy:

1. Naštudujte problematiku snímania, generovania, spracovania a rekonštrukcie odtlačkov prstov pomocou najnovších biometrických metód.
2. Špecifikujte požiadavky na automatizované spracovanie odtlačkov prstov.
3. Navrhnite a implementujte systém na automatizované spracovanie odtlačkov prstov tak, aby umožnil odhalieť markanty (vzory).
4. Otestujte systém v praxi a vyhodnote získané výsledky.
5. Vypracujte potrebnú dokumentáciu.

Zoznam odbornej literatúry:

1. LEE, H. – GAENSSLEN, R. *Advances in fingerprint technology*, 2nd ed. 2001. LLC: CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-0923-9.
2. JAIN, A. – MAIO, D. – MALTONI, D. *Handbook of Fingerprint Recognition*. Londýn: Springer Verlag, 2009. 483 s. ISBN 978-1-84882-253-5.
3. RATHA, N. – BOLLE, R. *Automatic Fingerprint Recognition Systems*. New York: Springer-Verlag, 2003. 458 s. ISBN 0-387-95593-3.

Riešenie zadania práce od: 19. 09. 2011
Dátum odovzdania práce: 22. 05. 2012



Bc. Pavol Marák
študent



prof. RNDr. Otokar Grošek, PhD.
vedúci pracoviska



prof. RNDr. Otokar Grošek, PhD.
garant študijného programu



Vyhľásenie autora

Podpísaný Bc. Pavol Marák čestne vyhlasujem, že som predloženú diplomovú prácu s názvom Automatizované spracovanie charakteristických vlastností odtlačkov prstov vypracoval samostatne na základe poznatkov získaných počas štúdia a informácií z dostupnej literatúry uvedenej a riadne citovanej v práci. Práca vznikla v rámci inžinierskeho štúdia. Uvedenú prácu som vypracoval pod vedením Ing. Alexandra Hambalíka, PhD.

Bratislava, dňa 22. 5. 2012

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som chcel vyjadriť úprimné pod'akovanie môjmu školiteľovi Ing. Alexandrovi Hambalíkovi, PhD. za významnú odbornú a metodickú pomoc pri písaní mojej diplomovej práce a usmernenie pri koncipovaní formálnej štruktúry dokumentu.

Osobitné pod'akovanie patrí expertom Oddelenia daktyloskopickej identifikácie osôb Kriminalistického a expertízneho ústavu Policajného zboru v Bratislave za pripomienky a cenné informácie z praxe pri expertíznom skúmaní daktyloskopických stôp. Ďakujem Ing. Zuzane Némethovej, PhD. a Ing. Michaele Špankovej za odborné konzultácie, poskytnutie študijných materiálov a vytvorenie prostredia na priebežné overenie a prediskutovanie výsledkov dosiahnutých v rámci tejto práce. Vďaka ich prístupu a ochote som získal potrebné poznatky pre vytvorenie teoretického pozadia práce, predovšetkým informácie o kvalitatívnom prístupe k daktyloskopickej identifikácii, ktorý je úzko spätý s výskumom jedinečnosti odtlačkov prstov.

Implementovaný softvér, ktorý je praktickým výstupom tejto práce bol odskúšaný na elektronickej databáze odtlačkov prstov získaných z internej zbierky Kriminalistického a expertízneho ústavu Policajného zboru v Bratislave. Na zhodnotenie jeho úspešnosti vo vzťahu k vytýčeným cieľom boli použité výsledky manuálneho daktyloskopického vyhodnotenia spomínanej elektronickej databázy. Preto chcem touto cestou vyjadriť pod'akovanie za poskytnutie týchto materiálov autorke ich spracovania Bc. Daniele Kramárovej.

Rovnako chcem pod'akovovať rodine a blízkym priateľom za morálnu podporu, trpežlivosť a ohľaduplnosť v období písania tejto práce.

Práca vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Centrum excelentnosti bezpečnostného výskumu kód ITMS: 26240120034, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Bc. Pavol Marák

ABSTRAKT

MARÁK, Pavol: *Automatizované spracovanie charakteristických vlastností odtlačkov prstov.* [Diplomová práca]. Slovenská technická univerzita v Bratislave. Fakulta elektrotechniky a informatiky; Ústav matematiky a informatiky. Vedúci práce: Ing. Alexander Hambalík, PhD. Stupeň odbornej kvalifikácie: Bakalár v odbore Aplikovaná informatika. Bratislava: FEI STU, 2012. 105 s.

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce je návrh metódy automatizovanej extrakcie daktyloskopických markantov, ktoré sú stavebnými prvkami jedinečnosti odtlačkov prstov. Aktuálnym trendom hlavne vo forenznej sfére je prechod od klasického kvantitatívneho prístupu k daktyloskopickej identifikácii ku kvalitatívному prístupu. Ten pri identifikácii rozlišuje medzi jednotlivými typmi extrahovaných detailov odtlačku a zohľadňuje tak ich biologickú variabilitu. Na vytvorenie pravidiel kvalitatívneho modelu rozpoznávania založeného na markantoch je nutné najprv markanty extrahovať z reprezentatívneho súboru odtlačkov. Na zachytenie ich premenlivosti je nutné zaznamenávať vlastnosti ako sú tvar a poloha markantu. V práci riešime tento problém implementovaním softvérového riešenia, ktoré je schopné extrahovať a klasifikovať tvary markantov. Práca opisuje pozadie riešeného problému, ktorým je charakteristika markantov a návrh ich klasifikačného systému podľa tvaru a rozmerov. Navrhli sme schému spracovania odtlačku, v ktorej sme chronologicky za sebou zaradili dve hlavné fázy činnosti softvéru: algoritmus obnovy obrazovej kvality odtlačkov a extrakcie markantov. Predspracovanie a obnova obrazovej kvality spočívali v aplikácii metód ako sú segmentácia odtlačkového vzoru, normalizácia histogramu alebo použitie Gaborových filtrov. Extrakcia markantov bola založená na rozpoznávaní špecifikovaných konfigurácií papilárnych línií, ktoré sme rozlošovali podľa tvaru a prirodzených rozmerov prekonzultovaných s odborníkmi v oblasti forenznej daktyloskopie. Novým pohľadom na extrakciu boli okrem rozlišovania tvarov markantov aj techniky eliminácie falosných vzorov alebo verifikácia markantov analýzou niektorých geometrických atribútov. Algoritmus vie v súčasnej podobe rozlišovať medzi piatimi tvarmi markantov. Dosiahnuté výsledky extrakcie markantov sme porovnali s manuálnym vyhodnotením znalca v oblasti daktyloskopie.

Kľúčové slová: odtlačky prstov, daktyloskopické markanty, jedinečnosť odtlačkov, obrazové predspracovanie odtlačkov, Gaborov filter, extrakcia markantov.

ABSTRACT

MARÁK, Pavol: *A solution for automated processing of salient features in fingerprints.* [Diploma Thesis]. Slovak University of Technology in Bratislava. Faculty of Electrical Engineering and Information Technology; Institute of Computer Science and Mathematics. Advisor: Ing. Alexander Hambalík, PhD. Qualification degree: Bachelor od Applied Informatics. Bratislava: FEI STU, 2012. 105 p.

The primary aim of this thesis is to propose a method for automated extraction of fingerprint minutiae generally considered to be the structural element of fingerprint individuality. Conversion from standard quantitative approach to fingerprint identification to qualitative one is the latest trend especially in the forensic domain. Qualitative approach is based on distinguishing the shape types of extracted features and by doing so it preserves the biological variability of fingerprints. In the first place it is necessary to extract minutiae points from a representative set of fingerprints in order to create the rules of qualitative minutiae-based recognition model. To reveal the minutiae variability we need to capture properties like their shape and position. We answered to this issue by implementing a software solution capable of extracting and classifying the shapes of minutiae points. We describe a background of the problem being solved within the thesis by characterizing the minutiae points and designing their classification system. We proposed a fingerprint processing scheme where two main operation stages of software are arranged in chronological sequence: image quality restoration algorithm and minutiae extraction algorithm. Preprocessing and image quality restoration are based upon employment of methods like ridge pattern segmentation, histogram normalization or applying Gabor filters. A principle of minutiae extraction is recognition of specified ridge configurations that are classified by the shape and natural size consulted with forensic experts. A novel approach to extraction except the minutiae shape classification were techniques of spurious minutiae elimination or genuineness verification by checking a couple of spatial properties. Actual version of the proposed algorithm is able to recognize five minutiae shapes. Obtained experimental results of minutiae extraction were compared with results of manual extraction carried out by a forensic expert.

Key words: fingerprints, fingerprint minutiae, fingerprint individuality, fingerprint image preprocessing, Gabor filter, minutiae extraction.

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK	11
ZOZNAM TERMÍNOV A SKRATIEK	13
ÚVOD	14
1 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ PRÁCE	16
1. 1 Pozadie problému a jeho súčasný stav	16
1. 1. 1 Súčasné výzvy rozpoznávania odtlačkami prstov	16
1. 1. 2 Objekt nášho skúmania a význam jeho kvalitatívnej analýzy	16
1. 1. 3 Charakteristika navrhnutého riešenia	18
1. 1. 4 Opis metodiky riešenia	19
1. 1. 5 Motivácia práce a možnosti uplatnenia navrhnutého riešenia.....	20
1. 1. 6 Hlavné ciele diplomovej práce	21
1. 2 Biometria a činnosť biometrických systémov	22
1. 2. 1 Stručná charakteristika biometrie	22
1. 2. 2 Činnosť biometrického systému	23
1. 2. 3 Obrazové predspracovanie odtlačkov prstov.....	27
1. 2. 4 Extrakcia charakteristických vlastností odtlačkov	27
1. 3 Charakteristické vlastnosti odtlačkov	28
1. 3. 1 Štúdium jedinečnosti odtlačkov	28
1. 3. 2 Výskum charakteristických znakov odtlačkov na našom území	31
1. 3. 3 Analýza grafickej štruktúry odtlačku	32
1. 3. 4 Klasifikácia úrovní daktyloskopických vlastností	34
1. 3. 5 Markanty a ich klasifikácia.....	38
1. 4 Metódy predspracovania a obnovy obrazovej kvality odtlačku	42
1. 4. 1 Segmentácia daktyloskopického vzoru odtlačku.....	45
1. 4. 2 Odhad kvality papilárneho terénu	46
1. 4. 3 Normalizácia histogramu odtlačku	47
1. 4. 4 Aplikácie kontextových obrazových filtrov	49
1. 4. 5 Adaptívna binarizácia	58
1. 4. 6 Zúženie hrúbky papilárnych línii.....	60
1. 5 Metódy extrakcie markantov v odtlačkoch prstov	61
1. 5. 1 Význam extrakcie markantov v daktyloskopickej identifikácii	61

1. 5. 2 Metodika overenia úspešnosti softvérovej extrakcie markantov	62
1. 5. 3 Pravidlá pre rozpoznávanie špecifikovaných markantov	66
1. 5. 4 Lokalizácia markantov Gaborovym filtrom	71
1. 5. 5 Extrakcia markantov použitím metódy Crossing Number	73
2 NÁVRH RIEŠENIA A DISKUSIA K DOSIAHNUTÝM VÝSLEDKOM	75
2. 1 Navrhnuté fázy riešenia problému zadania práce	75
2. 2 Postup pri návrhu obrazového predspracovania	80
2. 2. 1 Algoritmus segmentácie	80
2. 2. 2 Algoritmus odhadu kvality papilárneho terénu	83
2. 2. 3 Algoritmus normalizácie histogramu odtlačkov	84
2. 2. 4 Algoritmus odhadu lokálnych orientácií papilárnych línii	86
2. 2. 5 Algoritmus odhadu frekvencie papilárnych línii	88
2. 2. 6 Algoritmus aplikácie Gaborovho filtra	91
2. 2. 7 Algoritmus binarizácie odtlačku	95
2. 2. 8 Algoritmus zúženia hrúbky papilárnych línii	96
2. 3 Postup pri návrhu extrakcie markantov	97
2. 3. 1 Detekcia tvarových nepravidelností a klasifikácia markantov	99
2. 3. 2 Eliminácia geometrických anomálií v kostre odtlačku	101
2. 3. 3 Verifikácia markantov	105
3 ZHODNOTENIE IMPLEMENTOVANÉHO RIEŠENIA	108
3. 1 Celkové zhodnotenie splnenia vytýčených cieľov	108
3. 2 Zhodnotenie techník predspracovania a obnovy obrazovej kvality	111
3. 3 Zhodnotenie extrakcie markantov	113
3. 4 Smery ďalšieho vývoja softvéru	118
4 ZÁVER	119
POUŽITÁ LITERATÚRA	121
ZOZNAM PRÍLOH	126

ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK

Obrázok 1 Blokové schémy režimov činnosti biometrického systému	24
Obrázok 2 Základné činnosti biometrického systému spracúvajúceho odtlačky	26
Obrázok 3 Hrebene papilárnych línii odtlačkov a priehlbiny medzi nimi	32
Obrázok 4 Povrch odtlačku z rôznych pohľadov	33
Obrázok 5 Singulárne body papilárneho terénu a jadro odtlačku	34
Obrázok 6 Základné daktyloskopické vzory odtlačkov prstov	35
Obrázok 7 Tvarové modifikácie základných daktyloskopických vzorov	35
Obrázok 8 Grafické detaily 3. úrovne v daktyloskopických vzoroch	37
Obrázok 9 Šírka papilárnej línie vyjadrená v obrazových bodoch	41
Obrázok 10 Extrakcia markantov v poškodenom odtlačku	43
Obrázok 11 Ukážky odtlačkov prstov s oblasťami nízkej kvality	44
Obrázok 12 Úprava histogramu odtlačku do normalizovanej podoby	48
Obrázok 13 Princíp odhadu lokálnej frekvencie	52
Obrázok 14 Komponenty Gaborovho filtra	54
Obrázok 15 Ukážka Gaborovho filtra	54
Obrázok 16 Vyhladenie vysokých frekvencií Gaborovym filtrom	55
Obrázok 17 Nová periodická funkcia v modifikovanom Gaborovom filtri	57
Obrázok 18 Modelovanie papilárneho terénu sínusovým signálom	57
Obrázok 19 Výsledky pôvodného a modifikovaného Gaborovho filtra	58
Obrázok 20 Výsledky binarizácie pri rôznych úrovniach kvality odtlačku	59
Obrázok 21 Kostra odtlačku vytvorená z binárneho obrazu	60
Obrázok 22 Ukážka extrakcie niektorých typov markantov v papilárnom teréne	62
Obrázok 23 Časť manuálne vyhodnoteného odtlačku odborníkom v daktyloskopii	64
Obrázok 24 Ukončenie línie potným pórom a umelé ukončenie spôsobené jazvou	68
Obrázok 25 Umelé spájanie blízkych papilárnych línii	69
Obrázok 26 Tvar jazera v klasickej kostre (a) a v duálnej kostre (b)	69
Obrázok 27 Umelé izolované body v nekvalitných častiach obrazu	70
Obrázok 28 Prekrytie papilárnych línii a označenie jeho rozmeru	71
Obrázok 29 Množina Gaborových filtrov v 16 rôznych orientáciách a frekvenciách	72
Obrázok 30 Vizualizácia odozvy Gaborovho filtra na odtlačok prsta	73
Obrázok 31 Vyhodnotenie okolia obrazového bodu metódou CN	74
Obrázok 32 Schéma obrazového predspracovania odtlačku	75
Obrázok 33 Schéma modulu extrakcie markantov	77
Obrázok 34 Architektúra navrhnutého softvérového riešenia	79
Obrázok 35 Ukážka hrubej masky segmentácie odtlačku	81
Obrázok 36 Rozdiely medzi hrubou a regularizovanou maskou	81
Obrázok 37 Ukážka vylepšenia segmentácie odtlačku v oblastiach nadmerného tlaku	82
Obrázok 38 Segmentácia latentného odtlačku s nízkym kontrastom	82
Obrázok 39 Porovnanie našej segmentácie s inou metódou z literatúry	83
Obrázok 40 Porovnanie výsledkov odhadu kvality papilárneho terénu	84
Obrázok 41 Porovnanie výsledkov normalizácie histogramu odtlačku	85

Obrázok 42 Odstránenie šumu Wienerovym filtrom	86
Obrázok 43 Vplyv vyhladzovacieho filtra na konzistenciu orientácie v smerovej mape	87
Obrázok 44 Presnosť odhadu smeru v oblastiach singulárnych bodov	88
Obrázok 45 Výpočet frekvencie papilárnych línii pri rôznych veľkostiach bloku W....	89
Obrázok 46 Časť odtlačku s nejasne oddelenými papilárnymi líniami	90
Obrázok 47 Frekvenčná mapa odtlačku	91
Obrázok 48 Obnovenie celistvosti papilárnych línii účinkom Gaborovho filtra	92
Obrázok 49 Účinky Gaborovho filtra na kvalitný odtlačok	93
Obrázok 50 Odstránenie malých dier v papilárnych líniah	93
Obrázok 51 Rekonštrukcia kritických častí obrazu a eliminácia jaziev	94
Obrázok 52 Porovnanie našej implementácie Gaborovho filtra s inými riešeniami	94
Obrázok 53 Binarizácia odtlačku spracovaného Gaborovym filtrom	95
Obrázok 54 Kostra odtlačku vytvorená použitím morfologickej funkcie <i>bwmorph()</i> ...	96
Obrázok 55 Vplyv spracovania obrazu Gaborovym filtrom na kvalitu kostry odtlačku	97
Obrázok 56 Proces extrakcie markantov	98
Obrázok 57 Ukončenia a rozdvojenia odhalené metódou Crossing Number.....	99
Obrázok 58 Rozlišovanie 5 tvarových typov markantov	100
Obrázok 59 Označovanie markantov odhalených implementovaným softvérom.....	100
Obrázok 60 Umelo vytvorené tvary v kostre odtlačku.....	101
Obrázok 61 Postup pri eliminácii umelého jazera.....	104
Obrázok 62 Výsledok eliminácie umelých útvarov z kostry odtlačku.....	104
Obrázok 63 Proces verifikácie markantov	105
Obrázok 64 Umelé prerušenie papilárnej línie a H štruktúra	105
Obrázok 65 Verifikácia markantov v odtlačku v zhoršenej kvalite	107
Obrázok 66 Množina markantov odhalených expertom a našim softvérom	113
Obrázok 67 Zhodnotenie výsledkov softvéru indexom extrakcie markantov	115
Obrázok 68 Index extrakcie pri jednotlivých daktyloskopických vzoroch odtlačku ...	115
Obrázok 69 Index extrakcie markantov z kvalitných a poškodených odtlačkov	116
 Tabuľka 1 Rozdelenie markantov podľa tvaru a ich špecifikácia	39
Tabuľka 2 Vysvetlivky k manuálnemu označovaniu markantov	64
Tabuľka 3 Priemerná dĺžka trvania krokov modulu obrazového predspracovania	110
Tabuľka 4 Priemerná dĺžka trvania krokov modulu extrakcie markantov	111
Tabuľka 5 Porovnanie výsledkov extrakcie s inými metódami v literatúre	117

ZOZNAM TERMÍNOV A SKRATIEK

KEÚPZ	Kriminalistický a expertízny ústav Policajného zboru v Bratislave
Markant	Charakteristický znak grafického vzoru odtlačku využívaný na identifikáciu
Extrakcia markantov	Proces hľadania markantov v odtlačku a vyhodnocovania ich parametrov
AFIS	Automated Fingerprint Identification System (automatizovaný systém na identifikáciu osôb odtlačkami prstov)
Daktyloskopia	Náuka o obrazcoch papilárnych línií na vnútornej strane článkov prstov
NIST	National Institute of Standards and Technology (Národný ústav pre štandardy a technológie v USA)
ANSI	American National Standards Institute (Americký národný ústav pre štandardy)

ÚVOD

Rozpoznávanie osôb odtlačkami prstov je jednou z biometrických technológií, ktorá patrí medzi najvyspejšie metódy modernej autentifikácie. Svoje primárne využitie nachádza v oblasti forenznej vedy, avšak neustály vývoj informačných technológií umožňuje automatizované vykonávanie procesu rozpoznávania v biometrických systémoch. Biometrický systém spracúva obrazovú podobu odtlačkov prstov v niekoľkých fázach, ktorých úlohou je odtlačok reprezentovať vo forme charakteristických vlastností a následne ich porovnať s reprezentáciami iných odtlačkov na vytvorenie záveru o rozpoznaní identity. Charakteristickými vlastnosťami, ktoré sú predmetom nášho skúmania sú v prípade odtlačkov prstov daktyloskopické markanty. Tie predstavujú tvarové nepravidelnosti v topologickej štruktúre papilárnych línii tvoriacich komplexný obrazec každého odtlačku. Aj napriek absencii objektívneho vedeckého posúdenia problému, je ich tvar, poloha a orientácia v papilárnom teréne podkladom jedinečnosti každého odtlačku.

Cieľom tejto práce v teoretickej časti je charakterizovať pozadie výskumu jedinečnosti odtlačkov, ktorý je spätý s analýzou biologickej variability daktyloskopických markantov, špecifikovať vlastnosti markantov a opísat' princíp dvoch vybraných fáz spracovania odtlačkov prstov. Prvou z nich je počítačové obrazové predspracovanie za účelom obnovy kvality štruktúry poškodených odtlačkov a druhou fázou je extrakcia daktyloskopických markantov. V práci je prezentovaný nový pohľad na extrakciu markantov, ktorý sa od bežných riešení lísi rozlišovaním medzi jednotlivými tvarmi markantov, čo zabezpečuje zachytávanie ich prirodzenej variability a vytvára tak bázu údajov potrebná na vytvorenie nového kvalitatívneho modelu pri rozpoznávaní odtlačkami prstov. Oddelenie daktyloskopickej identifikácie osôb KEÚPZ v Bratislave vedie v aktívny výskum v oblasti skúmania charakteristických vlastností odtlačkov, ktorého úlohou je vytvorenie spomínaného kvalitatívneho modelu rozpoznávania. V súčasnosti je na území SR v oblasti forenznej daktyloskopickej identifikácie zaužívaný kvantitatívny prístup k rozpoznávaniu, ktorého princíp spočíva v odhalení zhody v určitom minimálnom počte markantov. Na vytvorenie nového kvalitatívneho modelu, ktorý môže zefektívniť biometrické rozpoznávanie, je nutné

daktyloskopické markanty extrahovať z dostatočne veľkej vzorky odtlačkov a pri tom rozlišovať ich tvar podľa klasifikačnej schémy, ktorá je takisto prezentovaná v práci.

Praktickým výstupom tejto diplomovej práce je naša reakcia na uvedený problém v podobe softvérovej implementácie algoritmu obrazového predspracovania odtlačkov a extrakcie daktyloskopických markantov. V práci uvádzame pracovný postup pri návrhu a implementácii jednotlivých krokov algoritmu spolu s medzivýsledkami v grafickom znázornení. Zhodnotili sme výsledky oboch implementovaných algoritmov spolu s naznačením ich nedostatkov a možností ich odstránenia v budúcnosti. Pri obrazovom predspracovaní sme hodnotili mieru obnovenia pôvodnej štruktúry odtlačku a mieru modifikácie originálneho obrazca odtlačku so zreteľom na zachovanie tvaru a polohy markantov. Výsledky extrakcie markantov sme porovnávali s manuálnym grafickým označením experta Oddelenia daktyloskopickej identifikácie osôb KEÚPZ nakoľko je manuálne vyhodnocovanie odtlačkov stále považované za najspoľahlivejšiu metódu. Algoritmus extrakcie sme rozšírili o niektoré techniky zamerané na elimináciu falošných útvarov, ktoré vznikli v odtlačku ako dôsledok obrazového predspracovania odtlačkov nízkej kvality. Využili sme pri tom niektoré biologické a praxou overené špecifická papilárneho terénu, ktoré sa zohľadňujú aj pri manuálnej daktyloskopickej expertíze.

V záverečnom zhodnotení dosiahnutých výsledkov sme percentuálne vyhodnotili úspešnosť extrakcie jednotlivých tvarov markantov, ktorá je základným ukazovateľom kvality navrhnutého riešenia. Potrebu a účinnosť implementovaného obrazového predspracovania sme dokumentovali zhodnotením úspešnosti extrakcie bez použitia predspracovania a s ním, kde sme mohli vidieť značný prínos tejto techniky. V závere sme vypracovali globálnu sumarizáciu výsledkov práce a zhodnotenie miery splnenia vytýčených cieľov. Načrtli sme aj našu víziu pri ďalšom vývoji softvéru.

1 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ PRÁCE

1. 1 Pozadie problému a jeho súčasný stav

1. 1. 1 Súčasné výzvy rozpoznávania odtlačkami prstov

Hlavným cieľom tejto práce je teoreticky analyzovať a riešiť veľmi dôležitý problém v oblasti automatizovaného biometrického rozpoznávania identity osôb založený na skúmaní charakteristických vlastností odtlačkov prstov. Biometria založená na odtlačkoch prstov je efektívnym a spoľahlivým nástrojom na rozpoznávanie osôb. Rozpoznávanie identity je v dnešnom modernom svete vyžadované hlavne v oblasti informačnej bezpečnosti a forenznej vedy. Biometria, ako aj iné metódy autentizácie osôb je neustále sa vyvíjajúcou vedou, ktorá s použitím nástrojov výpočtovej techniky dokáže lepšie zdolávať problémy, ktoré poznačovali jej manuálnu podobu. Je potrebné pripomenúť, že počítačové rozpoznávanie ešte nie je natol'ko vyspelé, aby v kritických aplikáciách nahradilo ľudský faktor. Aj tento aspekt zrejme povzbudzuje novú vlnu výskumu, ktorá je sústredená na odtlačky prstov a procesy, ktoré ich spracúvajú v biometrických systémoch. Niektoré nové trendy pri biometrickom spracúvaní odtlačkov prstov si však žiadajú vytvorenie modelu riešenia, ktorý je z časti premietnutím poznatkov manuálnej aj automatizovanej biometrie. Rozhodli sme sa našu pozornosť venovať problému, ktorý spočíva v kvalitatívnom skúmaní charakteristických vlastností odtlačkov prstov. Tento druh skúmania nadobúda zvlášť dôležitý význam pri vedeckom posúdení jedinečnosti odtlačkov alebo zvyšovaní efektivity rozpoznávania ľažko spracovateľnými biometrickými vzorkami.

1. 1. 2 Objekt nášho skúmania a význam jeho kvalitatívnej analýzy

Základným objektom nášho skúmania je odtlačok prsta v elektronickej podobe a jeho špecifické vlastnosti. Odtlačok je možné zanechať na rôznych materiáloch alebo ho je možné zosnímať vďaka štruktúre pokožky na bruškách prstov, ktorá sa zvykne označovať ako papilárny terén. Odtlačok je tvorený komplexným grafickým vzorom, v ktorom sa nachádzajú určité prvky, ktoré sú kľúčom k rozpoznávaniu identity. Tieto

prvky sú lokálnymi tvarovými zvláštnosťami a nepravidelnosťami obrazov tvorených papilárnymi líniami. Nazývajú sa daktyloskopické markanty a okrem ich použitia na reprezentáciu odtlačku pri rozpoznávaní majú silný potenciál aj pri vyhodnocovaní variability biometrickej informácie na účely skúmania jedinečnosti odtlačkov v rámci konkrétnej populácie. Človek tak disponuje jedinečným a neopakovateľným identifikátorom, ktorý nezameniteľne určuje jeho identitu. Avšak toto tvrdenie nie je vedecky dostatočne podložené.

Aby sme mohli markanty použiť pri rozpoznávaní alebo skúmaní vlastností odtlačkov, je nutné vyvinúť metódu ako ich nájsť v obrazci papilárnych línii. Táto úloha sa nazýva extrakcia markantov. Bolo vyvinutých množstvo algoritmov riešiacich tento problém využívajúcich široké spektrum princípov, no vždy bola ich presnosť ovplyvňovaná úrovňou kvality originálneho odtlačku. Pri latentných odtlačkoch je jej úroveň prevažne veľmi nízka. Je pri nich bežné, že aj po použití moderných metód ich snímania a digitalizácie obsahujú iba fragment pôvodného odtlačku. Aj pri kontrolovaných podmienkach sa stane, že odtlačok zostane po zosnímaní rozmazený alebo sa stráca kontrast medzi papilárnymi líniami potrebný na zdôraznenie ich geometrických atribútov. Akékolvek zmeny alebo deformácie v grafickej štruktúre odtlačku môžu mať za následok chybné vyhodnotenie charakteristických vlastností, čo znemožňuje spôsoblivé rozpoznávanie. Pri vnútroriadnej variabilite, môže byť jedna osoba reprezentovaná vždy mierne odlišnou množinou markantov, čo môže rozpoznávací softvér vyhodnotiť ako odlišnú identitu.

Okrem kvality obrazca v odtlačku je rovnako dôležitým problémom rozlišovanie tvarov markantov, ktoré sa nachádzajú v odtlačkoch. Vtedy hovoríme o kvalitatívnom prístupe k rozpoznávaniu, pri ktorom sa markanty nechápu ako geometrická reprezentácia odtlačku, ale skôr ako prvok vzácnosti resp. jedinečnosti. Aj manuálna daktyloskopia je založená na hľadaní tvarov markantov, pričom sa rozlišuje medzi ich identifikačnou hodnotou, ktorá závisí od toho, aký zriedkavý je ich výskyt v odtlačkoch prstov. Porovnávanie frekventovanými markantmi nie je natoľko charakteristické a objektívne ako určenie pôvodcu odtlačku na základe veľmi zriedkavého znaku, ktorý má v konkrétnej populácii nízky výskyt. Súčasné identifikačné AFIS systémy túto kvalitatívnu analýzu zanedbávajú a odtlačky sú porovávané ako grafické vzory na základe geometrických korelácií. Týmto spôsobom sa v automatizovanej forme daktyloskopie zanedbáva biologická variabilita, ktorá je doposiaľ najsilnejším

argumentom hovoriacim v prospech jedinečnosti každého odtlačku. Práve jedinečnosť je v biometrii prvoradým kritériom kladeným na biometrickú črtu ľudského tela. Aby sa však dalo dospieť k určitému záveru a výsledkom, či už v zefektívnení biometrického rozpoznávania alebo novým pohľadom na jedinečnosť odtlačkov podporenú štatistickou analýzou vlastností daktyloskopických markantov, je nutné navrhnúť a realizovať riešenie extrakcie jednotlivých tvarových typov markantov z obrázkov odtlačkov prstov, s ktorými sa pracuje pri biometrickom rozpoznávaní.

1. 1. 3 Charakteristika navrhnutého riešenia

Vychádzali sme z problémov, ktoré sú spojené s analýzou odtlačkov. Implementovali sme dve vzájomne nadväzujúce techniky ich automatizovaného počítačového spracovania, ktoré sa snažia modelovať princíp manuálneho daktyloskopického skúmania odtlačkov prstov. Vo všeobecnosti obrázky odtlačkov prstov nedosahujú ideálnu kvalitu. Tú je do určitej miery možné obnoviť. V reakcii na túto možnosť sme v prvom rade navrhli softvérové riešenie na obrazovú úpravu kvality digitálnych odtlačkov. Všímali sme si predovšetkým ako implementované nástroje obnovujú nízku úroveň zreteľnosti papilárnych línii. Takisto sme skúmali dopad tohto procesu na zachovanie konzistentnosti pôvodného obrazca tvoreného papilárnymi líniami. Druhou oblasťou nášho zamerania v teoretickej aj praktickej rovine bola samotná extrakcia markantov. V práci sme zohľadnili potreby výskumu Oddelenia daktyloskopickej identifikácie osôb KEÚPZ. Poslaním tohto výskumu je vyhodnotenie variability vlastností markantov v odtlačkoch prstov na rozvoj nových metód v kvalitatívnom skúmaní odtlačkov prstov. Očakávaným prínosom je aj overenie hypotéz týkajúcich sa jedinečnosti odtlačkov, ktorá stále nie je vedecky preukázaná. Na základe cenných pripomienok sme vypracovali špecifikáciu hľadaných tvarových typov markantov, ktoré sú extrahované aj manuálne v rámci forenznej expertízy znalcami v oblasti daktyloskopie. Špecifikácia obsahovala klasifikáciu markantov do 14 tried spolu s opisom vlastností, ktoré ich presne definujú. Drivivá väčšina algoritmov na extrakciu markantov rozlišuje len dva základné tvary a preto sme museli implementovať vlastné algoritmy ako rozpoznávať iné tvary markantov. V súčasnosti vie náš softvér rozpoznávať 5 tvarových typov najfrekventovanejších markantov.

Rozlišovanie typov markantov je v oblasti automatizovanej biometrie nedostatočne riešený problém a preto sme mali minimálnu možnosť porovnať naše výsledky s výsledkami iných metód extrakcie dostupných v literatúre. Rozhodli sme sa presnosť nášho riešenia porovnať s výsledkami manuálnej extrakcie, kde znalec v daktyloskopii z KEÚPZ manuálne použitím grafického editora vyznačil správne polohy markantov a rozlíšil medzi ich tvarovými typmi. Toto rozhodnutie bolo motivované hlavne tým, že manuálne vyhodnocovanie odtlačkov je v súčasnosti stále presnejšie ako softvérové.

1. 1. 4 Opis metodiky riešenia

V teoretickej časti práce sme sa venovali opisu biometrie a biometrických systémov. Charakterizovali sme činnosť automatizovaných biometrických systémov, aby sme objasnili význam obrazového spracovania a extrakcie markantov v kontexte modulov ich činnosti. Zvlášť sme sa venovali problematike štúdia modelu jedinečnosti odtlačkov a analýze daktyloskopických vlastností prítomných v odtlačkoch. Prieskumom literatúry sme priblížili princíp niektorých techník obnovy obrazovej kvality odtlačku a extrakcie markantov. Následne sme zdokumentovali náš postup pri návrhu základných komponentov nášho softvérového riešenia. Na záver sme zhodnotili naše riešenie porovnaním výsledkov jednotlivých fáz spracovania našim algoritmom s manuálne dosiahnutými výsledkami. Diskusiou doplnenou o vizuálnu reprezentáciu medzivýsledkov a úspešnosti implementovaných techník sme zhodnotili celkovú úroveň implementácie so zdôraznením nedostatkov a víziou budúceho vývoja.

Kapitola 1 je analýzou súčasného stavu problematiky, teoretickými východiskami práce a opisom princípu vybraných metód obrazového spracovania odtlačkov a extrakcie markantov. Vysvetľuje prečo je problém dôležité riešiť a prináša argumentáciu pri výbere konkrétnych metód spracovania odtlačkov. Kapitola 2 a 3 sú obsahovo zamerané na opis konkrétneho riešenia, prezentáciu dosiahnutých výsledkov spolu s diskusiou zameranou na identifikovanie problémov a naznačením smeru ďalšieho vývoja.

1. 1. 5 Motivácia práce a možnosti uplatnenia navrhnutého riešenia

V predchádzajúcim texte sme naznačili potrebu riešenia aktuálneho problému, ktorým je vývoj automatizovanej extrakcie markantov s ich tvarovým rozlíšením na zachytenie biologickej variability odtlačkov. Okrem tohto úskalia daktyloskopického rozpoznávania je naša motivácia rozšírená aj o niekoľko ďalších aspektov prekračujúcich špecifický problém extrakcie markantov z odtlačkov prstov. Nasledujúci prehľad prináša hlavné zdroje našej motivácie pri riešení problému tejto diplomovej práce:

- ***Výskum jedinečnosti odtlačkov prstov***
 - Súčasná dôvera v neopakovateľnosť odtlačkov sa teoreticky zakladá na analýze vzácnosti výskytu jednotlivých typov markantov, pretože existujú rôzne tvary markantov, z ktorých nie každý je rovnako frekventovaný. Reagujeme na výskumný projekt Oddelenia daktyloskopickej identifikácie osôb KEÚPZ vývojom softvérového riešenia spracovania odtlačkov prstov. Problémom je predovšetkým vyšetrovanie latentných odtlačkov prstov s obmedzeným počtom markantov a dosiahnutie určitej úrovne upotrebitelnosti poškodených odtlačkov na identifikáciu.
- ***Efektivita a presnosť automatizovaného biometrického rozpoznávania***
 - Ak by boli z modulu extrakcie do porovnávacieho modulu AFIS systémov prenesené údaje o tvarovej príslušnosti markantov, dala by sa tak zohľadniť ich vzácnosť a identifikácia by tak mohla byť efektívnejšia a presnejšia.
- ***Výskum štatistických vlastností markantov v odtlačkoch dlani***
 - Hlavne v kriminalistickom sektore sa dosť často identifikuje dlaňami, ktoré zatiaľ nie sú hlbšie preskúmané a tak by navrhnutý softvér mohol pomôcť pri získaní ich vlastností.
- ***Rozšírenie metód extrakcie markantov o verifikáciu ich vlastností***
 - Často softvér vyhodnocuje falosoňné markanty, ktoré vznikajú v nekvalitných obrazoch. My sme do nášho algoritmu prenesli niektoré postupy z manuálnej identifikácie ako skúmanie markantov podľa

prirodzených tvarov, rozmerov, hustoty výskytu alebo odhadu spoľahlivosti detekcie.

- **Nové pohľady na možnosti rekonštrukcie chýbajúcich častí vzoru odtlačku**
 - Pokročilá štatistická analýza môže pomôcť odhaliť na väčšej biometrickej vzorke skryté závislosti výskytu markantov podľa konkrétneho miesta vo vzore odtlačku. Pri nejasnosti klasifikácie niektorých markantov môže byť takýto model nápomocný.

1. 1. 6 Hlavné ciele diplomovej práce

V nasledovnom prehľade uvádzame hlavné ciele, ktoré sme si vytýčili v teoretickej a praktickej časti tejto práce:

Ciele teoretickej časti práce:

- definovať teoretické východiská práce a analyzovať súčasný stav problematiky
- analyzovať štruktúru odtlačkov prstov so zameraním na markanty papilárneho terénu
- zhodnotiť doterajšie výsledky v oblasti štúdia individuality odtlačkov a variability markantov a charakterizovať ich spojitosť s hlavným problémom riešeným v práci
- opísť postup návrhu a princíp implementovaných algoritmov
- zhodnotiť získané výsledky, porovnať ich s referenčnými a identifikovať smery ďalšieho vývoja

Ciele praktickej časti práce:

- implementovať algoritmy na obrazové predspracovanie odtlačku s cieľom zlepšiť ich obrazovú kvalitu
- implementovať algoritmy na extrakciu špecifikovaných typov markantov a vizualizovať výsledky
- testovať presnosť softvéru na vzorke dodaných odtlačkov prstov
- porovnať naše výsledky s výsledkami manuálneho spracovania odtlačkov expertom v oblasti daktyloskopie

1. 2 Biometria a činnosť biometrických systémov

1. 2. 1 Stručná charakteristika biometrie

V každodennom živote rozpoznávame ľudí na základe niektorých charakteristik ako sú hlas, tvár alebo podpis. Niektoré z nich majú takú komplexnú a neopakovateľnú štruktúru, ktorá nám pomôže na jednoznačné odlišenie konkrétneho človeka v rámci širšej populácie. Osobitné postavenie má medzi nimi odtlačok prsta. Marcello Malpighi (1686) a Jan Evangelista Purkyně (1823) svojich čias študovali anatómiu odtlačkov prstov, no neuvedomovali si možnosť ich použitia na účel rozpoznávania. Angličan William Herschel v roku 1858 použil odtlačok prsta ako náhradu podpisu na obchodnej zmluve. Doktor Henry Faulds si v roku 1880 pravdepodobne ako prvý uvedomil, že „kožné brázdy“ ako ich nazýval, nájdú uplatnenie pri identifikácii v kriminálnej oblasti. Od čias, kedy Alphonse Bertillon v 19. storočí zaviedol v tých dobách prevratný systém antropometrickej identifikácie, máme možnosť sledovať ako sa ľudia začali zaujímať o rozpoznávanie na báze meraní častí ľudského tela (Dessimoz, 2005, s. 8). Voľným okom viditeľné tvary a vzory nepostačovali na presné rozlíšenie totožnosti a tak sa začala skúmať hlbšia štruktúra niektorých biologických objektov, v ktorej je skrytá variabilita a jedinečnosť. Táto skutočnosť si žiadala rozpracované postupy a techniky ako k tejto štruktúre pristúpiť a získať z nej potrebné údaje. Dnes, v období informačnej revolúcie máme prostriedky ako tieto úlohy automatizovať a vykonávať ich mimoriadne presne. Pri spätnom pohľade vidíme ako sa rôzne prístupy individuálnej identifikácie formujú do jednej vedeckej disciplíny. Jej názov je biometria.

Biometria je spôsob identifikácie alebo verifikácie identity osôb na základe jedinečných fyziologických a behaviorálnych atribútov. Biometria sa snaží kvalitatívne a kvantitatívne vyhodnocovať tieto atribúty, skúma ich vlastnosti a v podstate je zdrojom myšlienok, nápadov a techník ako, čo najefektívnejšie implementovať prostriedky na rozpoznávanie identity. Cieľmi biometrie sú predovšetkým zvýšenie užívateľského komfortu, zvýšenie bezpečnosti a väčšia efektivita rozpoznávania (Maltoni et al., 2009, s. 3). Má svoju dlhodobú história a korene hlavne v podobe odtlačkov prstov. V rámci telesných biometrických identifikátorov má odtlačok prsta dominantné postavenie hlavne kvôli praxou zatial nespochybnej jedinečnosti ich vnútornej štruktúry, univerzálnosti v rámci populácie a anatomickej stálosti. Odtlačok

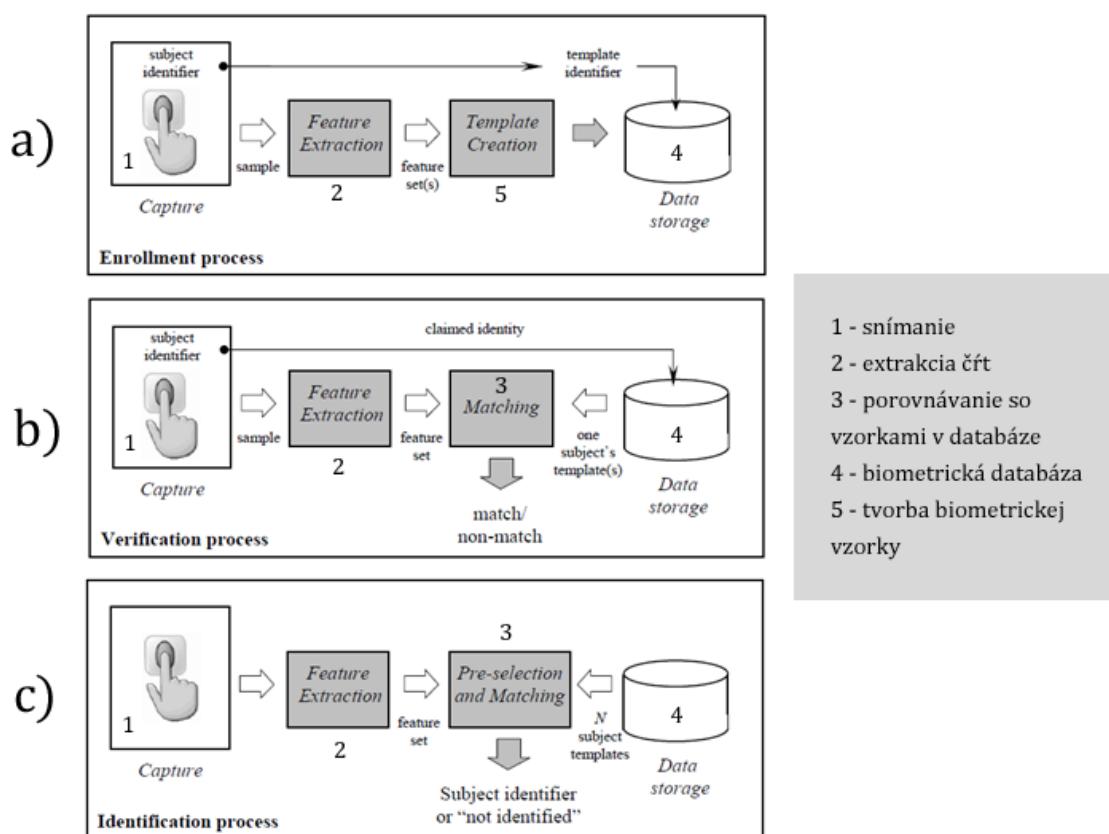
prsta, ktorý je ústredným pojmom celej práce, je zviazaný s jednotlivcom od narodenia. Fáza diferenciácie pokožky na končekoch prstov a špecifické podmienky pri vývoji plodu v maternici ho robia biologicky jedinečným (Maltoni et al., 2009, s. 34). Toto špecifické a dynamicky sa meniace prostredie vplýva na rast a formovanie buniek v pokožke a vytvára tak jedinečné konfigurácie a obrazce papilárnych línii, ktorých skúmanie je už desiatky rokov považované za najspoľahlivejšiu metódu rozpoznávania osôb.

1. 2. 2 Činnosť biometrického systému

Dlhé bádanie vedcov v oblasti biometrie spoločne s vplyvom moderných informačných technológií prinášajú návrhy komplexných biometrických systémov. Tie sú schopné snímať určité ľudské charakteristiky, prevádztať ich do digitálnej formy, analyzovať a spracúvať zosnímané dátá a nakoniec z nich vybrať len relevantnú informáciu, na základe ktorej sú schopné rozpoznať osobu. Nás však budú v rámci tejto zaujímať jedine odtlačky prstov a dve dôležité fázy ich digitálneho spracovania: obrazové predspracovanie a extrakcia daktyloskopických markantov.

V dnešnom svete prebieha overenie identity biometrickými technikami v mnohých oblastiach. Môžeme byť svedkami verifikácie identity biometrickým terminálom pri kontrole fyzického vstupu alebo evidencii pracovnej dochádzky. Často je odtlačok prsta využívaný ako vstupný klúč pri prihlásovaní sa do PC, počítačovej siete alebo softvérovej aplikácie. Kvôli bezpečnosti a predchádzaniu rôznych podvodom sú ľudia identifikovaní odtlačkami pri prechode hraníc, pri vydávaní vodičských preukazov alebo pri registrácii voličov vo voľbách. Foreznná sféra bola donedávna jediným akcelerátorom výskumu nových metód daktyloskopickej identifikácie, no dnes je komerčný sektor tiež motorom tejto technológie. Otázka bezpečnosti ľudí, elektronických údajov, finančných transakcií a rôznorodé krádeže identity v dnešnej dobe nadobúdajú s používaním prostriedkov výpočtovej techniky nový význam. Moderný elektronicky prepojený svet si žiada spoľahlivú metódu osobnej autentizácie. Niektoré klasické metódy ako sú heslá alebo prístupové karty už nie sú považované za bezpečné. Vyššou úrovňou bezpečnosti je biometria, ktorá je pri plnení svojho účelu alternatívou ku kryptografickým prostriedkom zabezpečenia autentizácie osôb.

Najdôležitejšiu úlohu zohrávajú odtlačky prstov v rámci daktyloskopickej identifikácie v oblasti kriminalistiky pri vyšetrovaní trestných činov alebo identifikácii obetí. Všetky oblasti komerčného nasadenia biometrie sú charakteristické tým, že rozpoznávanie má automatizovanú formu a realizuje sa prevažne v režime verifikácie. Verifikácia predstavuje len jediné overenie zosnímaného odtlačku so vzorkou uloženou v databáze. Naopak identifikácia odtlačkami, ktorá je náplňou forenzného skúmania je oveľa zložitejšia úloha. Najdôležitejším kritériom je presnosť identifikácie, ktorá prebieha porovnaním jednej vzorky s celou databázou kandidátov na zhodu. V rámci kriminalistickej expertízy je identifikácia vykonávaná manuálne znalcami v oblasti daktyloskopie. Manuálne vyšetrovanie charakteristických znakov v odtlačkoch a ich porovnávanie je stále považované za najspoločnejší spôsob realizácie biometrie. Aby sme pochopili širšie súvislosti nielen obrazového predspracovania odtlačkov a extrakcie ich charakteristických vlastností, ale aj biometrického systému ako celku, je potrebné si opísť základnú koncepciu biometrických systémov.



Obrázok 1 Blokové schémy režimov činnosti biometrického systému
(Maltoni, D. et al.: *Handbook of Fingerprint Recognition*, 2009, s.4)

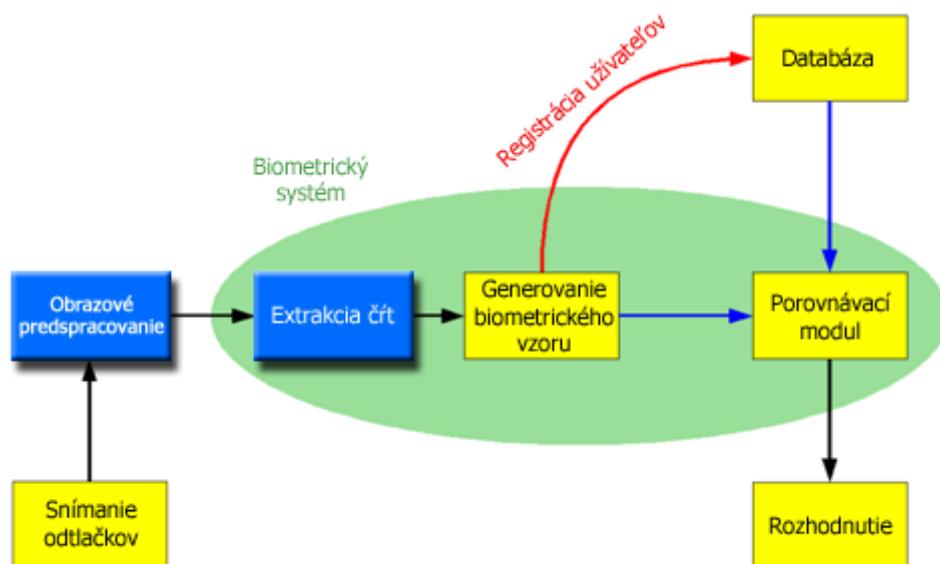
Biometrický systém je skupinou navzájom súvisiacich operácií, ktoré sú vykonávané s biometrickými údajmi od ich zosnímania až po rozhodnutie o rozpoznaní. Biometrický systém je kombináciou hardvérových a softvérových prostriedkov, ktoré umožňujú snímať, uchovávať, spracúvať a porovnávať odtlačky prstov za účelom rozpoznávania identity v rozumnom čase a pri optimálnej presnosti pre danú oblast použitia. Obrázok 1 so všetkými jeho sekciami znázorňuje zjednodušené blokové schémy práce biometrického systému v režime registrácie, verifikácie a identifikácie.

Zjednodušená ukážka práce biometrického systému vo fáze registrácie identity je na obrázku 1a). Podľa (Maltoni, 2009, s. 5-6) je biometrická registrácia proces, v ktorom je subjektu najprv zosnímaný a digitalizovaný odtlačok a následne je overená jeho kvalita, aby sme sa uistili, že v ďalších fázach budeme pracovať s neskreslenými údajmi. Technológie snímania a ich princíp činnosti je podrobnejšie rozpracovaný v (Marák, 2010, s. 24-32). Surové zosnímané dátá sú vstupom do modulu extrakcie, kde sa zmenšuje dimenzionalita dát a vyberajú sa špecifické dátá potrebné na objektívne rozpoznanie. V prípade odtlačkov prstov sa hľadajú polohy a orientácie daktyloskopických markantov. Tieto údaje sú uložené vo forme biometrických vzoriek v biometrických databázach. Takéto vzorky sú veľmi kompaktné, ale informácia, ktorá je v nich obsiahnutá má vysokú výpovednú a diferenciačnú hodnotu. K biometrickej vzorke sa priradí určitý identifikátor, ktorý spája vzorku s identitou subjektu a inými demografickými údajmi (Maltoni et al., 2009, s. 5). Po uvedení systému do prevádzky sa vzorky v databázach porovnávajú so zosnímaným odtlačkom, ktorý je prevedený do rovnakého formátu, v akom sú spomínané vzorky.

Proces verifikácie znázorňuje obrázok 1b). Subjekt najprv systému predloží svoju identitu napr. vo forme hesla, ktorá sa následne biometricky verifikuje. Subjektu je zosnímaný odtlačok, extrahujú sa z neho charakteristické vlastnosti a tie sú potom porovnané so vzorkou, ktorá je priradená predloženej identite. Systém teda vykoná iba jedno porovnanie a výstupom je rozhodnutie o verifikácii (Maltoni et al., 2009, s. 5).

Názornou ukážkou práce identifikačného biometrického systému je obrázok 1c). Tento mód biometrických systémov je používaný predovšetkým v kriminalistike. Identifikácia je náročnejšia ako verifikácia nakoľko systém musí hľadať vo veľkom množstve kandidátov, kde je vyššia pravdepodobnosť, že sa pomýli. Systém nevyžaduje predloženie identity. Subjektu sa zosníma odtlačok a prejde fázou extrakcie čít. Pri

objemných databázach obsahujúcich veľké množstvo registrovaných šablón je vhodné zúžiť výber možných kandidátov, aby sa tak minimalizoval čas potrebný na identifikáciu. Bežne sa to robí klasifikáciou odtlačku do niektorého zo základných daktyloskopických vzorov odtlačku. Nasleduje komparácia zosnímaného odtlačku 1:N, kde N predstavuje počet všetkých kandidátov spadajúcich do zvolenej klasifikačnej triedy v databáze. Prehľad aktuálnych metód porovnávania odtlačkov je dostupný v (Marák, 2010, s. 46-52). Vyhodnotená podobnosť (z angl. similarity score) medzi dvoma odtlačkami sa porovná so systémovou prahovou hodnotou, z čoho systém následne vyvodí záver o identifikácii (Maltoni et al., 2009, s. 5) alebo predloží usporiadany zoznam kandidátov podľa pravdepodobnosti zhody.



Obrázok 2 Základné činnosti biometrického systému spracúvajúceho odtlačky

Schéma na obrázku 2 ponúka iný pohľad na biometrický systém ako obrázok 1. Identifikuje základné funkčné bloky celého biometrického systému. Zdôrazňuje, že v mnohých situáciách je úloha biometrického systému zúžená len na proces extrakcie črt z odtlačku, tvorbu digitálnej biometrickej vzorky (z angl. template) a komparáciu vzoriek. Snímanie, obrazové predspracovanie a ukladanie biometrických dát do databázy je neoddeliteľnou súčasťou biometrického systému avšak tieto úlohy môžu zabezpečiť externé moduly.

Obsah tejto práce je zameraný na analýzu a implementáciu dvoch fáz činnosti biometrického systému (na obrázku 2 sú znázornené modrou farbou):

- obrazové predspracovanie odtlačkov
- extrakcia čír resp. charakteristických znakov z ich štruktúry

1. 2. 3 Obrazové predspracovanie odtlačkov prstov

Obrazové predspracovanie je v širšom slova zmysle chápane ako skupina techník, ktoré prevádzajú originálny obrázok odtlačku prsta určitými korekciami obrazovej štruktúry do formy vhodnej na odhalenie charakteristickej informácie, ktorá je prezentovaná zvláštnymi vzormi papilárnych línii v malých rozmeroch. Inými slovami sa v rámci predspracovania snažíme obnoviť kvalitu daktyloskopickej informácie od globálnych grafických vzorov až po charakteristické mikroobjekty. Tu je nutné rešpektovať ich prirodzené tvary a zoskupenia, aby nedochádzalo k modifikácii pôvodnej biometrickej informácie. Medzi techniky obrazového predspracovania patrí napríklad korekcia histogramu obrazu, aplikácia Gaborových kontextových filtrov alebo binarizácia farieb odtlačku.

1. 2. 4 Extrakcia charakteristických vlastností odtlačkov

Pod pojmom extrakcie myslíme v prípade odtlačkov prstov nachádzanie určitých tvarových nepravidelností v obrazcoch tvorených papilárnymi líniami. Úlohou extrakcie je vytvorenie špecifickej neopakovateľnej reprezentácie odtlačku, ktorá sa použije na komparáciu dvoch odtlačkov. Odtlačky prstov sa v súčasných biometrických systémoch zvyknú reprezentovať prostredníctvom daktyloskopických markantov, čo sú zriedkavé útvary papilárnych línii. Extrahované markenty sa potom rôznymi geometrickými korelačnými technikami porovnávajú a počítajú sa skóre podobnosti. Spoľahlivá detektia týchto útvarov je problematická hlavne pri odtlačkoch prstov s nízkou obrazovou kvalitou. Výstupom z fázy extrakcie je dátovo úsporná forma odtlačku, ktorá na rozdiel od celého obrázku odtlačku výrazne šetrí miesto na úložnom médiu. V rámci rozpoznávania sa nemusia extrahovať len informácie o markantoch, ale môžu to byť aj

iné vlastnosti odtlačkov ako sú daktyloskopický vzor, vektorové vyjadrenie smeru toku papilárnych línii, priemerná šírka papilárnych línii a iné. Tieto vlastnosti sú potrebné vo fázach klasifikácie odtlačkov do tried na zrýchlenie identifikácie alebo ich znalosť ulahčuje obrazové predspracovanie. Medzi extrahované údaje niekedy zaradujeme aj rozmiestnenie potných pôrov alebo obrisy papilárnych línii, čo sú detaľy mikroskopickej úrovne, ktoré poskytujú dostatočne osobité informácie avšak ich odhalenie v odtlačku je zatial v automatizovanej oblasti biometrie ťažkým problémom.

1. 3 Charakteristické vlastnosti odtlačkov

Teraz, keď už máme vytvorenú predstavu o všeobecnej problematike biometrie a biometrických systémoch pracujúcich s odtlačkami, upriamime pozornosť na jadro celej problematiky – odtlačok a analýzu jeho najdôležitejších vlastností. Uvedieme akú súvislosť majú daktyloskopické markanty a ich variabilita s výskumom jedinečnosti odtlačkov. Postupne analyzujeme dôležité atribúty odtlačkov prstov, klasifikujeme ich podľa ich súvisu s procesom identifikácie do troch úrovní a podrobnejšie charakterizujeme markanty ako hlavný objekt nášho skúmania. Rovnako vypracujeme špecifikáciu ich tvarových typov, ktorá nám poslúži ako dôležité teoretické východisko pri ich extrakcii z odtlačkov. Táto podkapitola vysvetluje zámer práce, opisuje hlavný objekt nášho skúmania a súčasne je analýzou základných teoretických východísk.

1. 3. 1 Štúdium jedinečnosti odtlačkov

Vo všeobecnosti kladie nevyriešený fenomén jedinečnosti odtlačkov otázku s dvoma tvárami: Aká informácia univerzálne nadobudnuteľná z odtlačku vykazuje známky jedinečnosti a aké je jej minimálne množstvo potrebné na objektívne zhodnotenie zhody medzi dvoma reprezentáciami odtlačkov? Tento problém riešia dva prístupy: kvantitatívny a kvalitatívny. Problémom je vytvorenie štatistického modelu, ktorý by adekvátne opisoval variabilitu konkrétnej vlastnosti odtlačku v populácii (Maltoni et al., 2009, s. 342). Z tohto modelu sa dá odvodiť pravdepodobnosť zhody vo vlastnostiach medzi dvomi ľubovoľnými odtlačkami vybranými z cieľovej populácie (Maltoni et al., 2009, s. 342). Väčšina AFIS systémov identifikuje ľudí na základe

informácií o markantoch – charakteristických tvaroch v odtlačku. Ich tvar, poloha a orientácia sú považované za dostatočne jedinečné informácie, ktoré odlišujú jedincov. Markanty sú v súčasnosti oporným bodom jedinečnosti odtlačkov a zdrojovými údajmi pre rozpoznávanie manuálnym alebo automatizovaným spôsobom. No je potrebné pripomenúť, že individualita odtlačkov prstov ešte nebola vedecky dokázaná. Automatizované systémy nevedia hľadať markanty v obrazcoch odtlačkov tak spoľahlivo ako kvalifikovaný znalec v oblasti daktyloskopie a takisto ich extrakčné moduly nerozlišujú medzi tvarovými typmi markantov, čo je nutné na posilnenie komplexnosti informácie v odtlačku (Pankanti et al., 2002, s. 1012).

Problém jedinečnosti odtlačku stojí na otázke, aká je pravdepodobnosť, že sa rovnaký komplex tvorený markantmi nevyskytne u dvoch alebo viacerých osôb? Podľa jedného zo zahraničných výskumov (Pankanti et al., 2002, s. 1010) je pravdepodobnosť, že sa dva rôzne odtlačky s 36 markantmi zhodujú v 12, vyčíslená na hodnotu $6,10 \times 10^{-8}$. V počiatkoch daktyloskopie sa rôzni bádatelia snažili dokázať nemožnosť výskytu zhodných odtlačkov. Francis Galton vo svojej publikácii dospel k záveru, že pravdepodobnosť výskytu rovnakých odtlačkov je 1:64 000 000 000 (Liška et al., 1982, s. 3). Medzi priekopníckymi názormi sa objavilo aj tvrdenie, že rovnaký obrazec papilárnych línii sa môže vyskytnúť len raz za 466 033 700 rokov (Liška et al., 1982, s. 3). Vo všeobecnosti obsahujú odtlačky prstov množstvo charakteristických dát, avšak ich kvalita neumožňuje tieto dátu vždy presne zaznamenať. Prioritným záujmom dnešnej biometrie je usilovať sa o objektívne závery obhajujúce jedinečnosť odtlačkov, aby táto technológia už nemusela čeliť takým výzvam ako to bolo v prípade súdneho procesu Byron Mitchell vs. USA (Maltoni et al., 2009, s.342). V tomto prípade bola spochybnená (síce neúspešne) daktyloskopická identifikácia dvoma tvrdeniami: nedostatočné vedecké posúdenie problému a neznáma chybovosť pri identifikácii. Najmodernejšie poznatky a prístupy, ktoré by mali smerovať k vedeckému podkladu jedinečnosti odtlačkov sú zosumarizované v kapitole *Fingerprint Individuality* v publikácii (Maltoni et al., 2009, s. 342-370).

Súčasná dôvera v jedinečnosť odtlačkov sa teoreticky zakladá na analýze vzácnosti výskytu jednotlivých typov markantov, pretože existujú rôzne tvary markantov, z ktorých nie každý je rovnako frekventovaný. Bežne sa pri daktyloskopickej expertíze musí v porovnávaných odtlačkoch nájsť zhoda určitého minimálneho počtu markantov, ktorých súčet identifikačných hodnôt prekračuje

stanovenú prahovú hodnotu potrebnú na vytvorenie objektívneho záveru o pozitívnej identifikácii. Identifikačná hodnota markantu je tým vyššia, čím je porovnávaný markant vzácnejší resp. je jeho výskyt zriedkavejší. Takýto model rozpoznávania, pri ktorom identifikácia závisí od počtu markantov, má prílastok kvalitatívny. Väčšina biometrických systémov rozpoznáva osoby len na základe 2 najbežnejších markantov: vidlica a ukončenie. Niektoré vzácnejšie markenty sa zanedbávajú pričom sa stráca charakteristická informácia. Nedostatok pozornosti venovanej výskumu v oblasti diverzity markantov a kompatibility výskumných záverov viacerých autorov dokumentuje aj fakt, že minimálny počet markantov potrebných na stanovenie identity je v rôznych štátach a ich kriminalistických laboratóriách rôzny.

Na území Slovenska sa kriminalistická daktyloskopická expertíza riadi kvantitatívnym modelom, v ktorom je na preukázanie pozitívnej identifikácie osoby potrebná zhoda minimálne v 10 a viac markantoch. Novodobým trendom v prístupe k identifikácii je kvalitatívny spôsob vyhodnotenia odtlačkov (Meteňko et al., 2010, s.2). V tomto prístupe nezohráva primárnu úlohu počet zhodných markantov, ale skôr ich kvalita resp. vzácnosť. Pri kvalitatívnom spôsobe je identifikácia závislá od druhu detailu, získaného z odtlačku, na základe ktorého vyhodnocujeme zhodu. Často býva tento princíp podložený štatistickým skúmaním závislosti početnosti alebo polohy jednotlivých typov markantov od polohy v papilárnom teréne, typu prsta, dlane (ľavá alebo pravá) alebo daktyloskopického vzoru (oblúk, vír alebo slučka). Vidíme teda, že je nutné rozlišovať medzi tvarovými typmi markantov, pre ktoré existujú v literatúre rôzne klasifikačné stupnice. Niekedy sa vyhodnocujú celé skupiny markantov, čo prináša analýzu viacozmerných súvislostí, ktoré nie sú odhaliteľné voľným sledovaním odtlačku. Kvalitatívny prístup môže zvýšiť presnosť identifikácie tým, že skúma úplne inú dimenziu odtlačkov, ktorá môže lepšie zachytávať ich jedinečnosť. Aby sme mohli vytvoriť pravidlá, pre kvalitatívny prístup k daktyloskopickej identifikácii, je potrebné extrahovať markenty z dostatočne veľkého súboru odtlačkov prstov a analyzovať ich vlastnosti. Moderné nástroje štatistiky ako sú zhluková, faktorová resp. diskriminačná analýza môžu odhaliť doposiaľ zanedbávané skutočnosti, ktoré môžu zvýšiť presnosť biometrických systémov. Aby sme však mohli analyzovať vlastnosti veľkého súboru odtlačkov, je potrebné vyvinúť automatizované počítačové riešenie extrakcie a rozlišovania ich tvarov.

1. 3. 2 Výskum charakteristických znakov odtlačkov na našom území

Aj u nás na Slovensku je vynakladané úsilie nahradíť zaužívaný kvantitatívny model identifikácie novým kvalitatívnym resp. vykonať revíziu zaužívaného modelu. Vďaka projektu Centrum excelentnosti Bezpečnostného výskumu, ktorého garantom je Akadémia policajného zboru v Bratislave, je možné aj na území SR viest' vlastný výskum v tejto oblasti (Meteňko et al., 2010, s. 2). Oddelenie daktyloskopickej identifikácie osôb KEÚPZ aktívne vedie túto výskumnú úlohu. Cieľom je formulovať nové pohľady na daktyloskopické skúmanie v podobe hlbšej analýzy a rozlišovania detailov malých rozmerov, vyhodnotiť štatistiku markantov na vzorke odtlačkov slovenskej populácie s úmyslom nahradíť resp. prehodnotiť zaužívaný model rozhodovania v daktyloskopickej identifikácii založený na minimálnom počte zhodných markantov. Motiváciou tohto výskumného projektu je zvýšenie úspešnosti identifikácie a efektivity manuálneho skúmania a doplnenie manuálneho skúmania o automatizáciu niektorých úloh. Špecifickým zameraním úlohy je na základe nových poznatkov o variabilite odtlačkov zvýšiť upotrebitelnosť nekvalitných latentných daktyloskopických stôp a prehĺbiť znalosti v oblasti identifikácie odtlačkami dlaní, ktoré takisto spadajú do kategórie latentných stôp a ich vlastnosti sú na našom území nedostatočne preskúmané (Meteňko et al., 2010, s. 2).

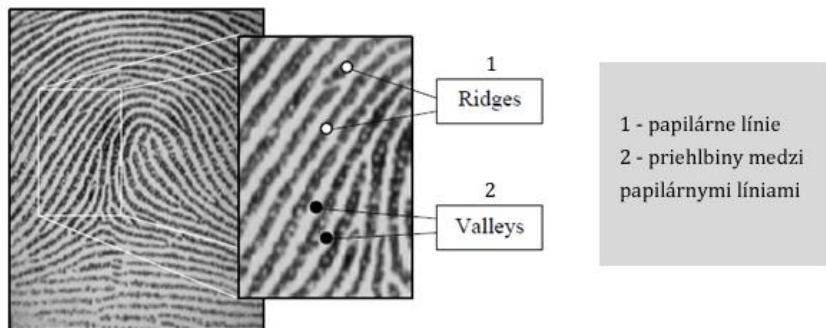
Zaužívaný kvantitatívny model jedinečnosti a daktyloskopického skúmania je publikovaný v odbornom článku (Liška et al., 1982), ktorý vydal v roku 1982 kolektív autorov z vtedajšieho Kriminalistického ústavu Veřejné bezpečnosti v Praze. Autori v ňom na základe vzácnosti výskytov jednotlivých tvarových typov markantov dospeli k záveru, že na individuálnu identifikáciu je potrebné nájsť v odtlačku 6 – 10 tvarovo zhodných a zhodne umiestnených markantov a to v závislosti na identifikačnej hodnote dostupných markantov (Liška et al., 1982). Na území SR je tento počet stanovený na 10 a viac markantov. Paradoxom v tomto prípade je fakt, že v historii daktyloskopie existuje aj prípad, kde bol zločinec identifikovaný len na základe 5 zhodných markantov (Liška et al., 1982, s. 16). Tabuľka s rozdelením markantov spolu s ich identifikačnými hodnotami, ktorá slúžila ako východisko pri ich výskume sa nachádza v prílohe D.

My sme sa rozhodli reagovať na túto výskumnú úlohu návrhom a implementáciou softvérového riešenia extrakcie markantov. Konkrétnie sme sa zamerali na daktyloskopické markanty, ktoré tvoria z topologického hľadiska 2. úroveň

detailov dostupných v odtlačkoch prstov. Na zachytenie variability markantov, sme implementovali metódy ako extrahované markanty rozlišovať podľa ich tvaru. Extrakcia markantov bola v rámci výskumnej úlohy prevedená na vzorke odtlačkov aj manuálne znalcami, aby sa dala overiť podobnosť s automatizovanou softvérovou extrakciou a identifikovať smery, v ktorých je potrebné algoritmus zdokonaľovať. Odborné konzultácie so znalcami na Oddelení daktyloskopickej identifikácie osôb KEÚPZ nám pomohli predovšetkým stanoviť tvarovú klasifikáciu markantov a vytvoriť algoritmus detekcie markantov, ktorý odráža niektoré techniky zaužívané pri manuálnom skúmaní.

1. 3. 3 Analýza grafickej štruktúry odtlačku

Štruktúra odtlačku je tvorená komplexným obrazcom vytvoreným z papilárnych línii, ktoré sa rozprestierajú po celej ploche spodnej časti posledného článku na prstoch. Pri lepšom skúmaní zistíme, že odtlačok je tvorený množinou jemných kožných vyvýšení, ktoré predstavujú hrebene papilárnych línii (z angl. ridges) a množinou priehlbín medzi nimi (z angl. valleys).



Obrázok 3 Hrebene papilárnych línii odtlačkov a priehlbiny medzi nimi
(Maltoni, D. et al.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. 2009. s. 97)

Morfologický proces tvorby papilárneho terénu počas vývinu ľudského plodu, výskyt papilárneho terénu na rôznych častiach ľudského tela a jeho biologický výskum je podrobne popísaný autormi v publikácii s názvom *Ridgeology* (Ashbaugh, 1999). V prílohe E pripájame ilustráciu štruktúry vrstiev kože na spodných stranách posledných článkov prstov. Ponúka zriedkavý pohľad na papilárne línie, vyznačuje rozhranie medzi vrchnou a spodnou časťou kože zodpovedné za tvar papilárneho obrazca a načrtáva systém vylučovania potu.

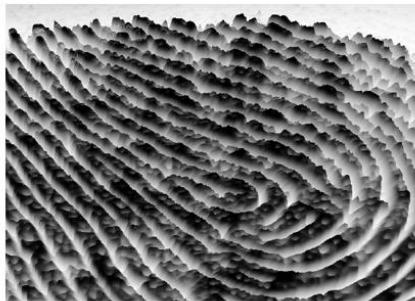
Hrebene papilárnych línii sú na zosnímaných digitálnych obrázkoch zastúpené tmavou farbou a priehlbiny medzi nimi sú zasa svetlé oblasti medzi nimi (Maltoni et al., 2009, s. 98). Priemerná šírka dvojice hrebeň-priehlbina je odhadovaná na hodnotu 500 μm (Maltoni et al., 2009, s. 98). Priemerná šírka papilárnej línie sa pohybuje od 100 μm až po 300 μm (Maltoni et al., 2009, s. 98). Usporiadanie vyvýšení a priehlbín sa zvykne nazývať aj papilárny terén. Spoločne tvoria komplikovaný vzor, v ktorom možno sledovať celý rad zaujímavých topologických vlastností a malých tvarových zvláštností.



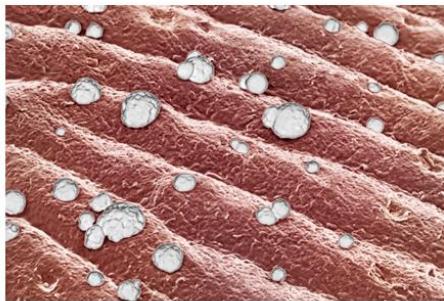
a) detail pokožky na brušku prsta



b) zosnímaná časť plochy 2D odtlačku



c) 3D model štruktúry odtlačku



d) papilárne línie a časticie potu

Obrázok 4 Povrch odtlačku z rôznych pohľadov

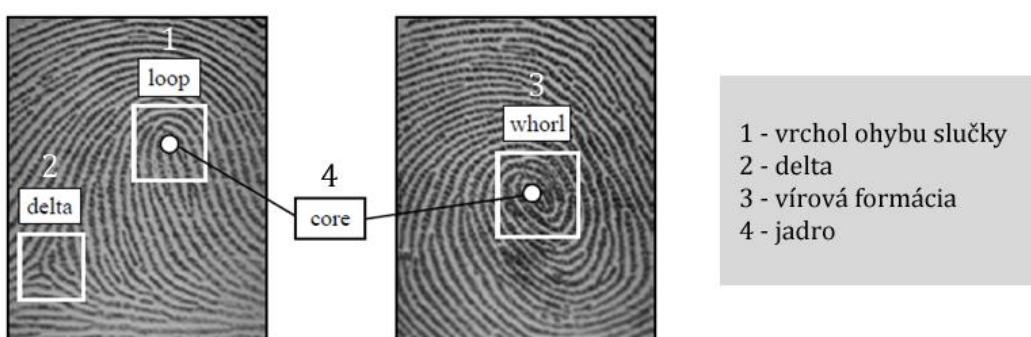
Pri vyššom stupni priblíženia povrchu prsta môžeme sledovať tzv. treťostupňové daktyloskopické detaily. Ich hlavným predstaviteľom sú potné póry, ktorých špecifické rozmiestnenie môže byť pri kvalitných obrázkoch odtlačkov využité na individuálnu identifikáciu. Hlboko v zamši sa nachádzajú potné žľazy vyučujúce pot, ktorý sa cez úzke kanáliky distribuuje až k potným pórom a dostáva sa na povrch kože. Pot usadený na rôznych materiáloch a povrchoch formuje latentné odtlačky, ktoré sú forenznými expertmi odobraté z miesta zanechania a sú podrobnené daktyloskopickej identifikácii. Obrázok 4d) je mikroskopickým pohľadom na potné póry a drobné množstvá vylúčeného potu.

1. 3. 4 Klasifikácia úrovni daktyloskopických vlastností

Daktyloskopia je v kriminalistike jedna zo základných a najspoľahlivejších metód identifikácie osôb. Argumentom v prospech tohto tvrdenia je aj to, že na miestach činu sa v zaistených stopách nachádza veľký podiel daktyloskopického materiálu. Daktyloskopia skúma tvary a vzory, ktoré sú vytvárané papilárnymi líniami v rôznych mierkach. V obrazci odtlačku rozoznávame 3 úrovne grafickej informácie.

Grafická informácia 1. úrovne

Prvotný dojem pri pohľade na vzhľad odtlačku zdôrazňuje súbežný tok papilárnych línii, ktorý je v niektorých miestach prerušený nadmerným zakrivením väčšieho počtu línii, chaotickou orientáciou alebo náhlym ukončením línii. Tieto globálne miesta nespojitosti sa nazývajú singulárne body (Maltoni et al., 2009, s. 98). Medzi singulárne body patrí vrchol ohybu slučky, delta a vírová formácia papilárnych línii. Delta je miesto v papilárnom teréne, kde sa zbiehajú papilárne línie z troch smerov do jedného bodu. Ďalším významným miestom v odtlačku je jadro. Je to stred odtlačkového vzoru, ktorý je často spojený so stredom singulárneho bodu (Maltoni et al., 2009, s. 98).



Obrázok 5 Singulárne body papilárneho terénu a jadro odtlačku
(Maltoni, D. et al.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. 2009. s. 98)

Na najvyššej úrovni grafickej informácie môžeme odtlačky klasifikovať do základných vzorových tried. Zvyknú sa označovať ako základný daktyloskopický vzor. Každý z týchto vzorov je definovaný špecifickou polohou singulárnych bodov. Existujú rôzne klasifikácie, ale klasifikácia do troch vzorov je najčastejšia. Medzi tieto vzory

patrí slučka, oblúk a vír. Slučka je vzor, kde z jednej strany odtlačku vbiehajú papilárne línie do stredu odtlačku otáčajú sa okolo jadra a vracajú sa späť (Maltoni et al., 2009, s. 236). Oblúk je tvar, v ktorom línie vchádzajú z jednej strany do centra obrazca, v ktorom sa oblúkovito ohýbajú a vychádzajú z obrazca na protiľahlej strane (Maltoni et al., 2009, s.236). Obyčajný oblúk neobsahuje žiadne delty. Vír je formácia papilárnych linií, ktoré sa vo víre alebo špirále točia v smere od jadra k okrajom odtlačku. Vír zvykne mať po oboch stranách deltu. Tieto základné vzory sú znázornené na obrázku 6.



Obrázok 6 Základné daktyloskopické vzory odtlačkov prstov

Oblúkový vzor sa v odtlačkoch vyskytuje aj v modifikovanej podobe. Jedná sa o oblúkový vzor, pod ktorým sa nachádza delta. V anglickej literatúre sa tento vzor označuje termínom „tented arch“. Slučka môže byť orientovaná doľava aj doprava. Na obrázku 6 máme slučku vychádzajúcu zľava. Hlavný vzor odtlačku niekedy obsahuje aj dvojitú slučku. Jedná sa o dve opačne orientované slučky, ktoré do seba zapadajú. Dvojitá slučka obsahuje deltu po obidvoch stranách rovnako ako vír. Veľmi zriedkavo sa stáva, že obrazec odtlačku obsahuje zmiešaný vzor, ktorý je kombináciou všetkých základných vzorov. Modifikácie základných vzorov sú na obrázku 7.



Obrázok 7 Tvarové modifikácie základných daktyloskopických vzorov

Grafická informácia 2. úrovne

V AFIS systémoch sú odtlačky klasifikované podľa hlavných daktyloskopických vzorov do niekoľkých tried. Táto klasifikácia urýchljuje proces identifikácie nakoľko znižuje počet kandidátov, ktorí sa musia porovnať s neznámym odtlačkom (Maltoni et al., 2009, s. 235). Samotný základný vzor odtlačku však nie je postačujúci na identifikáciu, ale je dostatočne postačujúci na vylúčenie zhody (Meteňko et al., 2010, s. 3). Ak sa pozrieme hlbšie do štruktúry obrazcov, objavíme prítomnosť malých nepravidelností v papilárnych liniách, ktorých distribúcia a poloha sú jedinečnou charakteristikou pre každého jedinca. Tieto sú stredobodom záujmu biometrických systémov a slúžia na identifikáciu. Existuje mnoho metód ako sa tieto kritické údaje dajú hľadať resp. extrahovať.

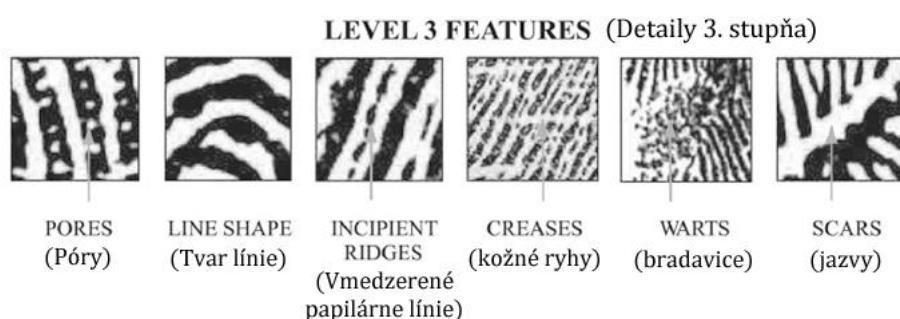
Tieto špecifické vlastnosti odtlačkov sú skúmané v rôznych vedných odvetviach. V kriminalistike ich poznáme zvyčajne pod názvom individuálne daktyloskopické znaky, druhostupňové detaily alebo markanty. V antropológii sa nazývajú minúcie. My sme si pri písaní tejto práce osvojili pojem markant. Markanty sú stavebným kameňom grafickej informácie 2. úrovne a zároveň podkladom jedinečnosti každého odtlačku. Vo svojej podstate je markant tvarovou anomáliou jednej papilárnej línie, prepojením dvoch linií alebo osobitnou konfiguráciou viacerých linií na veľmi malom segmente papilárneho terénu. Rozlišujeme viacero typov týchto nepravidelností. Najčastejšie sa vyskytujúcimi markantami sú ukončenia a vidlice. Prvý, kto začal rozlišovať medzi typmi markantov a nepovažoval ich len za nepodstatné poškodenia pravidelného obrazca odtlačku bol Francis Galton (Maltoni et al., 2009, s. 99).

Každý odtlačok obsahuje iný počet markantov a nedá sa stanoviť konštanta, ktorá by platila všeobecne. Odtlačky, ktoré máme v digitálnej forme zo zbierky KEÚPZ a použili sme ich na testovanie navrhnutého softvéru na extrakciu markantov obsahovali v priemere 96 markantov na odtlačok. Množstvo odtlačkov bolo snímaných odvalením a tak sa v nich nachádzalo viac markantov ako pri klasických kontaktných odtlačkoch. Christophe Champod so spoluautormi vo svojej publikácii *Fingerprints and Other Ridge Skin Impressions* uvádza, že priemerná hustota markantov v okolí singulárnych bodov je 0,49 markantu na 1 mm^2 a v oblastiach mimo singulárnych bodov je to 0,18 markantu na 1 mm^2 . Markanty nesú v ich tvarovej a polohovej rôznorodosti veľmi charakteristickú informáciu. Ako bolo spomenuté v časti 1.3.2, stačí aj malý počet

zhodných markantov v dvoch odtlačkoch (postačuje 6 až 10) na to, aby sa dal určiť pôvodca. Samozrejme, tento počet závisí od kvality odtlačku a rarity konkrétnych markantov. Keďže automatizované rozpoznávanie markantov je náplňou tejto práce, budeme tento problém rozoberať hlbšie v časti 1. 3. 5.

Grafická informácia 3. úrovne

V odtlačkoch rozlišujeme ešte jemnejšie detaily, ktoré charakterizujú papilárny terén. Tieto tzv. treťostupňové detaily zahŕňajú hlavne geometrické vlastnosti papilárnych línii ako sú jej hrúbka a obrysy, rozmiestnenie potných pórov, jazvy, škrabance a malé vmedzierené papilárne línie (z angl. incipient ridges) (Maltoni et al., 2009, str.101). V oblasti kriminalistiky sú vyvinuté dve analytické disciplíny, ktoré skúmajú 3. úroveň detailov: poroskopia a obrysoskopia. Poroskopia skúma využitie pórov na identifikáciu a obrysoskopia zasa hľadá možnosti uplatnenia geometrických vlastností obrysov papilárnych línii (Meteňko et al., 2010, s. 3). Rozmer pórov sa pohybuje v rozsahu od 60 µm až po 250 µm (Maltoni et al., 2009, s. 101). Zistilo sa, že priemerný počet pórov padajúcich na 1 cm dĺžky papilárnej línie je v intervale 9 až 18 (Maltoni et al., 2009, s. 101). V literatúre od Davida Ashbaugha (Maltoni et al., 2009, str. 101) sa dozvedáme, že na určenie identity postačuje 20 – 40 zhodných pórov. Znaky 3. úrovne sú veľmi malé a na ich zachytenie je treba senzory s vysokým rozlíšením (1 000 dpi a viac). Bežné senzory nespĺňajú toto kritérium a takisto chýbajú presné automatizované algoritmy na identifikáciu pórmu. Póry a geometrické atribúty papilárnych línii sú nádejnou technológiou biometrie a ich využitie v AFIS systémoch by malo byť jedným zo smerov ich rozvoja.



Obrázok 8 Grafické detaily 3. úrovne v daktyloskopických vzoroch
(Jain, A. et al.: *Pores and Ridges: High-Resolution Fingerprint Matching Using Level 3 Features*, 2007, s.16)

Odtlačky sú prakticky využívané na identifikáciu, teda poznáme ich využitie. Otázny je vznik papilárnych línii, ktoré sú „producentmi“ odtlačkov. Fyzická antropológia a biológia skúma zákonitosti vývinu papilárneho terénu avšak do dnešných dní ešte nepodala uspokojivé vedecké vysvetlenie (Kücken et al., 2005). Okrem toho, že obrazce papilárnych línii obsahujú užitočné informácie pre individuálnu identifikáciu, súvisia aj rôznymi genetickými poruchami jedinca ako sú napríklad Downov alebo Turnerov syndróm (Minkin, 2008). Vieme, že sa začínajú tvoriť v kritickom období embryonálneho vývoja, niekedy medzi 4. týždňom až 5. mesiacom (Minkin, 2008). Viktor Minkin, ruský odborník v oblasti biometrie, tvrdí, že finálny obrazec je odzrkadlením termodynamických procesov, ktoré ovplyvňujú skoré fázy formovania ľudského embrya a dokonca má spojitosť v povahou človeka (Minkin, 2008). Iné vysvetlenia a štúdie formovania papilárnych línii sú dostupné v knihe *Ridgeology* (Ashbaugh, 1999) alebo v publikácii od Michaela Kückena a Alana Newella s názvom *Fingerprint Formation*. V nej sa autori domnievajú, že obrazce papilárnych línii sú výsledkom rôznych tlakových síl pôsobiacich v spodnej vrstve pokožky a ich usporiadanie je určené geometriou povrchu bruška prstu.

1. 3. 5 Markanty a ich klasifikácia

Rozhodli sme sa venovať samostatnému kapitolu markantom pretože pochopenie ich významu v rámci biometrickej identifikácie a rozsahu tejto práce považujeme za kľúčové. Rovnako, v tejto časti definujeme klasifikačný systém, ktorý budeme používať pri extrakcii markantov v praktickej implementácii spolu s definíciou vlastností každého typu markantu kvôli jednoznačnému odlišeniu od iných typov.

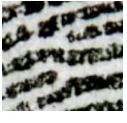
Jedna zo základných otázok bežného človeka pri téme biometria znie: Ktorá konkrétna charakteristika v biometrickej črte je natol'ko unikátna, že nás odlišuje od ostatných? (Pankanti et al., 2002, str. 1022). Teória a prax majú v prípade odtlačkov prstov prichystanú odpoved'. Je ňou daktyloskopický markant. Hovorili sme o ňom už v časti 1.3.4. Pojmom markant označujeme určitú tvarovú nepravidelnosť v papilárnom teréne odtlačku. V podstate sú to rôzne prerušenia, deformácie, vetvenia a premostenia papilárnych línii, ktoré sú dôsledkom turbulentných zmien formácie pokožkových útvarov na pokožke prstov počas vývinu ľudského plodu. Sú sotva viditeľné a rušia

spojitý a súbežný tok papilárnych línii, ktoré tvoria globálny obrazec. Deformácia spojitého toku je dôležitou vlastnosťou, ktorá sa využíva pri metódach ich extrakcie pretože predstavuje určitú výchylku v štruktúre odtlačku, ktorá signalizuje, že sme narazili na tvarovú zvláštnosť.

V tabuľke 1 uvádzame rozdelenie markantov, ktoré je pri daktyloskopickej identifikácii zaužívané na KEÚPZ a takisto bola rovnaká taxonómia použitá aj v prípade vedeckého výskumu variability markantov na vzorke španielskej populácie, ktorého výsledky sú prezentované v odbornom článku od autorov Gutiérrez, E. et al. (2007). Toto rozdelenie markantov sme použili ako špecifikáciu hľadaných útvarov v odtlačkoch. Okrem vizuálnej podoby markantov, uvádzame v tabuľke 1 aj krátke popisy daného markantu s vymedzením jeho osobitných vlastností. Pri niektorých označeniaciach markantov sme ponechali anglické názvy nakoľko sa len veľmi ľahko hľadal výstižný slovenský ekvivalent. Softvérové riešenie navrhnuté v rámci tejto práce je v súčasnosti schopné pri extrakcii rozlišovať medzi 5 najfrekventovanejšími markantmi, ktoré sa nachádzajú v prvých 5 riadkoch tabuľky (ukončenie, vidlica, fragment, izolovaný bod a jazero).

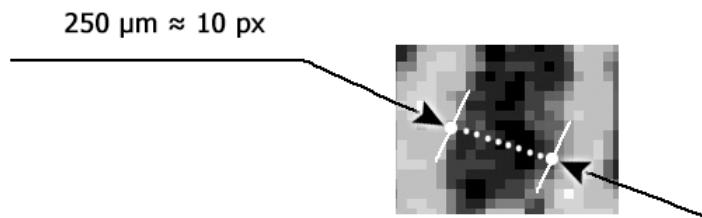
Tabuľka 1 Rozdelenie markantov podľa tvaru a ich špecifikácia

Tvar markantu	Názov markantu	Špecifikácia vlastností markantu
	Ukončenie	Prirodzené ukončenie papilárnej línie.
	Vidlica	Jedna papilárna línia sa v jednom bode rozdelí na dve samostatné línie.
	Fragment	Izolovaná papilárna línia s dĺžkou v rozsahu od 2 do 10 pórov.
	Izolovaný bod	Papilárna línia obsahujúca 1 pór.
	Jazero	Papilárna línia sa rozdvojí a maximálne do vzdialenosťi 10 pórov sa opäť spojí.

	„Break“	Konce papilárnych líní blízko oproti sebe (max. 5 pórov). Nie je to spôsobené jazvou.
	„Crossbar“	Dve papilárne línie prerušené tret'ou, ktorá prechádza krížom medzi nimi.
	Premostenie	Veľmi krátka papilárna lnia (cca. 1 pór), ktorá spája dve prilahlé línie.
	Protiľahlé vidlice	Dve opačne orientované vidlice, ktoré majú počiatok v jednom bode.
	Prekrytie	Prekrývanie papilárnych líní maximálne do dĺžky 10 pórov.
	Trifurkácia	Dve rovnako orientované vidlice majúce spoločný počiatok.
	Ukotvenie	Ukončenie papilárnej línie medzi dvomi líniemi zasahujúcimi maximálne do hĺbky 10 pórov.
	Otočenie	Otočenie a ukončenie papilárnej línie, ktoré nie je súčasťou stredu odtlačku.
	Háčik	Krátky výbežok z papilárnej línie maximálne do dĺžky 10 pórov.

V prípade nejasností v klasifikácii niektorých vzorov sme si vytvorili zopár pravidiel založených na určení základnej jednotky vzdialenosťi, ktorú sme použili na jasné definovanie niektorých markantov. Spomínanou jednotkou bola priemerná vzdialenosť medzi dvoma potnými pórmami, ktorú sme odhadli na 250 µm. Túto hodnotu sme odvodili od priemernej šírky papilárnej línie, ktorá je podľa (Maltoni et al., 2009, s. 97) odhadovaná na 200 µm. V praxi sme však často na testovacích vzorkách pozorovali väčšiu šírku a tak sme nás odhad zvýšili o 50 µm, aby viac vyhovoval našim testovacím

dátam. V práci (Thai, 2003, s.53) bola šírka papilárnej línie odhadnutá na úroveň 9,2732 obrazového bodu. Tento údaj bol vypočítaný ako priemerná šírka papilárnej línie odhadnutá z 5510 obrazových blokov o veľkosti 32×32 . Šírku línie a medzipórovú vzdialenosť sme považovali v rámci práce za rovnaké a nemenné hodnoty. Pri prepočte na obrazové body je $250 \mu\text{m}$ pri rozlíšení 1000 dpi približne 10 obrazových bodov, čo je hodnota blízka odhadu v (Thai, 2003). Šírka papilárnej línie je znázornená na obrázku 9.



Obrázok 9 Šírka papilárnej línie vyjadrená v obrazových bodech

Presná extrakcia je netriviálny problém, pretože ju stážujú problémy s kvalitou odtlačku alebo nedostatočnou definíciou tvaru markantu a algoritmus tak deteguje aj tie časti odtlačku, kde markant v skutočnosti nie je prítomný. Problémy s automatickou extrakciou markantov z odtlačkov prstov si všimli aj výskumní pracovníci z amerických ústavov pre technologické štandardy ANSI a NIST. Štandard pre dátový formát na výmenu biometrických údajov o odtlačkoch prstov ANSI/NIST-ITL 1 hovorí o klasifikácii markantov len do 4 tried. Sú to ukončenia línií, vidlice, zložené markanty (trifurkácie a premostenia línií) a nešpecifikovaný markant (Maltoni et al., 2009, s.99). Prax však hovorí, že v odtlačku možno pozorovať oveľa väčšiu variabilitu. Algoritmy AFIS systémov, ktoré vyhovujú tomuto štandardu tak zanedbávajú túto variabilitu. Súradnicový model markantov používaný FBI rozlišuje dokonca len 2 typy markantov a to ukončenie línie a vidlicu (Maltoni et al., 2009, s.99).

Vstupnými údajmi pre rozpoznávacie moduly AFIS systémov sú väčšinou tieto atribúty markantov (Maltoni et al., 2009, s. 99):

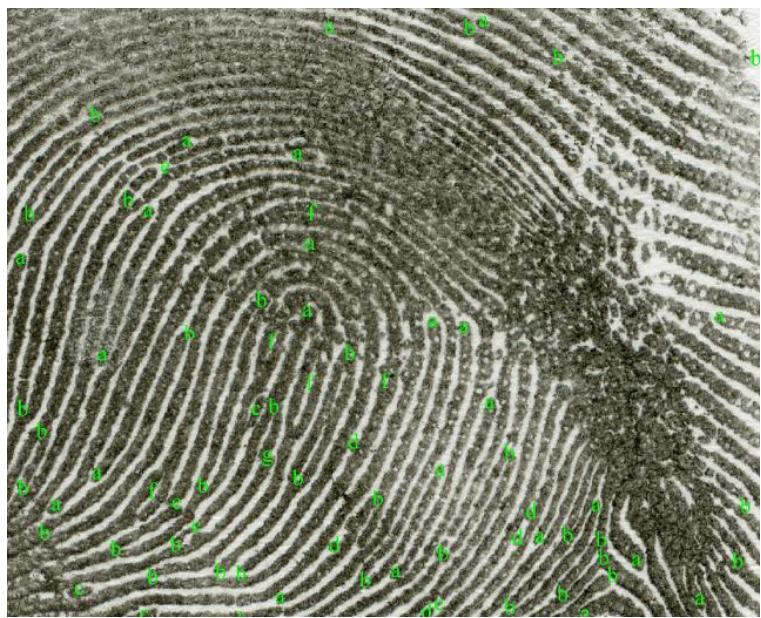
- tvarový typ markantu
- (x, y) súradnice markantu v papilárnom teréne
- orientácia markantu (uhol, ktorý zviera dotyčnica k papilárnej línií s osou x)

1. 4 Metódy predspracovania a obnovy obrazovej kvality odtlačku

Odtlačky sú málokedy vyhovujúcej kvality. Čím menší grafický vzor sa snažíme v odtlačku rozpoznať, tým komplikovanejšie sa vyhodnocuje pretože poškodená štruktúra papilárnych línii nám ho niekedy úplne znemožní nájsť. Zdrojom chýb pri extrakcii markantov môže byť viacero. Odtlačok nikdy nie je v ideálnom stave prispôsobenom na extrakciu. Jasná rozlíšiteľnosť tvarov papilárnych línii je kritická pre proces presnej extrakcie markantov (Thai, 2003, s. 3). Niekedy sa odtlačok vyhodnotí ako nevyhovujúci na identifikáciu lebo nie sme s dostatočnou istotou schopní získať údaje o markantoch, teda grafická informácia 2. úrovne nám neposkytne jej významný zdroj jedinečnosti. Nízka kvalita môže byť zapríčinená celou škálou faktorov. Spomeňme si niektoré zo zdrojov degradácie kvality, ktoré sú bežným javom v praxi:

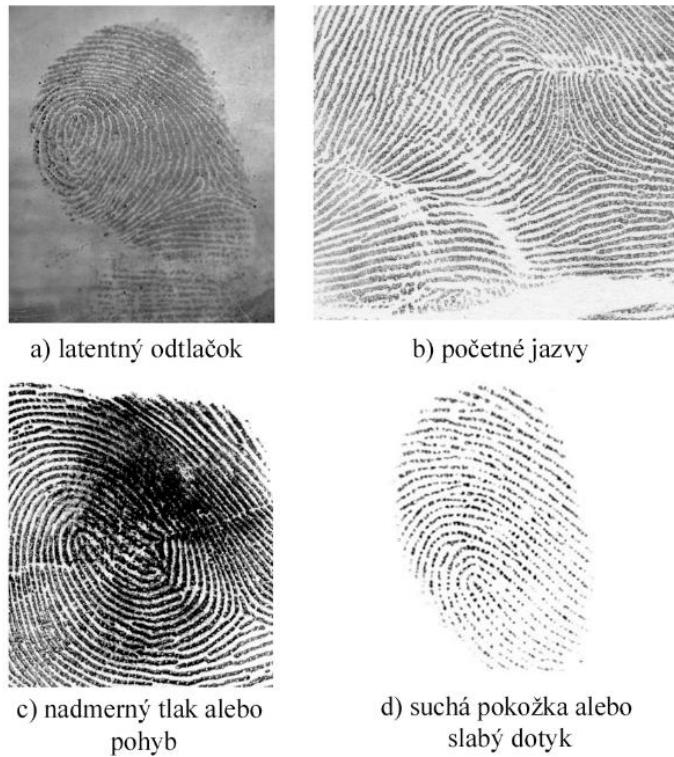
- nekompletný odtlačok (latentné daktyloskopické stopy)
- rozmazanie (vplyvom pohybu prsta na snímači)
- nadmerný alebo slabý tlak prsta na snímač (zanikajú prirodzené hranice medzi papilárnymi líniami, deformácia originálneho vzoru)
- trvalé poškodenie pokožky alebo kožná choroba
- dočasné poškodenie pokožky (jazvy, rezy, škrabance)
- nízke rozlíšenie senzora alebo vysoká obrazová kompresia
- stav povrchu prsta a senzora (mokrá pokožka, prachové častice na senzore)

Všetky tieto zdroje degradácie ovplyvňujú presnosť softvéru vykonávajúceho automatizované rozpoznávanie pretože pracuje s množinou extrahovaných dát, ktoré môžu byť skreslené. Ten by sa mal vedieť s problémami kvality odtlačku vysporiadať alebo aspoň označiť nevyhovujúce časti obrazu na spracovanie. Pri manuálnom vyšetrovaní odtlačku sa zvyknú poškodené časti odtlačku ignorovať, hlavne pri trvalom alebo dočasnom poškodení pokožky, kde vznikajú jazvy zavádzajúce umelé markanty. Obrázok 10 ukazuje označovanie markantov znalcem v poškodenom odtlačku. Markanty sú označené malými zelenými písmenami. Význam tohto značenia je uvedený v podkapitole 1.5.2. Z pravého dolného rohu sa ďahá úzka oblasť poškodeného papilárneho terénu, ktorá môže byť dôsledkom trvalého poškodenia pokožky alebo nadmerného tlaku pri snímaní.



Obrázok 10 Extrakcia markantov v poškodenom odtlačku

Ešte pred samotnou extrakciou, je teda nutné v záujme zvýšenia presnosti implementovať metódu obrazového predspracovania resp. sériu takýchto metód, ktorých postupné použitie vylepší štruktúru odtlačku a pripraví ho do podoby vhodnej na extrakciu markantov a iných vlastností. Musíme dávať pozor, aby sme po aplikácii rôznych filtrov nemodifikovali originál odtlačku natoľko, že sa zahladia tvary markantov. Na obrázku 11 uvádzame ukážky odtlačkov prstov nízkej kvality. Metódy obrazového predspracovania sú zamerané hlavne na úpravu obrazovej kvality a normalizáciu obrazových dát do vhodnej formy na hľadanie markantov. Raymond Thai vo svojej práci *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction* (Thai, 2003, s. 2) hovorí, že technika zlepšenia obrazovej kvality odtlačku sa používa pred extrakciou markantov, aby bol odhad pozícii markantov, čo najspoločnejšie. Naša voľba techník obrazového predspracovania bola usmerňovaná výsledkami jeho práce, taktiež zameranej na obrazové spracovanie odtlačkov a extrakciu markantov.



Obrázok 11 Ukážky odtlačkov prstov s oblastami nízkej kvality

V podstate všetky postupy, ktorých cieľom je zlepšenie viditeľnosti a zreteľnosti papilárnych línii modifikujú intenzitu obrazových bodov podľa ich priemerných hodnôt v malých obrazových blokoch alebo využívajú filtre, ktoré zohľadňujú smer a rozstupy papilárnych línii. Nemusia sa použiť všetky, ale všimli sme si že ich postupné použitie dosahuje lepšie výsledky ako ktorýkoľvek samostatný algoritmus. Medzi základné techniky obrazového spracovania, ktoré nachádzajú využitie pri odtlačkoch prstov radíme nasledujúce body:

1. Segmentácia dakyloskopického vzoru odtlačku
2. Odhad kvality papilárneho terénu
3. Normalizácia histogramu odtlačku
4. Aplikácia obrazových filtrov v priestorovom a frekvenčnom pásme
 - odhad lokálnej orientácie papilárnych línii
 - odhad lokálnej frekvencie papilárnych línii
 - iteratívne aplikovanie filtra na obrazové body
5. Adaptívna binarizácia
6. Zúženie hrúbky papilárnych línii

1. 4. 1 Segmentácia daktyloskopického vzoru odtlačku

Segmentácia globálneho daktyloskopického vzoru sa vykonáva bežne ako prvý krok pri obrazovom predspracovaní. Jedná sa o oddelenie pozadia obrázku od odtlačkového vzoru. Výsledkom je tak len časť obrazu, ktorá obsahuje papilárne línie. V takomto prípade sa zvyšuje efektívnosť ďalších krov obrazového spracovania nakoľko pracuje už len s obrazom, ktorý poskytuje užitočnú informáciu. Pozadie odtlačku je vlastne plocha snímača alebo papieru pri daktyloskopických kartáčach. Vyznačuje sa nízkou premenlivosťou intenzity obrazových bodov, pričom vo vzore odtlačku máme raz svetlé a raz tmavé obrazové body spôsobené striedaním papilárnych línií.

Postup pri segmentácii (Thai, 2003, s. 7):

1. Obraz je rozdelený do štvorcových blokov fixnej veľkosti a počítajú sa rozptyl šedej farby v každom bloku. Počet obrazových bodov pripadajúcich na dĺžku strany bloku je W . Veľkosť by mala byť volená tak, aby predstavovala približne 1-2 medzipapilárne vzdialenosť (Jain et al., 2000, s. 11).
2. Rozptyl úrovne šedej farby sa vypočíta podľa vzťahu (1).

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

- $V(k)$ je premenlivosť šedej farby pre blok k
- W je veľkosť strany bloku
- $I(i,j)$ je úroveň intenzity farby v bode so súradnicami (i,j)
- $M(k)$ je priemerná hodnota intenzity šedej farby v bloku k

1. 4. 2 Odhad kvality papilárneho terénu

Takisto ako sa dá odstrániť nadbytočné pozadie odtlačku, teraz sa budeme venovať odstráneniu nepoužiteľnej biometrickej informácie priamo v papilárnom teréne. Nie všetky časti obrazu sú obnoviteľné a použiteľné na extrakciu markantov. Rozhodli sme sa, že implementujeme nástroj, ktorý odhalí oblasti odtlačku, ktoré sú upotrebitelné vo fáze extrakcie. Nepoužiteľné časti papilárneho terénu nebudú filtrované a nebudú sa v nich hľadať markenty pretože sú zdrojom neistoty. Softvérové vyhodnotenie nepoužiteľných oblastí sme skontrolovali vizuálne a zistili sme, že dosahuje celkom uspokojivé výsledky.

Algoritmus, ktorý sme použili je založený na myšlienke prezentovanej v (Kekre et al., 2010). Autori tu navrhli postup pri detekcii jadra odtlačku, ktoré je charakterizované vysokou mierou zakrivenia papilárnych linií. Využíva sa tu tzv. koherenčná mapa, ktorá graficky vyznačuje miesta, ktoré sú smerovo konzistentné a tie, ktoré nemajú dominantný smer. Túto vlastnosť sme využili aj my na definovanie poškodených miest odtlačkov, ktoré takisto nevykazujú dominantný smer. Algoritmus v (Kekre et al., 2010) pracuje s gradientmi obrazu, ale my sme vytvorili nástroj, ktorý pracuje s lokálnymi orientáciami blokov a ich porovnávaním so susednými blokmi.

Postup pri implementácii nástroja na odhad kvality papilárneho terénu:

1. Najprv sme vypočítali lokálne orientácie blokov obrazu $\theta(i,j)$ so stredmi v bodech (i,j) . Spôsob výpočtu lokálnej orientácie je v časti 1.4.4.
2. Úroveň koherencie smeru v bloku sme vypočítali pomocou vzťahu (2), kde $\theta(\bar{i},\bar{j})$ bola orientácia susedného bloku D a N bol počet susedných blokov.

$$K(i,j) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{(\bar{i},\bar{j}) \in D} |\theta(\bar{i},\bar{j}) - \theta(i,j)|^2} \quad (2)$$

$$|\bar{\theta} - \theta| = \begin{cases} d & \dots ak(d = (\bar{\theta} - \theta + 360) \bmod 360) < 180 \\ d - 180 & \dots inak \end{cases}$$

3. Podľa hodnôt koherencie sme vykreslili koherenčnú mapu. Čím bola vyššia úroveň koherencie, tým konzistentnejšia bola orientácia papilárnych línii. Veľmi nízke koherencie sme považovali za obrazové body, ktoré patria oblastiam s nízkou kvalitou.

Výnimočne presný nástroj na detekciu nekvalitných oblastí odtlačku je prezentovaný v literatúre od autorov Fronthaler, H. et al. (2008). Na odlišenie netriviálnych tvarov v papilárnych líniah od šumu a kazov sa použilo niekoľko symetrických filtrov, ktorých tvar modeloval bežné tvary papilárnych línii a markantov. Eliminuje sa tak nedostatok vyššie popísanej techniky, ktorá na lokalizáciu málo zreteľných častí odtlačku využíva nekonzistentnosť smeru, ktorá je typická aj pre singularity a teda chybne využíva aj použiteľné časti odtlačku. Oblasti papilárnych línii, ktoré sa najmenej podobali týmto filtrov vykazovali atypické odozvy filtrov. Grafické znázornenie odozvy filtrov ukazuje mimoriadne presné označenie nekvalitných oblastí.

1. 4. 3 Normalizácia histogramu odtlačku

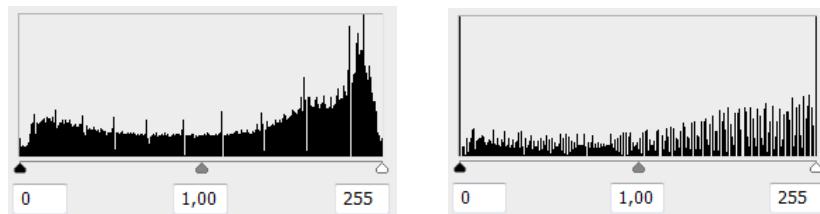
V odtlačkoch prstov môžeme sledovať oblasti, kde sú papilárne línie dobre definované, teda papilárne línie sú dostatočne tmavé a medzery medzi nimi sú dostatočne svetlé, čo vytvára ideálny kontrast. Kvôli nadmernému tlaku alebo vlhkosti pokožky sú niektoré časti obrazu také tmavé, že je problematické určiť hranicu medzi papilárnymi líniami. Keď je pokožka prsta suchá alebo sa pri snímaní aplikoval nedostatočný tlak, línie sú príliš svetlé a strácajú sa ich obrysy. Distribúcia farieb v histograme by mala byť rovnomerná, teda odtlačok by mal mať výrazný kontrast medzi svetlými a tmavými miestami. Je vhodné normalizáciu prevádzdať lokálne pretože každá oblasť odtlačku si vyžaduje adaptívny posun histogramu. Normalizácia vlastne redukuje rozptyl intenzít papilárnych línii, aby boli charakterizované vždy podobným rozsahom farieb. Jedným z často používaných riešení tohto problému je postup podľa (Thai, 2003, s. 7). Použitím vzťahu (3) dosiahneme rovnomerné rozloženie intenzity obrazových bodov v histograme. Pod vztahom sú doplňujúce vzorce pre VAR a M .

$$G(i,j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{VAR_0(I(i,j) - M)^2}{VAR}} & \text{ak je } I(i,j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{VAR_0(I(i,j) - M)^2}{VAR}} & \text{ak je } I(i,j) < M \end{cases} \quad (3)$$

$$VAR = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I(i,j) - M)^2$$

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

- $I(i,j)$ je intenzita šedej farby na konkrétnej súradnici (i,j) .
- $G(i,j)$ je normalizovaná úroveň šedej farby v bode (i,j) .
- M a VAR je odhadovaná stredná hodnota a rozptyl úrovne šedej v celom obraze.
- M_0 je požadovaná hodnota úrovne šedej farby.
- VAR_0 je požadovaná hodnota rozptylu úrovne šedej farby.



Obrázok 12 Úprava histogramu odtlačku do normalizovanej podoby

Na odstránenie drobných obrazových kazov alebo geometrických nerovností papilárnych línii, ktoré by mohli vo fáze zužovania hrúbky línii spôsobovať tvorbu umelých čiar, sme použili Wienerov filter. Tento nástroj je implementovaný priamo v prostredí Matlab2011b. Detailný opis tohto filtra je v (Greenberg et al., 2000). Na obrázku 12 vidíme ako normalizácia ovplyvňuje histogram odtlačku. Pred normalizáciou (vľavo) mal odtlačok histogram mierne posunutý do oblasti svetlých bodov. Po normalizácii (vpravo) zostali farebné intenzity rovnomerne rozložené po celom spektre.

1. 4. 4 Aplikácie kontextových obrazových filtrov

V tejto časti popíšeme Gaborove filtre, ktoré sa dajú použiť pri obrazovom spracovaní za účelom zvýšenia zreteľnosti papilárnych línii a potlačenia obrazových kazov. Táto technika je predstaviteľom priestorových (z angl. spatial domain) filtrov (Yang et al., 2003, s. 1805). Gaborov filter je tzv. kontextový filter, pretože jeho parametre sú odvodené od lokálneho grafického kontextu obrazca odtlačku. Tieto filtre modifikujú obrazovú informáciu podľa parametrov orientácie a frekvencie papilárnych línii odvodených z malých blokov obrazu. Gaborove filtre zvýrazňujú tok papilárnych línii v ich skutočnej orientácii a sú tak účinné pri eliminácii kazov a slabo zreteľných častí papilárneho terénu. Gaborov filter je na obraz aplikovaný po obrazových bodoch a tak je schopný obnoviť kvalitu najmenších detailov.

Gaborov filter

Tento druh filtra je aplikovaný priamo na normalizovaný odtlačok. Filter je parametrizovateľný podľa smeru a frekvencie a preto sa na jeho konštrukciu musia vopred vypočítať lokálne orientácie a frekvencie papilárnych línii v odtlačku. Filter predpokladá, že povrch odtlačku sa dá modelovať rovinou zvlnenou sínusoidou a tomuto predpokladu prispôsobuje svoj tvar, aby ešte viac zvýraznil tento sínusový priebeh. Avšak nie v každom segmente odtlačku je tento predpoklad pravdivý.

1. Odhad lokálnej orientácie papilárnych línii

Pod pojmom orientácia bodu (i,j) rozumieme uhol, ktorý zviera v bode (i,j) dotyčnica k papilárnej línií s osou x . V tejto fáze sa obraz transformuje na maticu štvorcových blokov, v ktorých sa počítajú smerové vektory papilárnych línii. Je to fundamentálny krok potrebný na nastavenie Gaborovho filtra, ktorý sa aplikuje na odtlačok. Využíva sa na to gradientová technika, ktorá využíva fakt, že gradient papilárnej línie je kolmý na smerový vektor papilárnej línie (Thai, 2003, s.4). Gradienty bodu v smere x -ovej a y -ovej osi sa počítajú ako parciálna derivácia obrazu v konkrétnom bode podľa jednotlivých premenných. Gradient určuje smer najväčšej zmeny zo svetlých oblastí do tmavých a rýchlosť tejto zmeny. Je to jedna z doposiaľ

najpresnejších metód odhadu smeru v odtlačku (Thai, 2003, s.8). Lokálny smer sa získá priemerom zo všetkých bodov bloku. Problémom je obrazový šum a poškodené časti obrazu, ktoré prispievajú do odhadu nesprávnej orientáciou. Výsledný obraz s kódovaním orientácií v obrazových blokoch sa nazýva smerová mapa odtlačku.

Podľa (Thai, 2003, s. 8) sa postup výpočtu smerovej mapy delí na nadväzujúce kroky:

- a) Nastavíme sa do stredu bloku o veľkosti $W \times W$. Stredový bod bloku má súradnice (i, j) .
- b) Pre každý bod v bloku so stredom v (i, j) vypočítame gradient δ_x a δ_y . Na výpočet δ_x a δ_y vytvoríme Gaussov filter o veľkosti $W \times W$. Vypočítame jeho gradienty v smere x a y použitím preddefinovanej funkcie Matlabu. Tieto gradienty postupne násobíme s intenzitami obrazových bodov. Tvar Gaussovej krivky zaručuje, že odhad smeru má dôraz hlavne v strede blokov. Gradient vyjadruje najväčšiu zmenu intenzity šedej farby v smere kolmom na okraj papilárnej línie (Wang et al., 2007, s.825). Teda reálne smery papilárnych línii sú kolmé na vektor gradienov.
- c) Orientácia bloku $\theta(i, j)$ sa pohybuje v rozsahu $[0, \pi]$. Vzťah (4) je vyjadrením priemernej orientácie bloku v smere x a vzťah (5) je vyjadrením priemernej orientácie v bloku v smere y . Konečný odhad orientácie bloku vypočítame zo vzťahu (6).

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} 2\delta_x(u, v)\delta_y(u, v) \quad (4)$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} \delta_x^2(u, v)\delta_y^2(u, v) \quad (5)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{V_y(i, j)}{V_x(i, j)} \quad (6)$$

- d) Pri väčších hodnotách rozmeru W dochádza k nespojitosťi smerov v susedných blokoch obrazu. Aby sme eliminovali tento nedostatok aplikujeme na obraz opäťovne Gaussov filter. Ešte predtým prevedieme vypočítanú smerovú mapu do matice, kde je každý prvok definovaný parametrom φ_x a φ_y . Výpočet matice je definovaný vzťahom (7).

$$\begin{aligned}\varphi_x(i,j) &= \cos(2\theta(i,j)) \\ \varphi_y(i,j) &= \sin(2\theta(i,j))\end{aligned}\quad (7)$$

- e) Po výpočte matice aplikujeme Gaussovské vyhľadzovanie v smere x (8) aj v smere y (9), aby sme dostali hladký odhad odolný voči minimálnym zmenám smeru spôsobeným nejasnou štruktúrou odtlačku. Funkcia $W(u, v)$ je nízko-priepustný Gaussov filter o veľkosti $w_\varphi \times w_\varphi$. Táto veľkosť hovorí o tom, koľko susedných blokov sa použije na výpočet priemernej orientácie v konkrétnom bloku..

$$\overline{\varphi_x}(i,j) = \sum_{u=-w_\varphi/2}^{w_\varphi/2} \sum_{v=-w_\varphi/2}^{w_\varphi/2} W(u,v) \varphi_x(i - uw, j - vw) \quad (8)$$

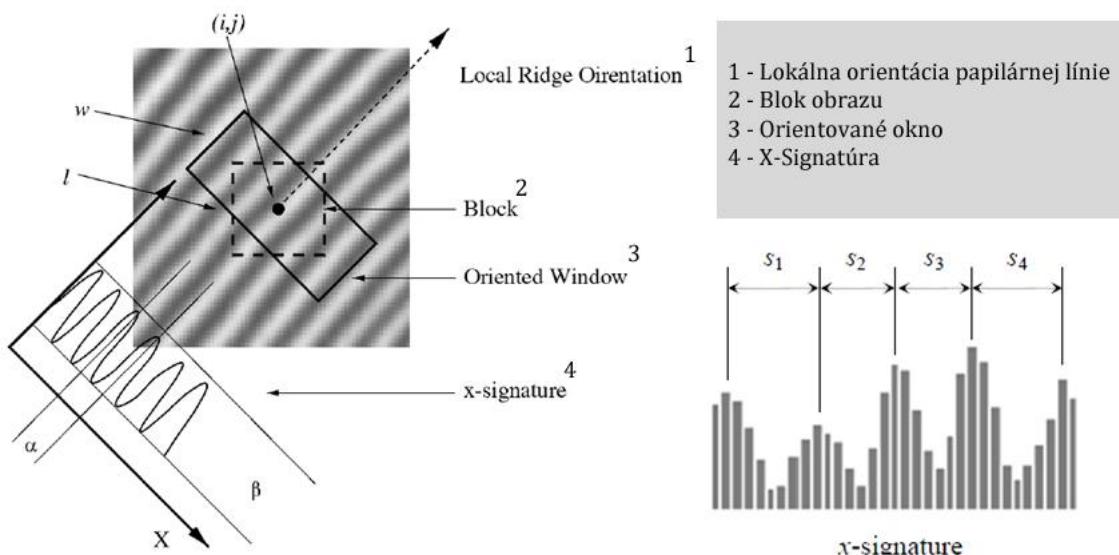
$$\overline{\varphi_y}(i,j) = \sum_{u=-w_\varphi/2}^{w_\varphi/2} \sum_{v=-w_\varphi/2}^{w_\varphi/2} W(u,v) \varphi_y(i - uw, j - vw) \quad (9)$$

- f) Konečná vyhľadená smerová mapa odtlačku sa získa výpočtom (10).

$$O(i,j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\overline{\varphi_y}(i,j)}{\overline{\varphi_x}(i,j)} \quad (10)$$

2. Odhad lokálnej frekvencie papilárnych línii

Ďalší parameter, ktorý je potrebný pre konštrukciu Gaborovho filtra je lokálna frekvencia papilárnych línii. Lokálna frekvencia hovorí koľko papilárnych línii pripadá na jeden obrazový bod (Maltoni et al., 2009, s.112). Vo výpočte lokálnej frekvencie využívame vlastnosť, že body papilárnych línii a medziera medzi nimi tvoria sílusový priebeh, kde vrcholy tohto priebehu patria papilárnym líniám. Znázornenie tohto tvrdenia je na obrázku 13. Aby sme získali vstupné údaje pre vizualizáciu týchto hodnôt, potrebujeme zbierať intenzity obrazových bodov v smere kolmom na lokálnu orientáciu papilárnych línii. Výstupom odhadu lokálnej frekvencie je frekvenčná mapa, ktorá kóduje frekvencie v malých blokoch odtlačku.



Obrázok 13 Princíp odhadu lokálnej frekvencie
(Hong, L. et al.: *Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation*, 1998, s.781)

Postup pri výpočte frekvenčnej mapy odtlačku (Hong et al., 1998, s. 781):

- Nech G je normalizovaný obrázok odtlačku a O je smerová mapa vypočítaná z odtlačku. Rozdelíme obrázok na štvorcové bloky o strane w .
- Pre každý stred bloku vytvoríme orientované okno o rozmere $l \times w$.

- c) Pre každý blok vypočítame vektor X , ktorý sa označuje aj ako $X-signatúra$ (11). Je to vlastne vytvorenie priemernej intenzity obrazových bodov v stĺpcach orientovaného okna.

$$X[k] = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} G(u, v), \quad k = 0, 1, \dots, l-1 \quad (11)$$

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

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

- d) Hodnoty $X-signatúry$ tvoria približne sínusoidu. Nech $\tau(i, j)$ je priemerný počet obrazových bodov medzi dvomi po sebe idúcimi vrcholmi $X-signatúry$. Potom sa frekvencia v bloku so stredom v (i, j) vypočíta zo vzťahu (12). Lokálna frekvencia sa pohybuje v rozsahu $<0,1>$.

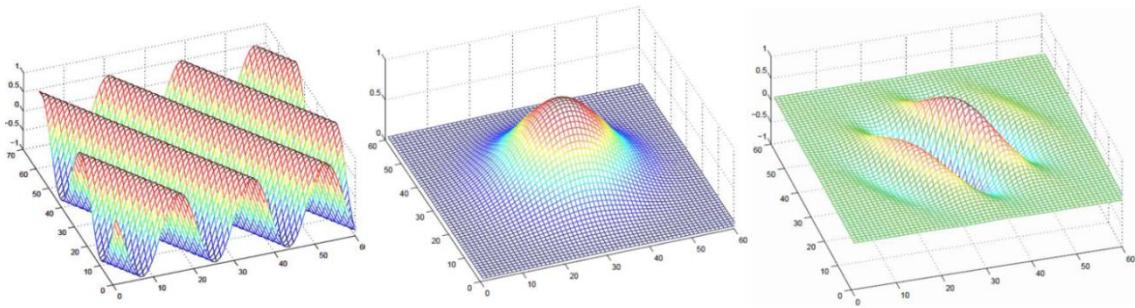
$$\Omega(i, j) = 1/\tau(i, j) \quad (12)$$

- e) Medzipapilárne vzdialenosťi sa medzi susednými blokmi mierne menia. Aby bol odhad frekvencie spojity použijeme dvojrozmerný nízko-priepustný filter W_l s veľkosťou w_l a s odchýlkou Gaussovej krivky $w_\Omega = 7$ dostaneme tak finálnu frekvenčnú mapu F (13).

$$F(i, j) = \sum_{u=-w_\Omega/2}^{w_l/2} \sum_{v=-w_\Omega/2}^{w_l/2} W_l(u, v) \Omega(i - uw, j - vw) \quad (13)$$

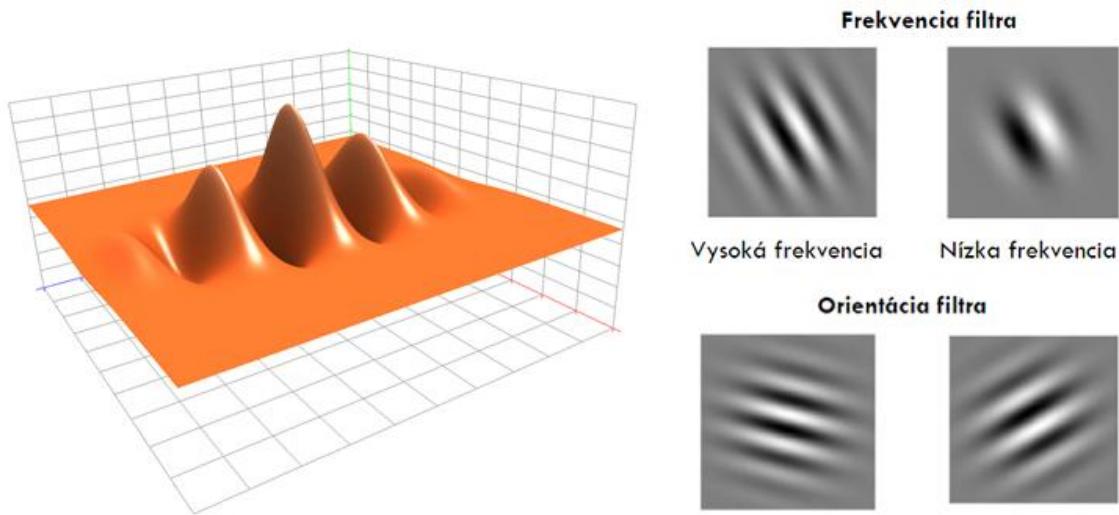
3. Použitie filtra

Na finálne filtrovanie obrazu sa použije konvolúcia 2D Gaborovho filtra so vzorom odtlačku. Má tvar roviny zvlnenej kosínusoidou s príslušnou orientáciou a frekvenciou. Sínusová vlna je modulovaná Gaussovou krivkou, ktorej odchýlky ovplyvňujú účinok filtra (Thai, 2003, s. 12).



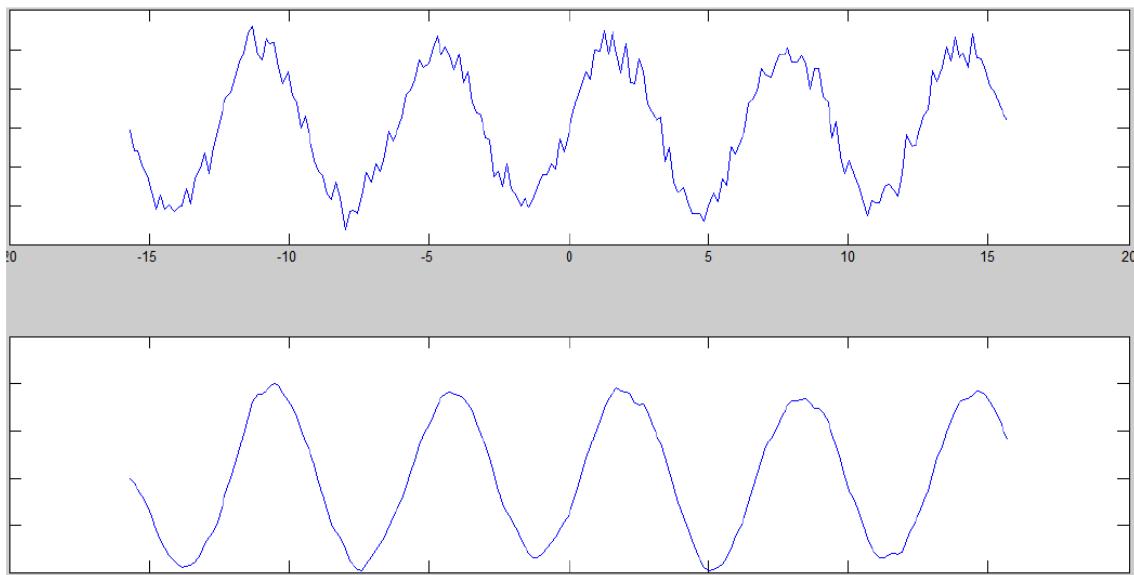
Obrázok 14 Komponenty Gaborovho filtra

Na pochopenie účinku Gaborovho filtra je nutné si odtlačok predstaviť ako 2D signál. Gaborov filter sa správa ako nízko-priepustný filter potláčajúci vysoké frekvencie, ktoré v odtlačkoch zodpovedajú najčastejšie drobným kazom. Na obrázku 16 vidíme v hornej časti prierez papilárny terénom odtlačku pred aplikovaním filtra a v spodnej časti po jeho aplikácii. Na druhej strane je to smerový filter, ktorý zvýrazňuje papilárne línie v smere ich odhadovanej orientácie. Znázornenie Gaborovho filtra v 3D aj 2D podobe je na obrázku 15.



Obrázok 15 Ukážka Gaborovho filtra

Gaborov filter má modifikovateľné frekvenčné a smerové parametre. Výsledky predchádzajúcich dvoch nám pomôžu parametrizovať jeho tvar v rôznych častiach obrazu. Výsledok použitia Gaborovho filtra je zvýraznenie smeru papilárnych línii v lokálnych smeroch a potlačenie ostatných smerov obrazových elementov. Tým sa stáva štruktúra a odtlačku zreteľnejšia a odstraňujú sa obrazové kazy. V niektorých oblastiach má filter tendenciu modifikovať originálnu informáciu, hlavne v zmysle markantov, ktoré sú dôležité pre extrakciu. V tomto smere je ešte potrebné použitie filtra vylepšiť.



Obrázok 16 Vyhladenie vysokých frekvencií Gaborovym filtrom

Gaborov filter má tvar (Hong et al., 1998, s. 784):

$$h(x, y : \phi, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_\phi^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\phi^2}{\sigma_y^2} \right] \right\} \cos(2\pi f x_\phi) \quad (14)$$

$$x_\phi = x \cos \phi + y \sin \phi \quad y_\phi = -x \sin \phi + y \cos \phi$$

$$\sigma_x = k_x F(i, j) \quad \sigma_y = k_y F(i, j)$$

ϕ je orientácia filtra, ktorá je odvodená zo smerovej mapy O a f je frekvencia filtra, ktorá je odvodená z frekvenčnej mapy F odtlačku. Parametre σ_x a σ_y sú odchýlky

Gaussovej krivky v smere x a y , ktoré sa volia manuálne alebo automaticky (Thai, 2003, s. 12). Čím vyššia je ich hodnota, tým bude filter lepšie eliminovať šum, ale na druhej strane bude viac tvoriť umelé papilárne línie. Čím sú hodnoty menšie, tým filter slabšie eliminuje šum, ale s menšou pravdepodobnosťou bude modifikovať skutočné papilárne línie. Je lepšie voliť odchýlky v závislosti od frekvencie línii, pretože tá nie je v odtlačku rovnaká. V (Hong et al., 1998) boli obe tieto hodnoty zafixované na úrovni 4,0.

Gaborov filter sa aplikuje na normalizovaný odtlačok násobením hodnôt obrazových bodov (Hong et al., 1998, s. 784), tak ako to vyjadruje vzťah (15). w_x a w_y sú rozmery masky filtra. V (Hong et al., 1998) boli oba parametre nastavené na hodnotu 11. Tento parameter je vhodné meniť v závislosti od odchýlok Gaussovej krivky (Thai, 2003, s. 14), aby sa veľkosť filtra dynamicky prispôsobovala frekvencii papilárnych línii. V (Hong et al., 1998) odvodili masku filtra ako 6-násobok odchýlky Gaussovej krivky. Označme obraz odtlačku po aplikácii filtra ako E , funkčnú hodnotu filtra ako h a obraz odtlačku ako G .

$$E(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_x}{2}}^{\frac{w_x}{2}} \sum_{v=-\frac{w_y}{2}}^{\frac{w_y}{2}} h(u, v : O(i, j), F(i, j)) G(i - u, j - v) \quad (15)$$

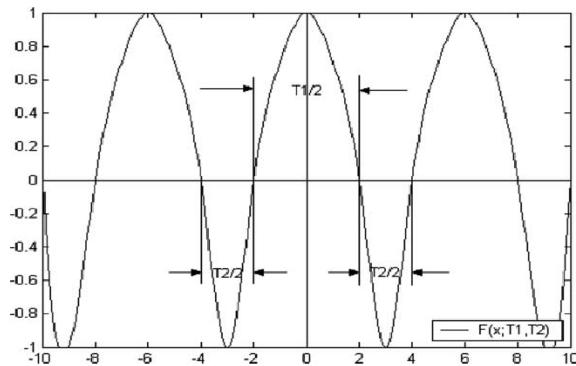
$$w_x = 6\sigma_x \quad w_y = 6\sigma_y$$

Kvalita filtra sa dá vyhodnotiť zmeraním presnosti extrakcie markantov bez a s aplikáciou filtrovacej techniky. Vyhodnotením kvality implementovaného algoritmu na zlepšenie obrazovej kvality odtlačku sa budeme zaoberať v časti s hodnotením výsledkov práce.

Modifikovaný Gaborov filter

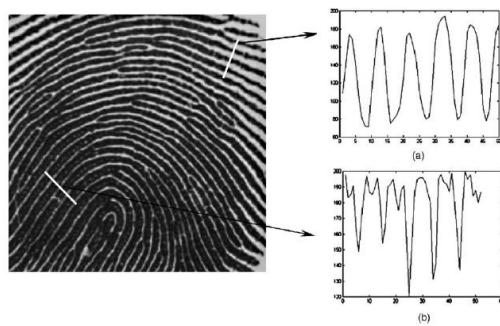
Autori v (Yang et al., 2002) analyzovali niektoré nedostatky pôvodného návrhu filtra a zavádzajú niektoré modifikácie, ktoré zlepšujú zachovanie originálnej štruktúry odtlačku. Autori vidia hlavný nedostatok pôvodného filtra v predpoklade, že papilárne línie tvoria vždy kosínusový priebeh (Yang et al., 2002, s.1806). Modifikácia spočíva v tom, že nahradzajú kosínusovú krivku periodickou funkciou zloženou z dvoch

kosínusových kriviek s rôznymi periódami. Táto vlastnosť umožňuje adaptáciu filtra na také oblasti odtlačku, kde nie je hrúbka papilárnej línie a medzery rovnaká. To umožní presnejšie modelovať povrch papilárnych línii a nezahľadzovať tak dôležité detaily ako sú markanty. Priebeh novej funkcie je na obrázku 17.



Obrázok 17 Nová periodická funkcia v modifikovanom Gaborovom filtro

Ďalším nedostatkom pôvodného filtra je, že autori v (Hong et al., 1998) pokladali veľkosť filtra za konštantnú a odhad odchýlok Gaussovej krivky bol zjednodušene odvodený od lokálnej frekvencie papilárnych línii (Yang et al., 2002, s. 1810). Odhad lokálnej orientácie v odtlačku zmenili z blokového odhadu na bodový odhad, čo bolo výpočtovo náročnejšie, ale presnejšie. Zaviedli nový systém odhadu parametrov T_1 a T_2 , čo sú periody novej funkcie. Takisto aj veľkosť masky filtra bola zmenená zo statickej na dynamickú kvôli premenlivej šírke papilárnych línii. Prispôsobovala sa aktuálnej frekvencii papilárnych línii. Na obrázku 18 vidíme ako vyzerá signál tvorený priebehom papilárnych línii. Vidíme, že v niektorých oblastiach sa nedá presne modelovať sínusoidou. V týchto oblastiach má Gaborov filter negatívny vplyv na pôvodnú štruktúru odtlačku.



Obrázok 18 Modelovanie papilárneho terénu sínusovým signálom
(Yang, J. et al.: *A modified Gabor filter design method for fingerprint image enhancement*. 2003. s. 1806)

Autorom modifikovaného filtra sa podarilo implementovať riešenie, ktoré vykazovalo lepšie výsledky v konečnom posúdení filtrovaných odtlačkov v porovnaní s pôvodným návrhom filtra. Ukázalo sa, že modifikovaný filter je účinnejší v oblastiach, kde je rozdiel medzi papilárnymi líniami menej zreteľný. Na obrázku 19 vidíme porovnanie výsledkov filtrov. Obrázok naľavo je originál odtlačku, obrázok v strede je ukážkou výsledku pôvodného Gaborovho filtra s parametrami $\sigma_x = 2,0$ a $\sigma_y = 4,0$. Obrázok vpravo je výsledok po aplikácii modifikovaného filtra.



Obrázok 19 Výsledky pôvodného a modifikovaného Gaborovho filtro
(Yang, J. et al.: *A modified Gabor filter design method for fingerprint image enhancement*. 2003. s. 1814)

1.4.5 Adaptívna binarizácia

Pri algoritnoch extrakcie markantov z papilárnych línii sa snažíme redukovať obrazovú informáciu do, čo najjednoduchšieho tvaru, aby sme mohli následne implementovať prehľadné algoritmy detekcie markantov. Binarizácia je proces, v ktorom obraz odtlačku prevádzame z 256 úrovní šedej farby len do dvoch farieb: čierna a biela. Sila binárneho obrazu spočíva v tom, že čierne body reprezentujú iba papilárne línie a biele body sú pozadie odtlačku. Pri týchto podmienkach vieme analyzovať okolie bodov papilárnej línie na určenie typu markantu.

Prvotné filtrovanie Gaborovym filtrom nám umožňuje spoľahlivejšie prevedenie obrazu do binárnej formy pretože body papilárnych línii obsahujú vždy rovnaký rozsah hodnôt intenzity obrazových bodov. Toto je v podstate hlavným problémom celej binarizácie. Správne určiť, ktorý obrazový bod patrí papilárnej líniu a ktorý je bodom

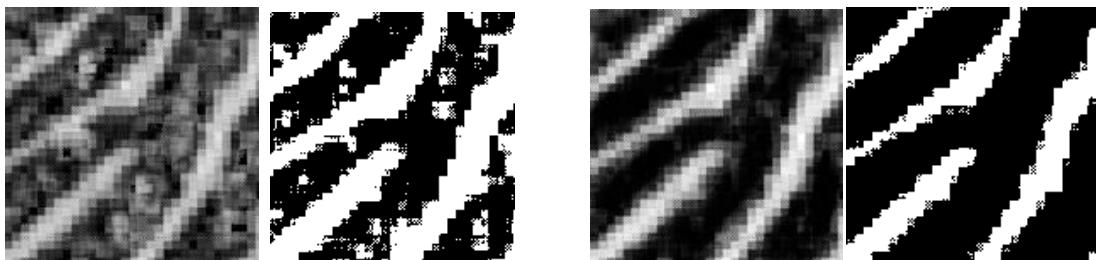
pozadia odtlačku. Na obrázku 20 je znázornená binarizácia papilárnej línie obsahujúcej šum a binarizácia farebne dobre definovanej papilárnej línie.

V literatúre rozoznávame dve základné metódy binarizácie odtlačku. Sú to globálne a adaptívne prístupy k problému. Pri globálnej binarizácii si strednú hodnotu intenzity obrazových bodov v celom obraze (Maltoni et al., 2009, s. 144). Postupne porovnávame všetky body s touto hodnotou. Ak má bod vyššiu intenzitu ako stredná hodnota, premení sa na biely bod. V opačnom prípade sa bod stáva čiernym. Fixná prahová hodnota vo všeobecnosti nestačí pretože odtlačok má v rôznych miestach rôzny kontrast. Aby sme zohľadnili lokálny kontext je nutné použiť adaptívnu binarizáciu, teda binarizovať farby porovnávaním s lokálnym priemerom (Maltoni et al., 2009, s.144).

Postup pri adaptívnej binarizácii obrazu (Greenberg et al., 2000, s. 230):

1. Obrázok odtlačku sa rozdelí na štvorcové bloky (autori použili veľkosť 50×50 obrazových bodov).
2. V každom bloku sa vypočíta priemerná hodnota intenzity odtieňov šedej farby a označí sa ako *Threshold*. Nemusí sa vždy počítať práve priemerná hodnota. Existujú rôzne metódy na výpočet prahovej hodnoty, ktorá sa použije na prevod obrazových bodov do binárnej formy. Jednou z najznámejších je Otsuova metóda.
3. Postupne sa binarizujú jednotlivé body použitím vzťahu (16)

$$I_{new}(n_1, n_2) = \begin{cases} 1 & \dots ak I_{old}(n_1, n_2) \geq Threshold \\ 0 & \dots inak \end{cases} \quad (16)$$

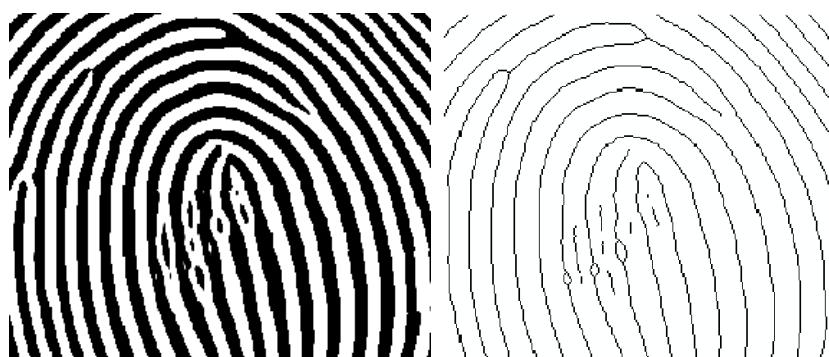


Obrázok 20 Výsledky binarizácie pri rôznych úrovniach kvality odtlačku

1. 4. 6 Zúženie hrúbky papilárnych línii

Posledným krokom pred samotnou extrakciou markantov je zúženie hrúbky papilárnych línii. Tento krok nasleduje potom, čo máme obraz prevedený do binárnej formy. Na riešenie tohto problému sme využili morfologickú funkciu programovacieho jazyka Matlab 2011b. Morfologická funkcia *bwmorph()* s parametrom „thin“ je založená na algoritme, ktorý postupne eliminuje obrazové body v smere kolmom na orientáciu papilárnej línie až pokial sa nedosiahne hrúbka jedného bodu (Thai, 2003, s. 15). Bližšie je tento algoritmus opísaný v dokumente (Zhang et al., 1996). Výsledkom zužovania hrúbky papilárnych línii je forma binárneho odtlačku pripravená na extrakciu, ktorú sme nazývali kostrou. Ideálnou vlastnosťou kostry je, aby všetky papilárne línie boli reprodukované ako súvislé čiary bez akýchkoľvek tvarových odchýlok.

Gaborov filter sa ukázal ako silný nástroj na potlačenie kazov ako sú drobné častice a geometrické nepravidelnosti pozdĺž okrajov a vo vnútri papilárnych línii. No niekedy bola kvalita obrazu taká nízka, že výsledok filtrovania vytvoril viaceré falošné útvary alebo neboli schopní zvýšiť zreteľnosť skutočných obrysov, ktoré museli byť zohľadnené počas extrakcie markantov. Na obrázku 21 vidíme vľavo odtlačok spracovaný Gaborovym filtrom a prevedený do binárnej formy. V strede odtlačku vidíme, že papilárne línie obsahujú diery a medzi nimi sa vyskytujú vmedzerené papilárne línie, s ktorými sa neboli schopní filter dostatočne vyrovnať. Na prvý pohľad neškodný detail sa v kostre (vpravo) naplno prejaví a algoritmus extrakcie takýto útvar môže označiť za reálny markant. Preto v záujme odolnosti voči týmto falošným útvaram je potreba implementovať zopár pravidiel na ich dodatočné vylúčenie z kostry. Týmto záležitostiam sa budeme venovať v časti 1.5.



Obrázok 21 Kostra odtlačku vytvorená z binárneho obrazu

1. 5 Metódy extrakcie markantov v odtlačkoch prstov

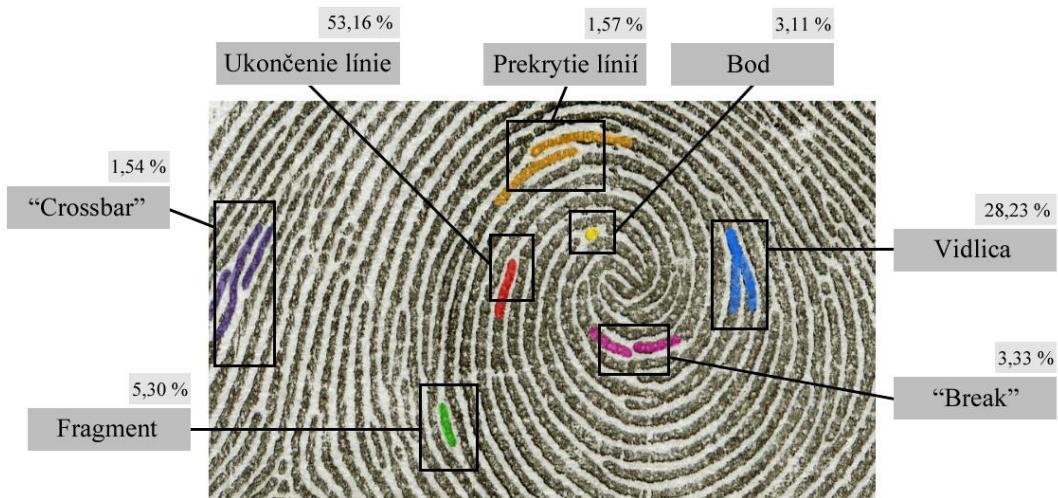
1. 5. 1 Význam extrakcie markantov v daktyloskopickej identifikácii

V tejto práci sa snažíme navrhnúť a implementovať automatizované softvérové riešenie, ktoré bude schopné spracovať digitálny obrázok odtlačku prsta a extrahovať z neho charakteristické body – markanty, ktoré sú využívané na daktyloskopickú identifikáciu. Rozlišovanie tvarových parametrov markantov predstavuje zaznamenávanie charakteristickej informácie, ktorú je nutné zohľadniť pri tvorbe kvalitatívneho modelu rozpoznávania. Extraktiou v našom ponímaní rozumieme lokalizáciu a následné klasifikovanie tvaru markantov, ktoré sú rozmiestnené v papilárnom teréne.

Extrakcia markantov je v súčasnosti realizovaná dvoma spôsobmi: automatizované a manuálne. Automatizované detegovanie markantov s použitím informačných technológií je rýchlym a v mnohých oblastiach spoľahlivým riešením. Tieto riešenia sú typické pre komerčnú sféru, kde je potrebné verifikáciu resp. identifikáciu subjektu vykonať, čo najrýchlejšie. Tento systém však naráža na mnohé problémy. Problémom je, že dostupné riešenia nie sú schopné rozlišovať medzi jednotlivými typmi markantov (všetky typy sú zlúčené do jednej triedy) a definovanie podmienok pre rozlišovanie markantov je zložité. Systém AFIS v súčasnosti používaný na KEÚPZ takisto nie je schopný rozlišovať medzi typmi markantov. Ďalším problémom je aj presnosť automatizovanej extrakcie. Stále najpresnejším spôsobom extrakcie zostáva manuálne skúmanie papilárneho terénu odborníkom, ktorý vie zohľadniť miesta, kde je odhad typu a polohy markantov dostatočne objektívny a kde je len hádaním. Manuálny spôsob hľadania a rozlišovania medzi markantmi je sice dostatočne presný, ale na druhej strane je to pomalý spôsob.

Kvôli lepšej predstave ako vyzerá reálne rozmiestnenie markantov v odtlačku prsta uvádzame obrázok 22, kde sú vyznačené niektoré typy markantov. Môžeme si všimnúť, že v niektorých oblastiach odtlačku je ich hľadanie pomerne jednoduché a v iných oblastiach je pomerne náročné kvôli komplexnosti okolitých tvarov. Vo výreze obrázku sa nenachádzajú všetky druhy markantov, ale len niektorí predstavitelia základných typov. Nad názvom markantu sa nachádza údaj o priemernej relatívnej frekvencii markantu v odtlačkoch. Toto číslo hovorí, koľko percent všetkých markantov

dostupných v odtlačkoch konkrétnej populácie tvoria markanty daného typu. Číselné údaje sme prevzali z výsledkov španielskeho výskumu zameraného na výskum biologickej variability markantov (Gutiérrez et al., 2007).



Obrázok 22 Ukážka extrakcie niektorých typov markantov v papilárnom teréne

1.5.2 Metodika overenia úspešnosti softvérovej extrakcie markantov

Aby sme vedeli správne vyhodnotiť tvary papilárnych líní a správne klasifikovali markanty je potrebná určitá skúsenosť alebo rada odborníka v daktyloskopii. Zdrojom inšpirácie a cenných rád bolo v našom prípade Oddelenie daktyloskopickej identifikácie osôb na KEÚPZ. Experti tohto oddelenia nám odovzdali mnohé informácie, ktoré vyplývajú z ich praxe pri vyšetrovaní a nemožno sa k nim dostať v literatúre. Oboznámili sme sa s procesom daktyloskopickej identifikácie a predovšetkým so špecifíkami papilárneho terénu, ktoré nám pomáhajú pri zaradení nájdených markantov do správnej klasifikačnej triedy. Výskum vlastností odtlačkov, o ktorom sme hovorili v časti 1.3.2 bude realizovaný automaticky prostredníctvom počítačového softvéru a je nutné aby mal informácie o markantoch v elektronickej forme. Úlohou nášho softvéru je zozbierať tieto údaje z odtlačkov na základe určitých topologických pravidiel. Aby sme mohli objektívne zhodnotiť úspešnosť extrakcie markantov je nutné navrhnutý softvér testovať. Kedže je manuálne expertízne vyhodnotenie odtlačku v súčasnosti považované za najdôveryhodnejší spôsob extrakcie

markantov, tak sme dosiahnuté výsledky našim algoritmom porovnali s výsledkami, ktoré boli dosiahnuté manuálne znalcom z prostredia daktyloskopie.

Mali sme k dispozícii testovaciu databázu 1 100 odtlačkov zo zbierky KEÚPZ v elektronickej podobe. Boli to odtlačky prstov 110 ľudí. Každý človek bol zastúpený v databáze 10 odtlačkami zosnímanými zo všetkých prstov oboch rúk. Odtlačky boli zosnímané v rozlíšení 1 000 dpi a mali priemernú dátovú veľkosť 1,5 MB. Skutočný objem celej databázy odtlačkov bol 1 570 MB. Kvôli časovej a výpočtovej náročnosti sme pracovali len s podmnožinou odtlačkov, ktorá tvorila 30 obrázkov. 15 obrázkov boli odtlačky pomerne dobrej kvality a 15 obrázkov boli odtlačky nízkej kvality, ktoré ani expert nevyhodnotil na celej ploche kvôli slabej zreteľnosti papilárnych línii.

V týchto odtlačkoch boli expertmi manuálne vyznačené markanty spolu s určením príslušnosti do klasifikačnej triedy podľa tabuľky 1. Množina expertom vyznačených markantov sa zvykne označovať anglickým termínom „ground truth“ (Zhao et al., 2005, s. 1278). Na manuálne vyhodnotenie bol použitý grafický editor Adobe Photoshop CS2. Aby sa dala testovať presnosť extrakcie určitého typu markantu, tak sa pri manuálnom označovaní použili obrazové vrstvy, čo je funkcionalitou už takmer každého moderného grafického editora. V rámci tabuľky 1 sme rozlišovali medzi 14 typmi markantov a tak každý obrázok odtlačku obsahoval 14 vrstiev s množinou graficky vyznačených polôh markantov. Jednotlivé vrstvy sa dali zneviditeľniť a tak sme si mohli vytvoriť podobu odtlačku, na ktorom bola viditeľná len jedna vrstva vyznačených markantov. Napríklad obrázok obsahoval celkovo 90 markantov, z toho 45 markantov boli vidlice. Úplne vyhodnotený odtlačok teda obsahoval 90 označení markantov, pričom každý typ bol farebne odlišený. Ak sme sa chceli pozrieť len na rozmiestnenie vidlíc, tak sme zneviditeľnili ostatných 13 vrstiev a nechali viditeľnú len vrstvu, na ktorej boli označené iba vidlice. Tento spôsob tvorby testovacích databáz pre jednotlivé typy markantov bol dosť komplikovaný a aj z toho dôvodu sme v konečnom dôsledku testovali úspešnosť algoritmu len na 30 odtlačkoch. Obrázok 23 ukazuje časť papilárneho terénu odtlačku vybraného z testovacej databázy s vyznačením markantov. Markanty boli v obrázku značené malými písmenami abecedy. Tvarové prototypy markantov a ich špecifikácie sú popísané v časti 1.3.5 v tabuľke 1.



Obrázok 23 Časť manuálne vyhodnoteného odtlačku odborníkom v daktyloskopii

Tabuľka 2 Vysvetlivky k manuálnemu označovaniu markantov

a	Ukončenie	b	Vidlica	c	Fragment	d	Bod	e	„Break“
f	Jazero	g	Prekrytie	h	„Crossbar“	i	Premostenie	j	Protiahlé vidlice
k	Trifurkácia	L	Ukotvenie	m	Otočenie				

Kvantitatívne vyhodnotenie úspešnosti extrakcie

Na kvantitatívne vyhodnotenie úspešnosti extrakcie markantov sme použili vzťah (17) – *index extrakcie markantov*. M_{Skut} predstavuje množinu skutočných markantov (ktoré v odtlačkoch vyznačil expert) nachádzajúcich sa v množine všetkých softvérovo extrahovaných markantov M_{Extr} . Je to podiel dvoch štatistických údajov, ktorý nadobúda hodnoty v intervale $<0,1>$. Hodnota 0 znamená, že softvér neodhalil žiadny markant označený expertom a hodnota 1 zasa hovorí, že všetky markanty odhalené softvérom boli označené aj expertom.

$$\text{Index extrakcie markantov} = \frac{M_{Skut.}}{M_{Extr.}} \quad (17)$$

Množina M_{Extr} obsahuje markanty všetkých 5 tvarov, ktoré softvér rozpoznáva. V rôznej literatúre sa zvykne hodnotiť úspešnosť extrakcie týmto spôsobom, ale názov ukazovateľa úspešnosti sa medzi autormi líší. Napríklad v literatúre od autorov Zhao et al. (2007, s. 7) je na vyhodnotenie úspešnosti použitý rovnaký vzťah ako (17), ale nesie názov *Accuracy Rate* (stupeň presnosti). Autori v (Cheng et al., 2004, s. 8) použili

názov *Accuracy of Minutiae Detection* a interpretujú ho ako podiel správne extrahovaných markantov v množine všetkých extrahovaných markantov.

Pri vyčíslení indexu extrakcie konkrétnych typov markantov sme namiesto člena M_{skut} použili hodnotu, ktorá reprezentovala počet skutočných odhalených markantov konkrétneho tvarového typu a za M_{Extr} sme dosadili počet všetkých markantov daného typu, ktoré našiel náš program. Navrhnutý softvér sme testovali bez použitia obrazového predspracovania aj s ním, aby sme vyhodnotili jeho dopad na štruktúru odtlačku a zhodnotili tak jeho prínos. Takisto sme porovnali index extrakcie pri obrázkoch nízkej a vysokej kvality.

Výsledky našej extrakcie sme porovnali aj s výsledkami v literatúre známych algoritmov extrakcie od autorov Zhao, F. et al. (2005), Maio, D. et al. (1997), Cheng, J. et al. (2004) a Kim, S. et al. (2001). Zhao, F. et al. prezentovali algoritmus extrakcie markantov, ktorý nehľadal markanty na základe analýzy papilárnych línií, ale skúmaním inverzného obrazu – medzery medzi papilárnymi líniemi. Túto myšlienku sme použili aj my pri hľadaní niektorých pravých a vylučovaní falošných markantov. Ich riešenie sa vyznačuje silným obrazovým predspracovaním zameraným na odstránenie niektorých falošných tvarov z odtlačku. Maio, D. et al. predložili algoritmus detekcie markantov založený na vyhodnocovaní vlastností odtlačku v odtieňoch šedej farby, teda markanty sa nehľadali v skeletonizovaných odtlačkoch. Cheng, J. et al. zasa navrhli algoritmus extrakcie predchádzaný úpravou odtlačku prostredníctvom tzv. Dyadic Scale-Space metódy. Kim, S. et al. zostrojili algoritmus extrakcie, ktorého silnou stránkou je eliminácia falošných markantov, ktoré vznikli ako nedostatok po zúžení hrúbky papilárnych línií.

Týmto porovnaním sme mohli zhodnotiť úroveň našej logiky a formulácie pravidiel na elimináciu skresľujúcich faktorov ako aj hľadania skutočných markantov v porovnaní s principálne odlišnými metódami. Avšak je nutné pripomenúť, že s týmito riešeniami sme mohli porovnať len úspešnosť extrakcie vidlice a ukončenia, nakoľko opísané algoritmy nevedeli rozlišovať iné typy markantov. Autori jednotlivých algoritmov extrakcie pri hodnotení dosiahnutých výsledkov použili 3 ukazovatele. Ich opis je dostupný v literatúre (Zhao et al., 2007, s. 8). Tieto ukazovatele sme vypočítali aj my, aby sme mohli porovnať výsledky nášho softvéru. V nasledovnom prehľade uvádzame opis použitých ukazovateľov.

Prvým ukazovateľom (18) bol pomer falošných markantov *False Minutiae* (%), ktorý sa vypočítal ako podiel medzi extrahovanými markantami, ktoré neboli označené expertom v pôvodnom odtlačku - M_F a všetkými extrahovanými markantami - M_E .

$$False\ Minutiae(\%) = \frac{M_F}{M_E} \quad (18)$$

Ukazovateľ (19) *Dropped Minutiae* (%) vypovedal o podiele markantov, ktoré boli označené expertom, ale boli vynechané softvérom - M_D a všetkými markantami označenými expertom - M_T .

$$Dropped\ Minutiae\ (\%) = \frac{M_D}{M_T} \quad (19)$$

Ukazovateľ celkovej chyby extrakcie (20) *Total error* (%) bol sumou predchádzajúcich dvoch ukazovateľov.

$$Total\ error\ (\%) = False\ Minutiae\ (\%) + Dropped\ Minutiae\ (\%) \quad (20)$$

1.5.3 Pravidlá pre rozpoznávanie špecifikovaných markantov

Existuje veľké množstvo charakteristických útvarov v odtlačku, ktoré môžu byť použité na rozpoznávanie osôb. Nás algoritmus vie zatiaľ rozpoznávať 5 markantov opísaných v tabuľke 1 v časti 1.3.5. V tejto časti definujeme pravidlá na detekciu týchto markantov, ktoré boli použité v softvérovej implementácii. Po tom, čo je odtlačok spracovaný Gaborovym filtrom, je prevedený do čierno-bielej formy a papilárne línie sú zúžené na hrúbku 1 obrazového bodu. Túto formu odtlačku nazývame kostra. Kostra je vlastne maticou bielych a čiernych bodov, v ktorej budeme rozpoznávať grafické vzory patriace daktyloskopickým markantom. Markanty majú variabilnú reprezentáciu, môžu byť imitované falošnými útvarmi a takisto je nutné rozlišovať medzi ich tvarmi. Potrebovali sme preto nájsť spôsob na ich detekciu.

Na riešenie tohto problému sme použili 3 nástroje:

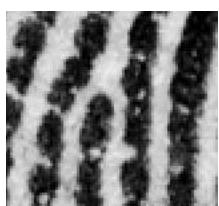
- Detekcia bodov, ktoré obsahovali tvarové nepravidelnosti (metóda Crossing Number).
- Analýza tvarových nepravidelností a ich porovnávanie s vlastnosťami prirodzených štruktúr (vzdialenosť L).
- Využitie vlastnosti duality papilárneho terénu na zjednodušenie detektie komplexnejších markantov a vylúčenie falošných markantov.

Na definovanie prirodzených vlastností sme použili jednotkovú vzdialenosť 10 obrazových bodov, ktorú sme v rámci práce označili ako L . Táto vzdialenosť bola približnou dĺžkou jedného stavebného bloku papilárnej línie, ktorý bol daný vzdialenosťou medzi dvoma po sebe idúcimi potnými pórmami.

$$L(\text{prahová hodnota}) = \mathbf{10 \text{ obrazových bodov}}$$

Na nasledujúcich stranách sme vypracovali prehľad charakteristík a pravidiel, ktoré sme použili pri automatizovanom hľadaní jednotlivých typov markantov. Je to hlavne opis ich tvaru, špecifikácia rozmerov a spôsoby ako ich bolo možné odlišiť od iných markantov. Tieto pravidlá sme premietli do implementácie algoritmu extrakcie.

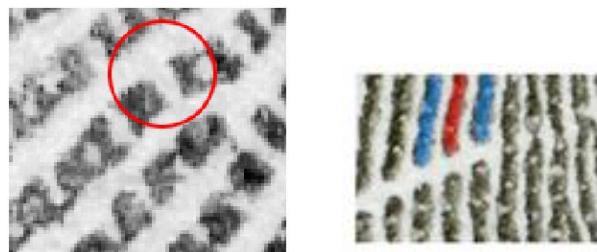
a) ukončenie papilárnej línie



Ukončenie papilárnej línie je podľa (Gutiérrez et al., 2007) najfrekventovanejším markantom v odtlačkoch prstov s približne 53 % zastúpením. Jeho detekcia je v odtlačku najjednoduchšia. Predstavuje ukončenie prirodzenej papilárnej línie. Tvar konca je väčšinou zaoblený. Prirodzenosť ukončenia je charakterizovaná aj tvarom susedných papilárnych línií. Pred ukončením sú od seba vzdialenejšie, no za miestom ukončenia sa k sebe približujú. Ak má jedna izolovaná a neprerušená papilárna línia svoje ukončenia od seba vzdialenosť viac ako $10L$, situácia sa vydelenie ako 2

samostatné ukončenia. V opačnom prípade sa línia označí ako fragment. Podobne sa vyhodnocuje aj prirodzený izolovaný bod, ktorý je takisto markantom. V kostre odtlačku sme ho definovali rozsahom $< L/2, L >$. Z usporiadania ukončení sú odvodené aj iné zriedkavé typy markantov, ktoré zatiaľ náš algoritmus nerozlišuje, napríklad "break", prekrytie línií, "crossbar" alebo ukotvenie.

Medzi zdroje umelých ukončení zaraďujeme nadrozumné potné póry, nerovnomerný kontakt papilárnej línie s plochou senzora alebo prítomnosť cudzích častíc v obraze. Tieto anomálie sme hľadali vo fáze eliminácie falosných markantov a overenia pravosti extrahovaných štruktúr, ktoré sú opísané v častiach 2.3.6 a 2.3.7. Na obrázku 24 je znázornený prípad, keď veľkosť potného póru vytvára umelé prerušenie papilárnej línie, čím vyprodukuje dve falosné ukončenia (červený krúžok). Hned' pod falosnými ukončeniami sa nachádza aj prirodzené ukončenie. Vpravo je umelé ukončenie (červené) spôsobené jazvou. Vidíme, že jeho susedné línie (modré) sa k sebe nepribližujú, čo jasne určuje, že sa jedná o falosný útvar.



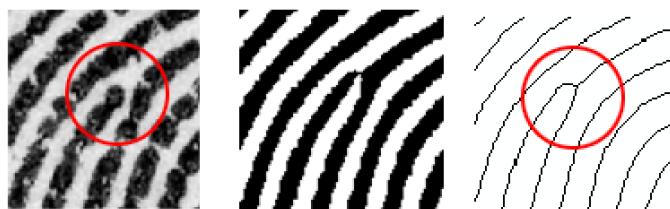
Obrázok 24 Ukončenie línie potným pórom a umelé ukončenie spôsobené jazvou

b) vidlica



Vidlica je miesto v papilárnom teréne, v ktorom sa jedna papilárna línia rozvetví do 2 samostatných vetiev. Je to druhý najčastejší markant s relatívou frekvenciou približne 28 % (Gutiérrez et al., 2007). Ak sa tieto dve nové línie opäťovne nespoja na maximálnej vzdialenosťi $10L$, tak je situácia posúdená ako vidlica. V opačnom prípade by sme vydelenili túto formáciu ako jazero. Vidlica je súčasťou aj niektorých iných tvarovo komplikovanejších markantov, ktoré náš algoritmus extrakcie zatiaľ nerozlišuje, napríklad premostenie, protiľahlé vidlice alebo trifurkácia. Falosné vidlice

sú v kostre odtlačku ako následok nezreteľnej štruktúry alebo chybné spojenie dvoch blízkych línií následkom aplikácie Gaborovho filtra. Obrázok 25 je príkladom, keď sú dve blízke papilárne línie (vľavo) po obrazovom spracovaní umelo spojené (v strede). V kostre tak vzniká dobre definovaná vidlica, ktorá je však falošná (vpravo).



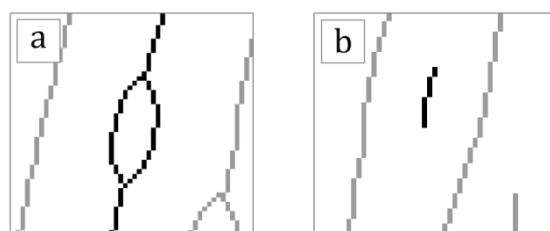
Obrázok 25 Umelé spájanie blízkych papilárnych línií

c) jazero



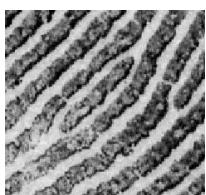
Jazero je markant, ktorý má relatívnu frekvenciu výskytu približne 2,35 % (Gutiérrez et al., 2007). Tento vzácny znak je tvorený usporiadaním 2 protiľahlých vidlíc. Jeho typická dĺžka sa pohybuje v rozsahu 2 až 10 medzipórových vzdialenosí, teda $< 2L, 10L >$.

Môžeme ho v obraze hľadať na základe dĺžky ramien jednej vidlice a následným overením ich opäťovného ukončenia alebo môžeme využiť vlastnosť duality obrazca odtlačku. Ak invertujeme farby kostry odtlačku, tak sa papilárne línie stanú bielymi medzerami a medzery budú vystupovať ako čierne papilárne línie. V duálnom obraze je jazero zastúpené krátkym fragmentom. Vlastnosť duality papilárneho terénu je na obrázku 26.



Obrázok 26 Tvar jazera v klasickej kostre (a) a v duálnej kostre (b)

d) Fragment

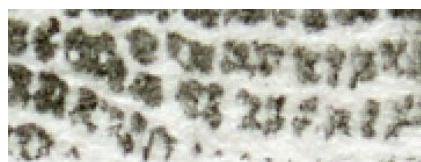


Tento typ markantu sa vyskytuje v papilárnom teréne v relatívnej frekvencii 5,30 % (Gutiérrez et al., 2007). Je definovaný ako izolovaná papilárna línia s dĺžkou v rozsahu $<2L, 10L>$. Susedné papilárne línie sa väčšinou k sebe na oboch koncoch fragmentu približujú. Umelé fragmenty môžu vzniknúť ako dôsledky jaziev alebo rozseknutím jednej línie na viacero častí. V prípade porušenej štruktúry odtlačku sa zvyknú vyskytovať tieto markenty vo veľkých počtoch na malých plochách, čo možno vylúčiť detekciou nadštandardnej hustoty výskytu markantov na malej ploche.

e) izolovaný bod



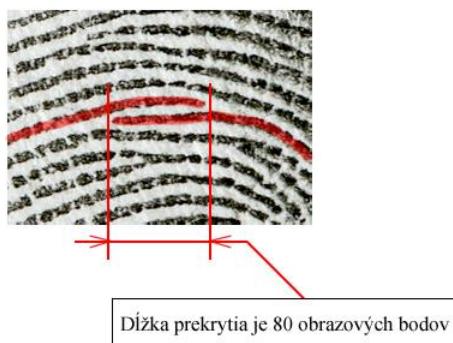
Izolovaný bod sa v papilárnom teréne vyskytuje s relatívnou frekvenciou 3,11 % (Gutiérrez et al., 2007). Jeho výskyt signalizuje aj tvar susedných línií, ktorých vzájomná vzdialenosť je vyššia na úrovni izolovaného bodu ako mimo neho. Falošný izolovaný bod dosť často vzniká v oblastiach, kde sú papilárne línie prerušované nadrozmernými potnými pórmami alebo rôznymi úrovňami kožných vyvýšení. Na obrázku 27 je zachytená situácia, keď v poškodenom papilárnom teréne vznikajú útvary veľmi podobné izolovaným bodom. Izolovaný bod sme definovali jeho rozmerom, ktorý sme stanovili v rozsahu $<L/2, 2L>$. Izolovaný bod teda predstavuje jednu stavebnú časticu papilárnej línie, ktorá by mala mať priestor na umiestnenie jedného potného póru.



Obrázok 27 Umelé izolované body v nekvalitných častiach obrazu

Videli sme, že všetky sledované markenty sú vytvorené kombináciami základných markantov: vidlica a ukončenie. Vzdialenosť L nám pomohla od seba odlišiť 5 markantov a identifikovať aj niektoré falosné útvary, ktorých výskyt znižuje presnosť extrakcie a skresľuje charakteristické vlastnosti odtlačku. V podstate, tým že sa v odtlačku nájdu všetky ukončenia a vidlice, tak sa označia všetky tvarové

nepravidelnosti a v kostre odtlačku zostanú len súvislé čiary. Ďalšia analýza okolitých konfigurácií základných markantov dodatočne určí ich tvarovú príslušnosť. Ako príklad môžeme uviesť situáciu ak sa extrahujú 2 ukončenia papilárnych línii tak na základe orientácie a vzdialenosť medzi nimi môžeme rozpoznať zriedkavé prekrytie papilárnych línii, ktoré sa v odtlačkoch vyskytuje s frekvenciou 1,57 % (Gutiérrez et al., 2007). Prekrytie by nemalo mať dĺžku viac ako $10L$, teda 100 obrazových bodov. Situácia je ilustrovaná na obrázku 28. V budúcnosti by sme chceli algoritmus rozšíriť aj o klasifikáciu ďalších vzácnejších markantov.



Obrázok 28 Prekrytie papilárnych línii a označenie jeho rozmeru

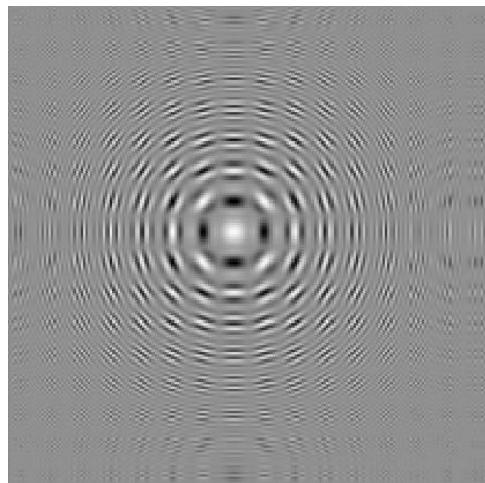
1. 5. 4 Lokalizácia markantov Gaborovym filtrom

Na lokalizáciu tvarových nepravidelností v toku papilárnych línii sa môže použiť aj meranie hodnôt odozvy Gaborovho filtra počas jeho aplikácie na obrazové body. Využíva sa vlastnosť merania odozvy Gaborovho filtra, ktorá je vysoká v miestach smerovej jednotnosti a nízka v oblastiach smerovej nejednotnosti akými sú markanty a singulárne body. Táto metóda, podrobne opísaná v (Lee et al., 2006), je obzvlášť užitočná pri lokalizácii markantov v poškodených odtlačkoch alebo v odtlačkoch zosnímaných pri nízkom rozlíšení. Jedná sa o grafické vyznačenie približnej polohy markantov bez ich rozlíšenia. Namiesto vyhodnocovania každého bodu papilárnej línie sa tak môžeme zamerať už len na oblasti, ktoré s vysokou pravdepodobnosťou prislúchajú pozíciam markantov. Zatiaľ využívame túto možnosť len experimentálne, teda lokalizácia markantov nie je funkčným blokom implementovaného softvéru. Avšak v budúcnosti by sme chceli tento nástroj zahrnúť do štruktúry softvéru a zhodnotiť jeho účinok.

Lokálny smer aj frekvencia je získaná z blokov odtlačku a tak je len minimálne ovplyvnená malými odchýlkami, ktoré bežne spôsobujú markanty. Gaborov filter je aplikovaný na väčšie bloky obrazu a preto nie vždy celá časť odtlačku vyhovuje jeho smeru a frekvencii. Gaborov filter obsahuje dva vrcholy Gaussovej krvky symetricky umiestnené v strede filtra a tie reagujú len na tie časti odtlačku, ktoré majú totožnú orientáciu a frekvenciu (Lee et al., 2006, s. 2).

Postup pri meraní odozvy Gaborovho filtra na odtlačok:

- 1) Najprv si vypočítame sadu Gaborovych filtrov pre určitý počet diskrétnych frekvencií a orientácií (Lee et al., 2006, s. 2).



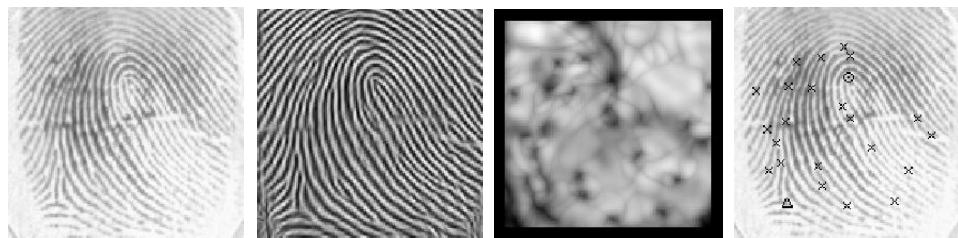
Obrázok 29 Množina Gaborových filtrov v 16 rôznych orientáciách a frekvenciách
(Lee, C. et al.: *Singular Points and Minutiae Detection in Fingerprint Images Using Principal Gabor Basis Functions*, 2006, s.2)

- 2) Pre obrazový bod (x, y) vypočítame pre každú diskrétnu frekvenciu (r, s) sumu odoziev $R(r, s)$ predvypočítaných filtrov všetkých orientácií (p, q) . I je blok obrazu a N_S predstavuje dĺžku jeho strany. Výpočet vyjadruje vzťah (21).

$$R(r, s) = \left| \sum_p^{N_S} \sum_q^{N_S} I(x, y) G_{pqrs}(x, y) \right| \quad (21)$$

- 3) Nájdeme maximum v množine odoziev $R(r, s)$, teda $\max[R(r, s)]$

Hodnoty $\max[R(r, s)]$ sú vysoké v častiach obrazu s rovnobežne plynúcimi papilárnymi líniami a naopak pri markantoch sú nízke. Aby Gaborov filter označoval tvarové nepravidelnosti patriace skutočným papilárnym líniam a bol odolný voči šumu, mala by sa jeho odozva merať až po obrazovom predspracovaní. Ukážku odozvy Gaborovho filtra na odtlačok vidíme na obrázku 30. Sú to vlastne vizualizácie hodnôt $\max[R(r, s)]$. Tmavé oblasti predstavujú singulárne body (delta a jadro) a markanty.



Obrázok 30 Vizualizácia odozvy Gaborovho filtra na odtlačok prsta
(Lee, C. et al.: *Singular Points and Minutiae Detection in Fingerprint Images Using Principal Gabor Basis Functions*, 2006, s.2)

1. 5. 5 Extraktia markantov použitím metódy Crossing Number

Najpoužívanejšie algoritmy detektie markantov sú založené na skúmaní štruktúry kostry odtlačku, ktorá obsahuje obrazec papilárnych línii o hrúbke 1 obrazového bodu. Techniky zúženia hrúbky širokých papilárnych línii s nepravidelnými obrysami sú veľmi citlivé a zavádzajú do kostry mnohé umelé papilárne línie vedúce k detekcii nepravých markantov. Umelé papilárne línie sa dajú rozdeliť do základných tvarov a určením topologických pravidiel sa dajú z obrazu vyfiltrovať. Naše softvérové riešenie sme takisto rozšírili o detekciu a elimináciu umelých papilárnych línii.

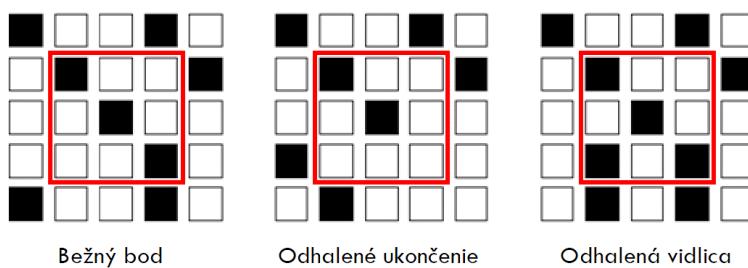
V rámci celého algoritmu extrakcie markantov sme ako prvý krok spracovania kostry implementovali metódu *Crossing Number (CN)*, ktorá je špecifikovaná v (Maltoni et al., 2009, s. 149). Kostra odtlačku obsahuje len dve hodnoty 0 (papilárne línie) a 1 (medzery). Táto technika obnáša stopovanie papilárnych línii a vyhodnocovanie okolia každého ich bodu. Označme bod kostry ako p . Hodnota CN pre vyšetrovaný bod predstavuje počet prechodov z $p = 0$ do $p = 1$ v jeho susedstve,

ktoré obsahuje 8 bodov. Matematické vyjadrenie CN je podľa (Maltoni et al., 2009, s. 149) dané vzťahom (22). Funkcia $val(p_i)$ vracia hodnotu obrazového bodu p_i . Pri stopovaní papilárnych línií postupne prechádzame všetky body $p = 0$ a počítame ich hodnotu CN . Môžu nastať tieto situácie:

- $CN = 0$, objavili sme izolovaný bod
- $CN = 1$, objavili sme ukončenie papilárnej línie
- $CN = 2$, objavili sme priebežný bod papilárnej línie
- $CN = 3$, objavili sme rozdvojenie papilárnej línie
- $CN > 3$, ignorované body

$$CN(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1 \dots 8} |val(p_{i \bmod 8}) - val(p_{i-1})| \quad (22)$$

Na obrázku 31 vidíme zopár ukážkových bodov v kostre odtlačku (umiestnené v strede matíc), ktorých CN odhalilo bežný bod papilárnej línie a), ukončenie b) a vidlicu c).



Obrázok 31 Vyhodnotenie okolia obrazového bodu metódou CN
(Maltoni, D. et al.: *Handbook of Fingerprint Recognition: Second Edition*, 2009, s. 150)

Potom, čo sme vyšetrili všetky body papilárnych línií a na základe hodnoty CN sme ich priradili buď k vidlici alebo ukončeniu, sme mali k dispozícii všetky reálne markanty (okrem tých, ktoré boli nenávratne stratené v predchádzajúcich fázach spracovania odtlačku) a tiež aj množinu falosných markantov.

2 NÁVRH RIEŠENIA A DISKUSIA K DOSIAHNUTÝM VÝSLEDKOM

2.1 Navrhnuté fázy riešenia problému zadania práce

Na zachytenie variability papilárneho terénu v zmysle rozlišovania tvarov markantov nestačí vytvoriť len samostatný systém na extrakciu špecifikovaných tvarov priamo v originálnom odtlačku. V praxi sa stretávame s odtlačkami, ktorých kvalita je často nevyhovujúca na spoľahlivé hľadanie markantov a teda celý proces identifikácie môže z dôvodov nízkej obrazovej kvality zlyhať. Preto sme sa rozhodli pred fázu extrakcie markantov zaradiť softvérový modul na obrazové predspracovanie odtlačku resp. obnovu štruktúry odtlačku. Do tohto modulu sme integrovali niektoré osvedčené techniky, ktoré sú často využívané v biometrických systémoch. Návodom pri ich implementácii nám boli teoretické východiská formulované v časti 1.4, ktorá celým svojim obsahom pokrýva problematiku obrazového predspracovania odtlačkov. Poradie výkonu jednotlivých krokov, ktoré tvoria celý modul obrazového predspracovania sme volili na základe analýzy požiadaviek na vstupy a výstupy jednotlivých krokov. Použité poradie týchto techník transformuje obrázok odtlačku z originálnej podoby do podoby vhodnej na extrakciu markantov a ošetrenej o niektoré zdroje degradácie obrazovej kvality. Na obrázku 32 vidíme schému modulu obrazového predspracovania s jednotlivými krokmi radenými v poradí v akom sa skutočne vykonávajú.



Obrázok 32 Schéma obrazového predspracovania odtlačku

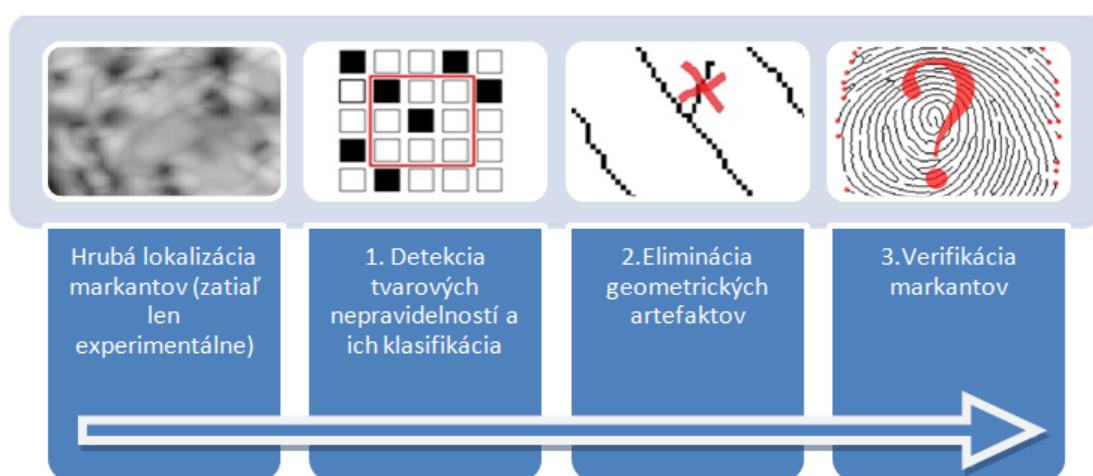
Charakteristika jednotlivých krokov obrazového predspracovania:

1. **Segmentácia daktyloskopického vzoru** je technika, ktorá na základe merania atribútov obrazu ako priemerná hodnota a rozptyl šedej farby priraduje body obrazu buď daktyloskopickému vzoru papilárnych línii alebo pozadiu odtlačku. Takýmto spôsobom vyberieme z odtlačku len potrebné údaje pre biometrické skúmania. Algoritmus je implementovaný v zdrojovom súbore *fingerSegmentation.m*
2. **Normalizácia histogramu** je spôsob spracovania odtlačku, pri ktorom sa modifikuje hodnota intenzity obrazových bodov tak, aby histogram farieb odtlačku bol rovnomerne rozložený. Zvyšuje sa tak kontrast medzi papilárnymi líniami a pozadím, čo je potrebné hlavne pri nevýrazných odtlačkoch. Algoritmus je implementovaný v zdrojovom súbore *fingerNormalization.m*
3. **Aplikácia Gaborovho filtra** zvyšuje zreteľnosť papilárnych línii, zosilňujú sa ich obrysy, zvýrazňuje sa ich lokálny smer a potláča sa šum. Gaborov filter eliminuje premenlivosť intenzity papilárnych línii tým, že ich reprezentuje takmer vždy tmavou farbou až na niektoré výnimky. Táto technika sa ukázala ako najdôležitejší nástroj obrazového spracovania, ktorý výrazne ovplyvňuje presnosť extrakcie markantov. Algoritmus je implementovaný v zdrojovom súbore *fingerFiltering.m*
4. **Odhad kvality papilárneho terénu** je nástroj, ktorý analyzuje smerovú jednotnosť obrazových blokov odtlačku. Na vyjadrenie smerovej jednotnosti sa ako podklad použije smerová mapa vypočítaná v predchádzajúcom kroku pre potreby Gaborovho filtra. Významný rozptyl smeru na malom bloku je znakom, že originálny odtlačok je v tomto mieste smerovo nedefinovateľný, čo je vo väčšine prípadov spôsobené rôznymi obrazovými kazmi. Výstupom je koherenčná mapa, ktorá graficky znázorňuje vhodné a menej vhodné miesta odtlačku na spoľahlivú extrakciu markantov. Zdrojový kód je v súbore *fingerQuality.m*
5. **Adaptívna binarizácia** prevádzza obrázky zo stupnice farieb „grayscale“ (odtiene šedej farby) do dvoch farieb: čierna a biela. Dá sa to dosiahnuť prostredníctvom priradovania 0 alebo 1 obrazovým bodom podľa prahovej hodnoty odvodenej od priemernej intenzity obrazových bodov na malých blokoch obrazu. Gaborov filter produkuje už takmer binárny obraz odtlačku,

takže binarizácia spracuje už len zostávajúce body s intenzitou rôznej od 0 alebo 1. Implementácia tohto postupu je v súbore *fingerBinarization.m*

6. Zúženie hrúbky papilárnych línii je poslednou fázou obrazového predspracovania. Vychádza z binárneho obrazu vyprodukovaného v predchádzajúcej fáze. Papilárne línie sa zúžia na úroveň 1 obrazového bodu. Na tento účel sme použili funkciu *bwmorph('thin','inf')* prostredia Matlab 2011b, ktorá aplikuje morfologickú operáciu zúženia hrúbky objektov. V tejto fáze dochádzalo k tvorbe falosných markantov, ktoré sme sa v ďalších fázach pokúsili eliminovať. Výstupom tohto kroku ako aj celého obrazového predspracovania je kostra odtlačku.

Po obrazovom predspracovaní je kostra odtlačku odovzdaná na spracovanie modulom extrakcie. Tento modul sa skladá z troch hlavných algoritmov: detekcia tvarových nepravidelností a ich klasifikácia, eliminácia geometrických artefaktov a overenie pravosti markantov. Všetky algoritmy sú v konečnom dôsledku zodpovedné za odhalenie tvarových zvláštností papilárnych línii, ktoré prislúchajú markantom. Tento postup samozrejme nie je bezchybný a v množine extrahovaných markantov figurujú aj niektoré umelé tvary, ktoré vznikli hlavne z dôvodu nízkej kvality vstupného odtlačku alebo ako nedostatok niektoej z techník obrazového predspracovania. Výstupom z tohto algoritmu je množina graficky vyznačených markantov v papilárnom teréne odtlačku, ktoré sme na zhodnotenie presnosti vizuálne porovnávali s označením znalca v obore daktyloskopickej identifikácie.



Obrázok 33 Schéma modulu extrakcie markantov

Na obrázku 33 je ako prvá uvedená hrubá lokalizácia markantov, ktorej princíp je vysvetlený v časti 1.5.4. Výsledky tohto algoritmu momentálne nie sú zapracované do architektúry modulu extrakcie pretože je táto technika momentálne vo fáze vývoja a testovania. Na obohatenie znalostí a posilnenie predstavy o lokalizácii markantov aj inou technikou ako je analýza kostry odtlačku, sme sa ju rozhodli v práci spomenúť.

Charakteristika jednotlivých krokov extrakcie markantov:

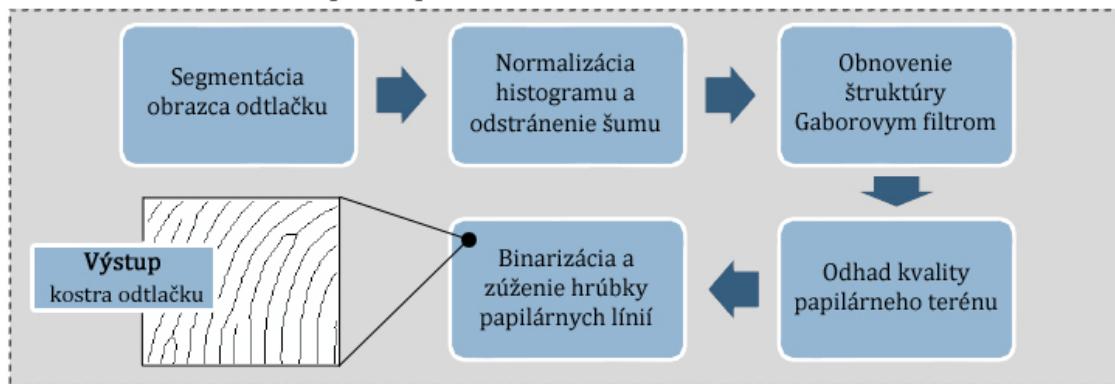
1. **Detekcia tvarových nepravidelností a ich klasifikácia** spočíva v postupnej analýze obrazových bodov, ktoré v kostre prislúchajú papilárnym líniám. Na tento účel sme použili metódu Crossing Number, ktorá postupne triedi body papilárnych línií na tie, ktoré patria tvarovým nepravidelnostiam a tie, ktoré sú obyčajnými priebežnými bodmi. Definovali sme 2 základné nepravidelnosti: ukončenie a rozdvojenie papilárnej línie. Z ich konfigurácií sa dalo odvodiť všetkých 5 tvarov markantov, ktoré náš program rozpoznával. Na rozlišovanie medzi tvarmi markantov sme použili metódu merania ich rozmeru a porovnávania nameranej hodnoty s hodnotou, ktorú sme markantu priradili v špecifikácii v časti 1.5.3. Markanty sme špecifikovali násobkami základnej jednotky vzdialenosťi L , ktorú sme určili na základe konzultácie s Oddelením daktyloskopickej identifikácie osôb KEÚPZ. Hodnota L predstavuje 10 obrazových bodov ($250 \mu m$), čo zodpovedá priemernej vzdialnosti medzi dvoma po sebe idúcimi potnými pórmami pozdĺž papilárnej línie. Zdrojový kód detektie tvarových nepravidelností je v súbore *fingerDetection.m*. Klasifikácia markantov sa nachádza v súbore *fingerPointClassification.m*.
2. **Eliminácia geometrických artefaktov** je proces, v ktorom dochádza k odstraňovaniu tých častí papilárnych línií, ktorých rozmery naznačujú, že sa jedná o umelý resp. falošný útvar, ktorý vznikol ako dôsledok poškodenej štruktúry odtlačku alebo vplyvom modifikácie papilárneho terénu niektorým z algoritmov obrazového predspracovania. Zamerali sme sa na elimináciu umelých jazier, výbežkov, fragmentov a izolovaných bodov, ktorých krátke rozmery prezrádzali, že sa jedná o falošný tvar, ktorý sa v odtlačkoch nevyskytuje. Zdrojový kód sa nachádza v súbore *fingerGeoElim.m*
3. **Verifikácia markantov** bolo posledným krokom v rámci modulu extrakcie a takisto aj celého algoritmu. Niektoré komplexné falošné štruktúry, ktoré neboli odstránené v predchádzajúcom kroku sme vylúčili meraním hustoty

výskytu tvarových nepravidelností na malých plochách a hľadaním niektorých preddefinovaných umelých tvarov. Okrem komplexných štruktúr sme vyučovali markanty, ktoré sa nachádzali na okraji odtlačku a tie, ktoré sa nachádzali v miestach odtlačku koherenčou mapou označených za nevhodné na extrakciu. Zdrojový kód je v súbore *fingerVerification.m*

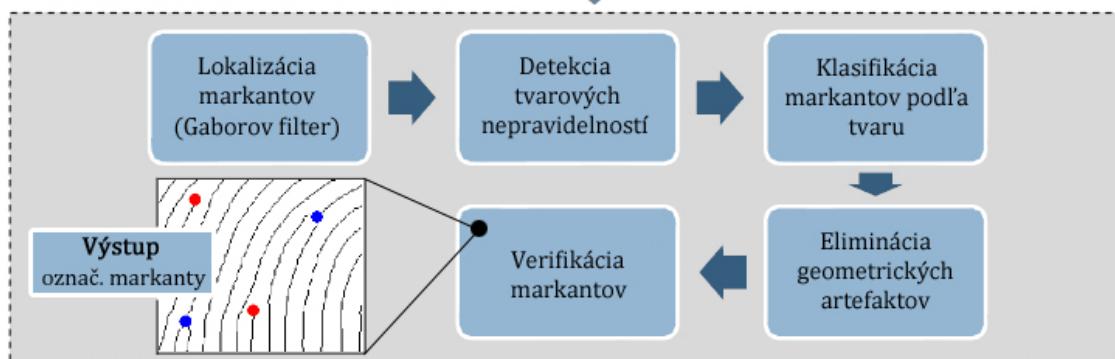
Hlavným spúšťacím súborom je *fip_main.m*, ktorý obsahuje jednoduché grafické rozhranie na ovládanie jednotlivých funkcií softvéru. Predstavili sme si činnosť oboch hlavných modulov celého softvérového riešenia. Výstupom obrazového predspracovania je kostra odtlačku, kde sú všetky papilárne línie zastúpené krívkami s hrúbkou 1 obrazového bodu. Takto spracovaný odtlačok bol odovzdaný na spracovanie do modulu extrakcie, ktorého výsledkom bola množina graficky vyznačených markantov a farebne odlišených podľa tvaru. Celkovú architektúru softvéru znázorňuje obrázok 34.

Architektúra navrhnutého softvérového riešenia

Modul obrazového predspracovania



Modul extrakcie markantov



Obrázok 34 Architektúra navrhnutého softvérového riešenia

Náš postup pri návrhu jednotlivých krokov oboch modulov je analyzovaný v častiach 2.2 a 2.3. Konkrétnie kapitola 2.2 je chronologickým opisom všetkých algoritmov, ich parametrov a dosiahnutých výsledkov v rámci obrazového predspracovania. Kapitola 2.3 prezentuje hlavné výsledky extrakcie a problémov, na ktoré sme v tejto fáze narazili. Obe kapitoly obsahujú diskusiu k nadobudnutým výsledkom, kde sa snažíme zaujať kritické stanovisko a objektívne zhodnotiť konkrétnie medzivýsledky resp. opodstatniť ich stav. Na zvýšenie objektívnosti, prizeráme na účinnosť algoritmu pri kvalitných aj nekvalitných odtlačkoch prstov.

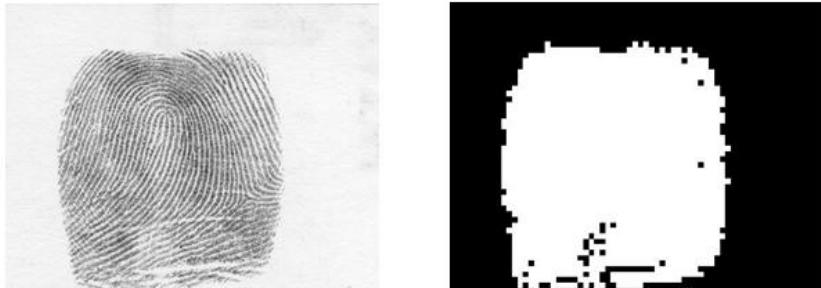
Vysvetlenie podstatných častí zdrojových kódov uvádzame v technickej dokumentácii priloženej k práci v elektronickej PDF verzii na CD v prílohe E. Opis pracovného postupu návrhu jednotlivých krokov obrazového predspracovania a extrakcie markantov je vlastne opisom funkcionality zdrojových kódov funkcií, v ktorých sú implementované navrhnuté algoritmy. Podrobnejší komentár a vysvetlenie manipulácie s dátami je práve v technickej dokumentácii, ktorú sme sa rozhodli vytvoriť ako samostatný dokument kvôli prehľadnosti textu v diplomovej práci. Časť kapitol 2.2 a 2.3 je predovšetkým opis činnosti algoritmov, zdôvodnenie navrhnutých krokov a analytický pohľad na dosiahnuté výsledky.

2. 2 Postup pri návrhu obrazového predspracovania

2. 2. 1 Algoritmus segmentácie

Pri návrhu tohto algoritmu sme využili myšlienku, že obrazec odtlačku je definovaný rozptyлом úrovní šedej farby a od pozadia sa odlišuje vyššou priemernou intenzitou obrazových bodov. Najprv sme obraz rozdelili na štvorcové bloky o šírke $W = 20$ obrazových bodov. Toto číslo predstavuje mieru zovšeobecnenia odhadu lokálneho rozptylu a priemeru šedej farby. Využili sme fakt, že hrúbka papilárnej línie je cca. 10 obrazových bodov a teda dvojnásobne veľký blok vždy zachytí prechod z tmavých do bielych oblastí a zaregistruje rozptyl typický pre daktyloskopický vzor. Keď sme zmerali rozptyl podľa vzťahu (1) a priemer intenzity vo všetkých blokoch tak sme blokom, ktoré mali rozptyl menší ako priemerný priradovali hodnotu 0 a tým, ktoré mali rozptyl väčší ako priemerný zasa 1. Takto sme vytvorili masku hrubej

segmentácie, ktorá hovorila o tom, ktoré bloky odtlačku sú obrazcom a ktoré sú okolím odtlačku. Ukážka masky hrubej segmentácie je na obrázku 35.



Obrázok 35 Ukážka hrubej masky segmentácie odtlačku

Hrubú masku sme ešte kvôli odstráneniu šumu regularizovali trojnásobnou aplikáciou Wienerovho filtra s veľkosťami postupne 300×300 , 200×200 a 150×150 obrazových bodov. Tento krok bol časovo najnáročnejší v rámci celej segmentácie. Rozdiel medzi regularizovanou a pôvodnou hrubou maskou vidíme na obrázku 36.



Obrázok 36 Rozdiely medzi hrubou a regularizovanou maskou

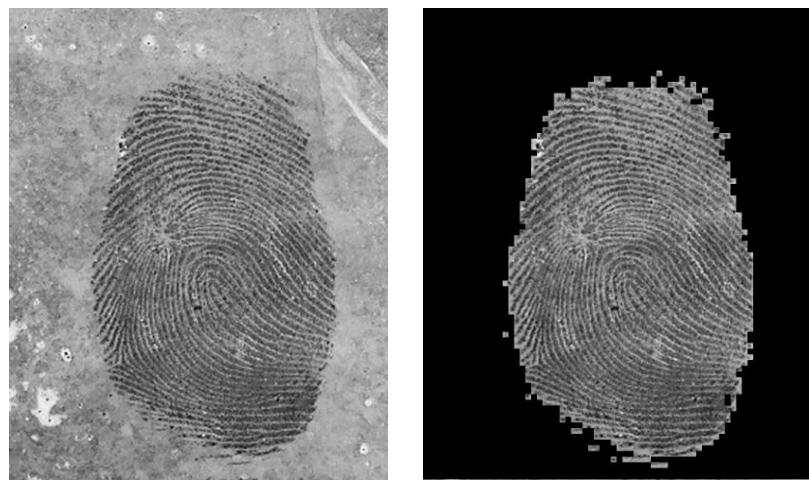
Hrubá segmentácia často klasifikovala časti odtlačku s nadmerným tlakom do pozadia. Nadmerný tlak je charakteristický vyššou priemernou hodnotou šedej farby. Z toho dôvodu sme tie bloky, ktoré boli z obrazca odtlačku vylúčené v hrubej segmentácii porovnali s priemernou hodnotou intenzity šedej v celom obraze. Blokom nad priemerom sme do hrubej masky vložili hodnotu 1 a zvyšné zostali na úrovni 0.

Následne sme na odtlačok aplikovali masku tak, že zostal viditeľný len vzor odtlačku a okolie zostało čierne. Ukážka segmentácie hrubou regularizovanou maskou a maskou po prispôsobení k nadrozmernému tlaku je na obrázku 37.



Obrázok 37 Ukážka vylepšenia segmentácie odtlačku v oblastiach nadmerného tlaku

Vykonali sme aj experiment s latentným odtlačkom, ktorého kontrast bol veľmi nízky. Tu sa asi najviac prejavil účinok regularizácie masky. No napriek tomu náš algoritmus vedel zachytiť podstatnú časť papilárneho terénu. Ukážka segmentácie nekvalitného latentného odtlačku je na obrázku 38.



Obrázok 38 Segmentácia latentného odtlačku s nízkym kontrastom

Naše výsledky sme porovnali aj s výsledkom algoritmu, ktorý použil Raymond Thai. Je taktiež založený na meraní rozptylu intenzity. Náš algoritmus označoval hrany odtlačku presnejšie pretože bol vylepšený o regularizáciu Wienerovym filtrom. Na obrázku 39 vidíme porovnanie výsledku našej segmentácie (úplne vpravo) a segmentácie podľa Thaia (v strede) (Thai, 2003). Zdrojový kód procesu segmentácie je vo funkcií *fingerSegmentation()*. Vstupom do funkcie je iba originálny odtlačok.



Obrázok 39 Porovnanie našej segmentácie s inou metódou z literatúry

2. 2. 2 Algoritmus odhadu kvality papilárneho terénu

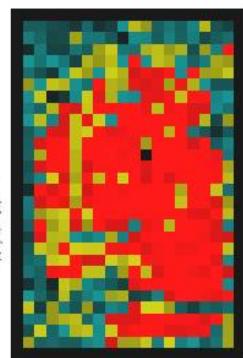
Na odhad kvality papilárneho terénu sme využili meranie konzistencia smerovej mapy odtlačku. Smerovú mapu sme vypočítali podľa postupu v časti 1.4.4. Smery sme počítali v blokoch o veľkosti $W = 30 \times 30$ obrazových bodov. V (Hong et al., 1998) odhadovali smer v blokoch 16×16 , ale pri rozlíšení obrazu 500 dpi. My sme pracovali s obrazom v rozlíšení 1 000 dpi a preto sme veľkosť bloku približne zdvojnásobili. Po výpočte smerovej mapy sme počítali konzistenciu smerov okolia jednotlivých blokov obrazu použitím vzťahu (2). Vzťah (2) vlastne meral úroveň rozptylu smeru v menších častiach obrazu. Hodnoty tohto vzťahu boli uložené do matice a vznikla koherenčná mapa. Na obrázku 40 vidíme vľavo vypočítanú koherenčnú mapu odtlačku našim algoritmom. Zámerne sme vybrali nekvalitný odtlačok prsta, aby sme videli ako koherenčná mapa rozlišuje medzi zreteľnými a nezreteľnými miestami v odtlačku. Svetlé oblasti koherenčnej mapy predstavujú kvalitné časti odtlačku vhodné na spoľahlivú extrakciu. Tmavé časti sú zväčša nekvalitné segmenty odtlačku. Vpravo je referenčný výsledok od autorov Kekre, H. et al. (2010), ktorí červenou farbou

označovali kvalitné miesta odtlačku, žltou stredne kvalitné a modrou nekvalitné miesta. Oblasti koherenčnej mapy s nízkou konzistenciou smeru, predstavovali neobnoviteľné miesta odtlačku, kde hrozia chyby pri extrakcii markantov a preto sme ich ignorovali v rámci extrakcie. Výpočet koherenčnej mapy je implementovaný vo funkcií *fingerQuality()*, ktorá potrebuje len jeden argument a to smerovú mapu odtlačku. Smerová mapa je matica hodnôt v rozsahu $<0, \pi>$, ktoré definujú smer v jednotlivých bodoch odtlačku.

Koherenčná mapa vypočítaná našim algoritmom



Metóda od autorov Kekre et al.



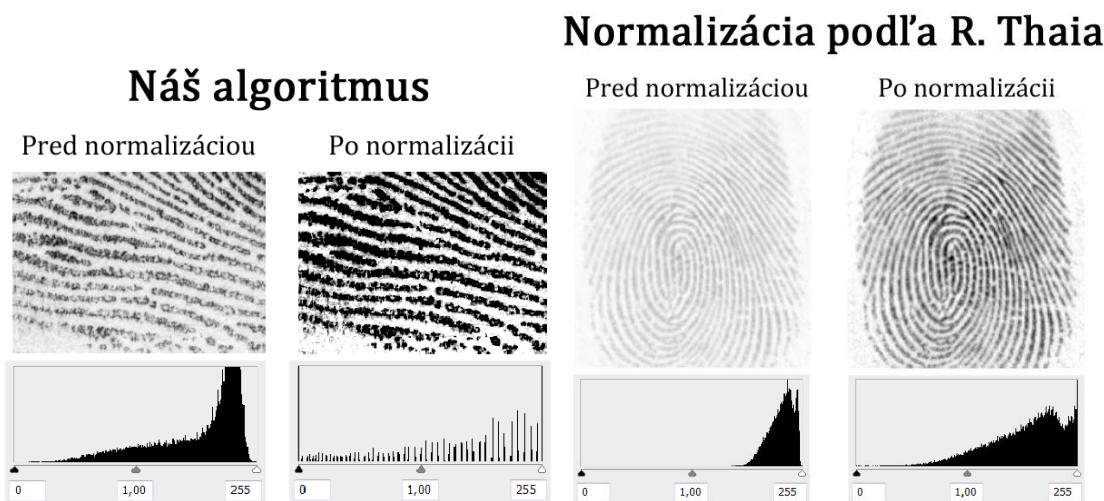
Obrázok 40 Porovnanie výsledkov odhadu kvality papilárneho terénu

2.2.3 Algoritmus normalizácie histogramu odtlačkov

Nevyhovujúca kvalita odtlačkov prstov často pramení z nízkeho kontrastu medzi papilárnymi líniemi a pozadím. Nedostatočný kontrast vzniká pri príliš tmavých obrazoch alebo príliš svetlých. Tento stav môže byť spôsobený napríklad nadmernou vlhkosťou pokožky alebo na druhej strane nedostatočným tlakom alebo suchou pokožkou. Aby sme tieto nedostatky odstránili, implementovali sme jednoduchý algoritmus na normalizáciu hodnôt histogramu odtlačku. Za ideálny stav histogramu sme považovali rovnomerné rozloženie intenzity obrazových bodov naprieč celým spektrom farieb od 0 do 255. Histogram sme upravovali lokálnej adaptáciou intenzity obrazových bodov podľa vzťahu (3) v časti 1.4.3. Za požadovanú strednú hodnotu M_0 sme dosadili hodnotu 125 a za požadovaný rozptyl VAR_0 sme dosadili 60. Implementácia tohto postupu sa nachádza vo funkcií *fingerNormalization()*, ktorej

parametrom je vstupný neupravený odtlačok prsta, požadovaná stredná hodnota a rozptyl intenzity obrazových bodov po úprave histogramu.

Na obrázku 41 vľavo vidíme ako náš algoritmus normalizoval histogram odtlačku, ktorý vykazoval pomerne nízky kontrast. Vidíme, že histogram pred normalizáciou bol posunutý doprava, čo znamená, že prevažná časť obrazových bodov je svetlá. Po normalizácii sme sa dopracovali k histogramu, ktorého rozloženie bolo rovnomernejšie, čo bolo cieľom. Náš výsledok sme porovnali s výsledkom od autora R. Thaia (2003, s. 18). Je vidieť, že naša normalizácia je porovnatelná s jeho výsledkom.



Obrázok 41 Porovnanie výsledkov normalizácie histogramu odtlačku

Niekedy obsahujú obrázky odtlačkov šum, ktorý môže viesť k vytvoreniu artefaktov. Zdrojom šumu býva väčšinou premenlivá textúra pozadia odtlačku, výchylky intenzity papilárnych línii alebo cudzie častice prítomné vo vzore odtlačku. Aby sme ich potlačili, tak sme na normalizovaný odtlačok aplikovali Wienerov filter, ktorý sa pri spracúvaní obrazov používa na odstránenie šumu. Pri voľbe jeho veľkosti sme museli byť opatrní. Príliš veľká maska filtra môže vyhľadiť potrebné ostré detaile papilárnych línii. Po zopár experimentoch sme zistili, že najlepšou voľbou vzhľadom na rozlíšenie odtlačkov (1 000 dpi) je veľkosť 5×5 obrazových bodov. Výsledok aplikácie Wienerovho filtra vidíme na obrázku 42. V prostredí Matlab 2011b sme využili zabudovanú funkciu *wiener2()*, ktorej argumentom je vstupný odtlačok a rozmery masky Wienerovho filtra. Pozorným skúmaním zistíme, že vyhľadený

obrázok vpravo má lepšie zvýraznené papilárne línie ako nevyhľadený obrázok vľavo. V tomto prípade sa Wienerov filter uplatnil aj ako nástroj na zahľadzovanie potných pór, ktoré boli nežiaducou vlastnosťou pretože v kostre odtlačku tvorili umelé jazerá.

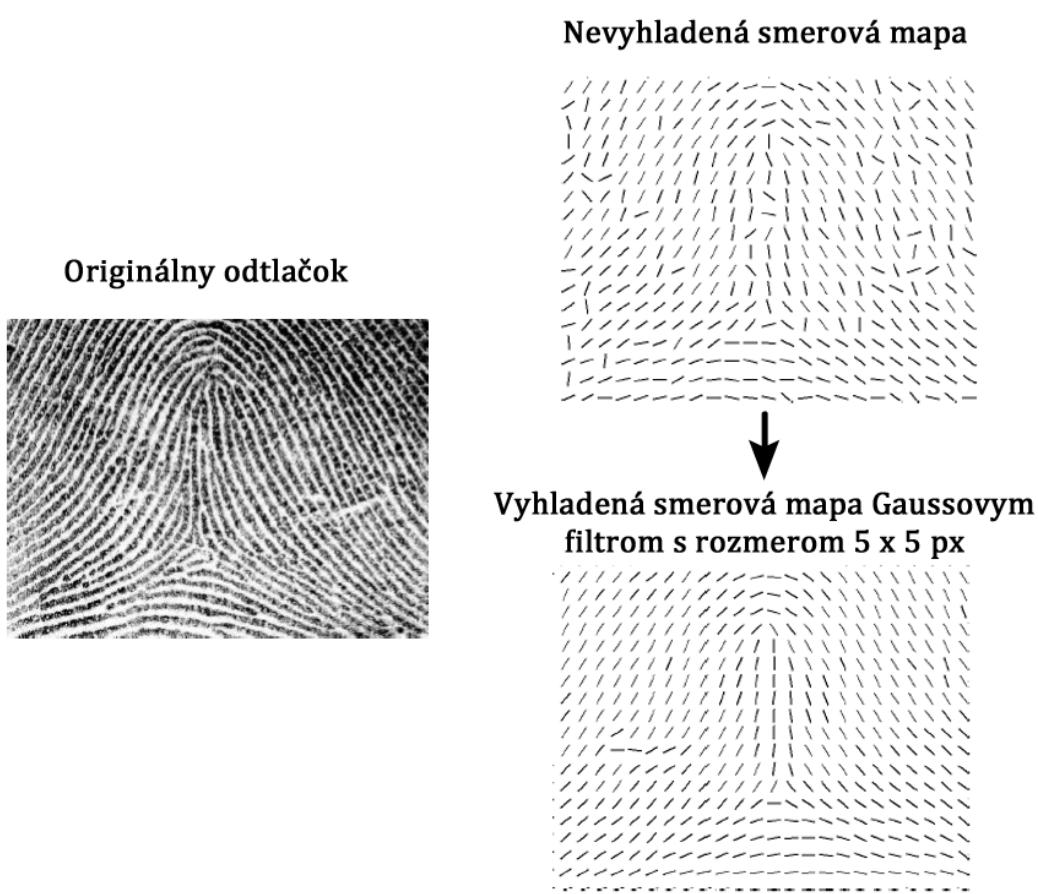


Obrázok 42 Odstránenie šumu Wienerovym filtrom

2. 2. 4 Algoritmus odhadu lokálnych orientácií papilárnych línií

Navrhnutý algoritmus odhadu lokálnych orientácií počítal smerovú mapu odtlačkov, ktorá bola reprezentáciou orientácie papilárnych línií na malých blokoch. Smerová mapa sa použila aj k odhadu kvality papilárneho terénu, pretože sa v nej dali odhaliť miesta smerovej nekonzistencie, ktoré určovali poškodené časti odtlačku. Druhým využitím smerovej mapy bol Gaborov kontextový filter. Smerová mapa je matica orientácií vyjadrených v radiánoch v intervale $<0, \pi>$. Vizualizáciou hodnôt smerovej mapy dostávame obraz tvorený vektormi, ktoré reprezentujú smer v blokoch obrazu. Na vizualizáciu smerovej mapy prostredníctvom krátkych šípkov znázorňujúcich vektoru sme použili funkciu Matlabu 2011b s názvom *quiver()*.

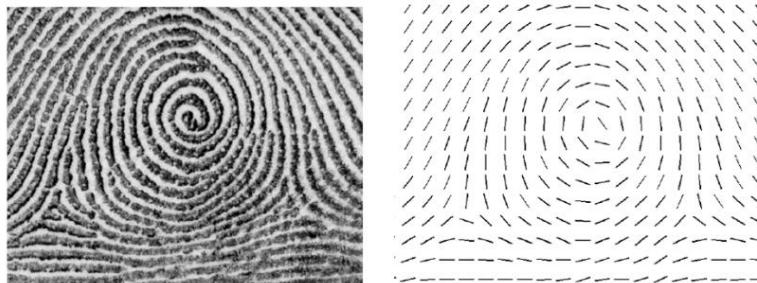
Lokálny smer sme odhadovali v bloku o veľkosti $W = 30 \times 30$ obrazových bodov. Pri implementácii sme sa riadili postupom v časti 1.4.4. V experimentoch sa ukázalo, že vyhľadzovanie smerov Gaussovym filtrom malo prínosný účinok, pretože sme boli schopní získať celkom konzistentnú smerovú mapu odtlačkov, ktoré mali nižšiu kvalitu. Veľkosť Gaussovoho filtra sme stanovili na hodnotu 5×5 obrazových blokov. Zdrojový kód tohto postupu je vo funkcií *fingerOrientation()*. Hlavnými argumentmi funkcie sú veľkosť bloku W a veľkosť Gaussovo vyhľadzovacieho filtra. Na obrázku 43 vidíme smerovú mapu odtlačku nižšej kvality s a bez použitia vyhľadzovacieho filtra.



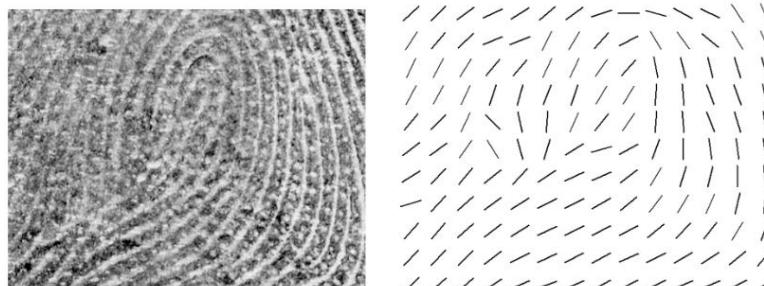
Obrázok 43 Vplyv vyhladzovacieho filtra na konzistenciu orientácie v smerovej mape

V singulárnych bodoch odtlačku dochádza k prudkej zmene smeru papilárnych linií na krátkej vzdialenosť. V okolí singulárnych bodov sa vo všeobecnosti nachádza vyšší počet markantov a preto bolo našim primárnym záujmom vyhodnotenie odhadu smeru v týchto oblastiach. Nesprávnym odhadom smeru v oblasti singulárnych bodov by sa mohlo zahladit' alebo zdeformovať veľké množstvo markantov, ktoré sa snažíme vo fáze obrazového predspracovania zachovať a zvýrazniť. K zahladeniu a deformácii by došlo po aplikácii Gaborovho filtra, ktorý je závislý od hodnôt smerovej mapy. Singulárne body samotné predstavujú 1. úroveň grafickej informácie dostupnej v odtlačku, ktorá sa používa na klasifikáciu odtlačku podľa základného daktyloskopického vzoru. Ich modifikáciou by sme úplne znemožnili identifikáciu. Na porovnanie presnosti odhadu smeru v okolí poškodených a kvalitných singulárnych bodov uvádzame obrázok 44. Môžeme si všimnúť, že aj v menej kvalitných častiach je odhad dostatočne presný a kopíruje podstatné rysy obrazca.

Odhad smeru v jadre odtlačku typu "vŕ"



Odhad smeru v nekvalitnom jadre odtlačku typu "slučka"



Obrázok 44 Presnosť odhadu smeru v oblastiach singulárnych bodov

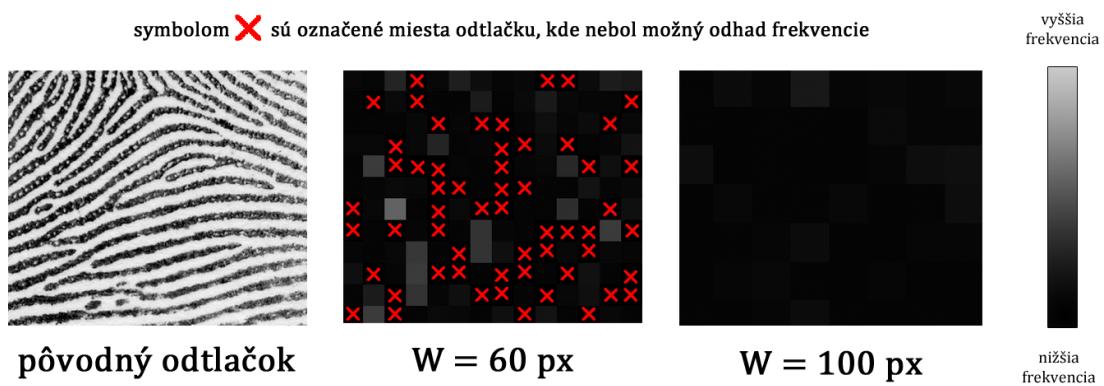
2. 2. 5 Algoritmus odhadu frekvencie papilárnych línií

Hned' po vypočítaní smerovej mapy nasledovalo v implementácii volanie funkcie *fingerFrequency()*, ktorej výstupom boli hodnoty frekvenčnej mapy odtlačku. Táto funkcia postupne rozdeľovala obraz na bloky a na vyhodnotenie frekvencie v bloku bola volaná funkcia *blockFrequency()*. Opíšme si v skratke nás postup pri odhade lokálnych frekvencií papilárnych línií.

Lokálna frekvencia je ďalšia vlastnosť odtlačku, ktorú potrebujeme poznať na to, aby sme mohli skonštruovať Gaborov filter. Hovorí o tom, aký je priemerný počet papilárnych línií pripadajúcich na 1 obrazový bod. Jej prevrátená hodnota vyjadruje priemernú šírku papilárnej línie. Na meranie resp. odhad tejto vlastnosti sme využili štruktúru obrazca odtlačku, ktorá pripomína striedanie tmavých (papilárne línie) a svetlých čiar, teda určitý periodický priebeh, v ktorom môžeme zaznamenávať lokálne extrémy intenzity šedej farby a merat' medzi nimi vzdialenosť. Frekvenciu sme počítali v obrazových blokoch $W = 60 \times 60$ obrazových bodov. Bolo nutné zvoliť takú veľkosť bloku, aby svojou plochou zachytával v priemere aspoň 2-3 papilárne línie.

Priemerná šírka papilárnej línie bola $L = 10$ obrazových bodov. Táto konštantá bola experimentálne stanovená pre našu vzorku odtlačkov zosnímaných v rozlíšení 1 000 dpi. Ak by bol blok príliš malý napr. by zachytával iba jedinú papilárnu líniu, nemohli by sme vypočítať lokálnu frekvenciu, pretože tá sa počíta ako prevrátená hodnota priemernej vzdialenosť medzi dvomi po sebe idúcimi papilárnymi líniami.

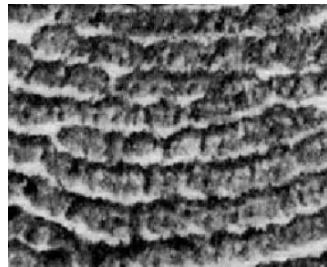
Veľkosť obrazového bloku je momentálne konštantná pre všetky spracúvané odtlačky. Konštantná veľkosť bloku nie je vyhovujúca pre všetky odtlačky. Napr. veľkosť 60 obrazových bodov je pre niektoré odtlačky vyhovujúca, no pri odtlačkoch s veľkými rozstupmi medzi papilárnymi líniami táto veľkosť nestačí. Pri obrázkoch, ktoré opticky vykazovali nižšiu frekvenciu papilárnych línii sme veľkosť bloku W zväčsili tak, aby bol obrazový blok schopný zachytiť minimálne dve papilárne línie v každom mieste odtlačku. Ak sa v niektorom z blokov nedala vypočítať frekvencia, tak zostala nedefinovaná a toto miesto nebolo následne spracované ani Gaborovym filtrom, ktorý potrebuje poznať smer a frekvenciu miesta odtlačku, na ktoré je aplikovaný. Ak by sme používali pre všetky odtlačky veľké bloky, tak by nezostávali nedefinované miesta. Na druhej strane by to už neboli lokálny, ale skôr globálny odhad frekvencie. Na obrázku 45 je vidno, že veľkosť bloku 60 obrazových bodov je nepostačujúca pre odtlačok s riedko rozmiestnenými papilárnymi líniami. Pri vol'be 100 obrazových bodov je algoritmus schopný vypočítať frekvenciu vo všetkých miestach papilárneho terénu, avšak zahladzujú sa tým lokálne výchylky frekvencie.



Obrázok 45 Výpočet frekvencie papilárnych línii pri rôznych veľkostiach bloku W

Rozdelili sme teda obraz odtlačku na bloky W . V závislosti od miesta v papilárnom teréne, blok zachytával vždy inak orientované papilárne línie. Na detekciu

vrcholov papilárnych línii sme potrebovali získať kolmú projekciu intenzity. Z toho dôvodu sme každý blok otočili na rovnakú orientáciu ako papilárne línie. Orientácie papilárnych línii sme čerpali zo smerovej mapy odtlačku. V takto otočenom bloku sme postupne vytvorili priemer intenzity obrazových bodov v každom stĺpci. Dostali sme tak vektor, ktorý sa v tomto kontexte označuje ako $X - signatúra$. Výšku stĺpca sme zvolili 5 obrazových bodov. Vyššie hodnoty by mohli skresľovať informáciu. Ak by sme počítali priemer šedej farby vo veľmi dlhých stĺpcoch, nemuseli by všetky body kvôli zakriveniu papilárnych línii patriť práve papilárnym liniám. Lokálne maximá intenzity v $X - signatúre$ zodpovedali vrcholom papilárnych línii. Podelením vzdialenosť medzi prvým a posledným vrcholom počtom vrcholov sme vyjadrili priemernú šírku papilárnej línie. Jej prevrátená hodnota bola frekvencia papilárnych línii. Takto vypočítanú frekvenciu sme priradili všetkým obrazovým bodom v bloku, teda všetky body v jednotlivých blokoch W mali rovnakú frekvenciu. Urobili sme tak preto, lebo sme predpokladali, že v rámci jedného bloku nemôže dôjsť k významným výchylkám vo frekvencii a takisto kvôli výpočtovej náročnosti tejto techniky. V časti 1.4.4 je na obrázku 13 ukážka orientovaného bloku v obraze odtlačku spolu s príkladom $X - signatúry$. Vizualizáciou vypočítaných hodnôt frekvencie papilárnych línii sme získali tzv. frekvenčnú mapu odtlačku.

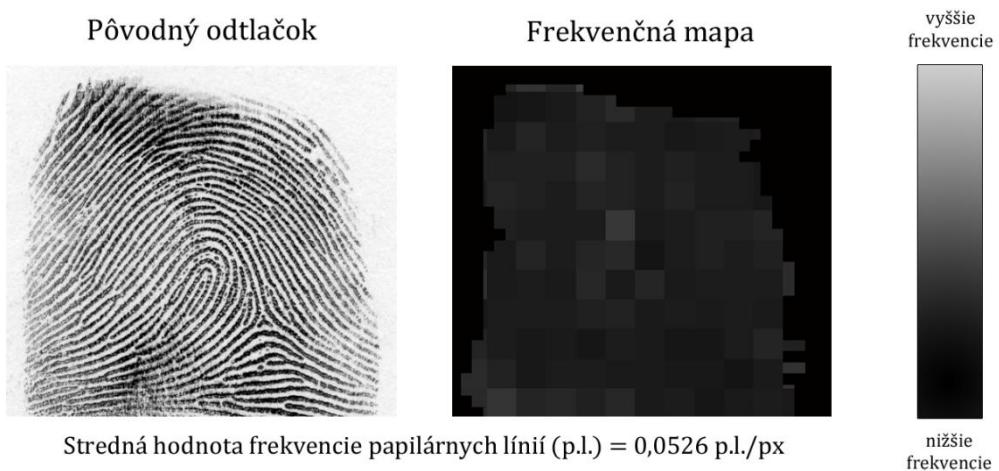


Obrázok 46 Časť odtlačku s nejasne oddelenými papilárnymi liniami

V poškodených častiach odtlačku alebo v strede daktyloskopických vzorov, kde dochádza k výraznému zakriveniu papilárnych línii je odhad frekvencie menej presný. Nielen zakrivenie papilárnych línii, ale aj nejasne separované línie boli prekážkou pre správny odhad frekvencie. Nejasná separácia znemožňuje spoľahlivo nachádzať vrcholy papilárnych línii. Situácia, kde je problematické určiť frekvenciu kvôli nejasne

oddeleným papilárnym líniám je znázornená na obrázku 46. Dôsledkom nepresného odhadu frekvencie papilárnych línií je nesprávne parametrizovaný Gaborov filter. Ten môže pri aplikácii na odtlačok vytvárať umelé prepojenia alebo rozdelenia papilárnych línií.

Z výsledkov experimentov na 30 odtlačkoch sme zistili, že priemerná šírka papilárnej línie je $9,71\text{ px}$ a priemerná šírka medzery medzi dvoma papilárnymi líniami je $13,5\text{ px}$. Na obrázku 47 vidíme znázornenú frekvenčnú mapu odtlačku. Vstupný odtlačok má na celej ploche premenlivú frekvenciu.



Obrázok 47 Frekvenčná mapa odtlačku

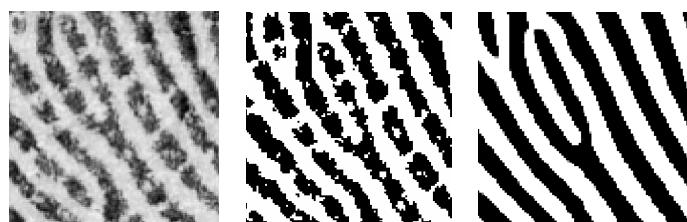
2. 2. 6 Algoritmus aplikácie Gaborovho filtra

Najvýraznejším nástrojom celého obrazového predspracovania bol Gaborov filter. Implementácia filtra, algoritmus jeho parametrizácie a aplikácie na odtlačok je vo funkcií s názvom *fingerFiltering()*. Opis aj špecifikácia jeho parametrov je v časti 1.4.4. Na jeho konštrukciu sme použili smerovú a frekvenčnú mapu zostrojenú v predchádzajúcich krokoch. Parametre filtra σ_x a σ_y určovali odchýlky Gaussovej krivky, ktorá predstavovala účinok filtra v horizontálnom aj vertikálnom smere. Nebolo logické nechať tieto parametre konštantné, pretože niekedy sa filter aplikoval na hrubé a niekedy na tenké papilárne línie. Práve preto sme odchýlky odvodzovali od lokálnej frekvencie. Čím bola frekvencia vyššia, tým menšie hodnoty odchýlok filter dosahoval. Naopak, pri nízkych frekvenciach bolo potrebné filter roztahnúť, aby jeho tvar správne pokryl povrch papilárneho terénu. Konkrétnie sme ich zvolili ako $1/2$ priemernej šírky

papilárnej línie, ktorá sa dala odvodiť ako prevrátená hodnota frekvencie. Ďalším parametrom, ktorý sa pri postupnej aplikácii Gaborovho filtra na obrazové body menil, bola veľkosť masky filtra. Tú sme menili podobne ako pri odchýlkach σ_x a σ_y , konkrétnie bola maska filtra 3-násobkom veľkosti odchýlky.

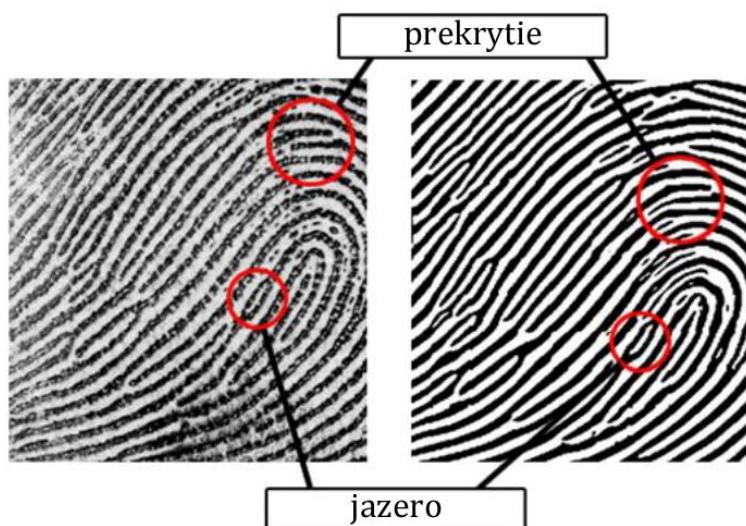
Lokálna frekvencia bola počítaná len v miestach daktyloskopického vzoru, ktoré určovala maska segmentácie vytvorená v prvom kroku. Na niektorých miestach nebol výpočet frekvencie možný pretože sa nedala vypočítať priemerná vzdialenosť medzi vrcholmi papilárnych línií, nakoľko boli ľahko odhaliteľné. V týchto miestach nemal filter informáciu o frekvencii a preto niektoré bloky obrazu vynechával. Na redukciu výpočtového času sme najprv vypočítali pre každý odtlačok maticu Gaborovych filtrov. Boli vyhotovené pre každú unikátnu frekvenciu z frekvenčnej mapy vo viacerých smerových verziách. Ku každému filtru s konkrétnou frekvenciou sme vytvorili inštancie postupnej rotáciou o uhol 3° . Pri filtrovaní sme potom vyberali už len správne smerovo a frekvenčne nastavenú verziu filtra.

Gaborov filter sme sa rozhodli zakomponovať do nášho softvéru hlavne preto, lebo sa osvedčil ako vhodný nástroj na riešenie problému s jasným odlíšením papilárnej línie od pozadia odtlačku. Papilárne línie sú v podstate krivky, ktoré sa rozprestierajú po odtlačku. V binarizovanej forme obsahujú papilárne línie s príliš viditeľnými pórmi umelé prerušenia. Umelé prerušenia sú aj dôsledkom kolísania intenzity odtieňa papilárnej línie. Aby sme potlačili potné pory a jasne vytvorili hranicu medzi papilárnou líniou a okolím, zaviedli sme práve Gaborov filter. Na ilustrácii pod textom je ukážka spomínaného problému. Obrázok v strede predstavuje binarizáciu bez použitia filtra a obrázok vpravo s jeho použitím. Vidíme, že filter je mimoriadne účinný pri obnovení celistvosti papilárnych línií.



Obrázok 48 Obnova celistvosti papilárnych línií účinkom Gaborovho filtra

Na obrázku 49 vidíme, že Gaborov filter nastavený na hodnoty lokálnych frekvencií a orientácií zistených v predchádzajúcich krokoch modifikuje originálnu podobu obrazca odtlačku len minimálne. Vľavo je originálny neupravený odtlačok a vpravo prefiltrovaný Gaborovym filtrom. Pri identifikácii je dôležité, aby sa nestratili niektoré vzácne markanty. Medzi ne patrí aj prekrytie papilárnych línii, ktoré zostało zachované aj po filtrovaní. Algoritmus obnovil aj zreteľnosť singularít v strede daktyloskopického vzoru. Na obrázku vidno, že tvar markantov ako prekrytie a jazero zostať zachovaný aj po aplikácii filtra.



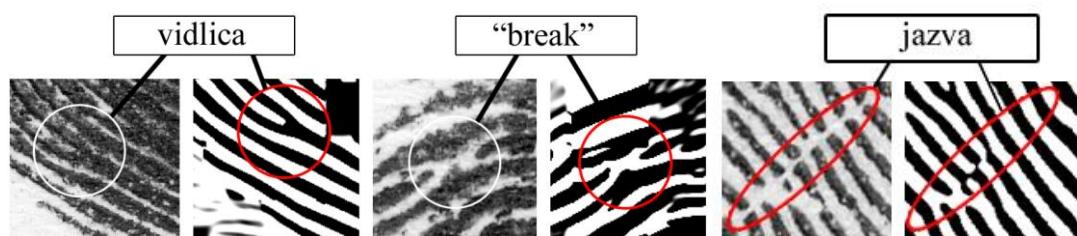
Obrázok 49 Účinky Gaborovho filtra na kvalitný odtlačok

Nedostatkom Gaborovho filtra je tvorba umelých dier v papilárnych líniah. Tie sme odstránili tak, že sme ako ďalší pracovný krok zaradili filtrovanie Wienerovym filtrom, ktorý má vlastnosť odstránenia drobných častíc a zaoblenia kontúr. Na obrázku 50 je výrez filtrovaného odtlačku (b), kde môžeme vidieť ako zostali v papilárnych líniah diery, ktoré filter zaviedol kvôli príliš viditeľným potným otvorom. Vidíme ako sa prevažná časť týchto obrazových anomálií vplyvom filtra zahladila (c), pričom sa neovplyvnil tvar okolia ani nezaviedli do obrazu iné prvky deformácie.



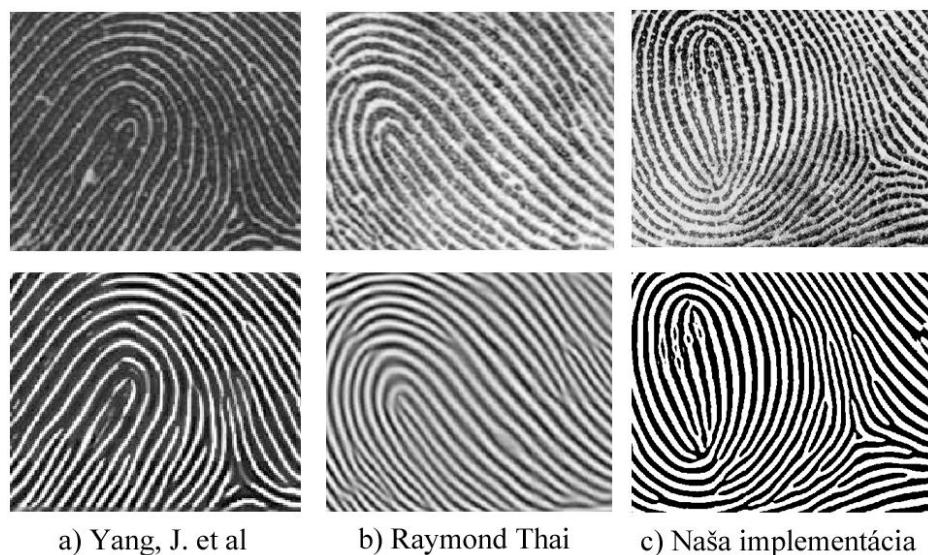
Obrázok 50 Odstránenie malých dier v papilárnych líniah

Ked'že primárna úloha Gaborovho filtra je obnovenie zreteľnosti papilárnych línii, je vhodné si zosumarizovať jeho výsledky v poškodených, ale obnoviteľných častiach obrazu. Jedným zo zdrojov degradácie kvality a zavedenia umelých rozseknutí papilárnych línii sú jazvy a škrabance. Na obrázku 51 vidíme schopnosť filtra obnoviť poškodenú štruktúru odtlačku. Odtlačok bol rekonštruovaný do formy, ktorá sa podobala reálnemu stavu aj v rozmiestnení markantov. Línie v oblastiach malých jaziev sa podarilo sceliť. V prípade väčších jaziev neboli Gaborov filter úspešný. Na obrázku je vidieť, že filtrovi sa úspešne podarilo obnoviť 5 z 8 papilárnych línii rozseknutých jazvou.



Obrázok 51 Rekonštrukcia kritických častí obrazu a eliminácia jaziev

Jedna z najlepších implementácií Gaborovho filtra je od autorov Yang, J. et al. (2003), ktorí si všimli niektoré jeho nedostatky a zaviedli zopár významných modifikácií opísaných v časti 1.4.4. Výsledky našej implementácie sme porovnali aj s metódou od Raymonda Thaia (2003, s. 30). Na obrázku 52 sú v hornom riadku pôvodné odtlačky a v spodnom sú výstupy filtrovania.



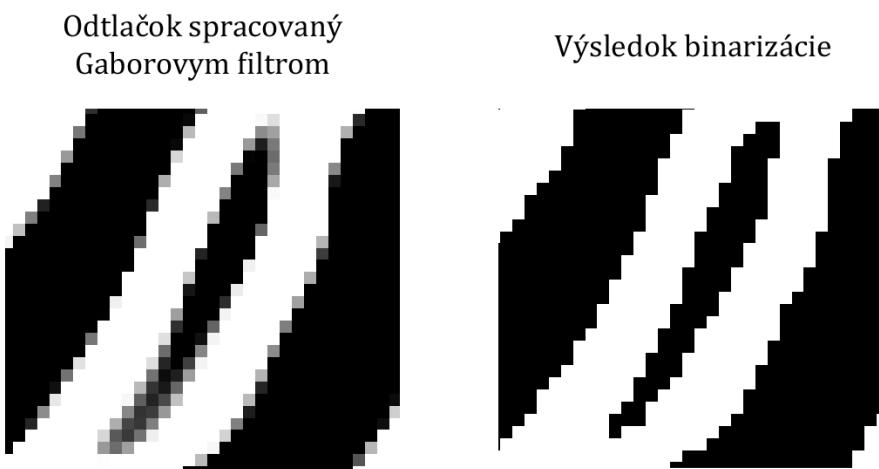
Obrázok 52 Porovnanie našej implementácie Gaborovho filtra s inými riešeniami

2.2.7 Algoritmus binarizácie odtlačku

Po aplikácii Gaborovho filtra na odtlačok nasledovala binarizácia odtlačku, v rámci ktorej bol farebný profil Grayscale transformovaný do hodnôt: 0 a 1. Výsledkom bol čiernobiely obraz, ktorý bol vstupom do algoritmu zúženia hrúbky papilárnych línii. Proces binarizácie je implementovaný vo funkcií *fingerBinarization()*. Implementácia binarizácie sa skladá z týchto krokov:

1. Obraz odtlačku sme rozdelili na bloky o veľkosti 50×50 obrazových bodov.
2. V každom bloku sme vypočítali prostredníctvom Otsuovej metódy prahovú hodnotu, ktorú sme použili na prevod obrazových bodov zo stupnice Grayscale do čiernobielej podoby. Na tento účel sme použili funkciu Matlabu 2011b *graythresh()*, ktorej vstupom bol obrazový blok a výstupom spomínaná prahová hodnota.
3. Jednotlivé bloky obrazu sme prevádzali do binárnej formy prostredníctvom funkcie Matlabu s názvom *im2bw()*. Vstupom do funkcie bol blok obrazu a prahová hodnota.

Odtlačok už po aplikovaní Gaborovho filtra obsahoval prevažne biele a čierne body. Okraje a niektoré úseky papilárnych línii boli však stále reprezentované odtieňmi šedej farby. Binarizácia tak už len minimálne zasahovala do štruktúry obrazca odtlačku. Na obrázku 53 je výsledok binarizácie odtlačku spracovaného Gaborovym filtrom.



Obrázok 53 Binarizácia odtlačku spracovaného Gaborovym filtrom

2. 2. 8 Algoritmus zúženia hrúbky papilárnych línii

Posledný krokom modulu obrazového predspracovania bolo vytvorenie kostry odtlačku použitím morfológických operácií prostredia Matlab 2011b. Kostra je maticou bodov obsahujúcou binárny obraz odtlačku, v ktorom sú všetky papilárne línie zastúpené krivkami s hrúbkou 1 obrazového bodu. Kostra je vstupom do modulu extrakcie, kde sa na základe analýzy bodov kostry hľadajú a klasifikujú markanty. Funkcia *bwmorph()* vykonáva špecifické morfológické operácie, ktoré analyzujú a modifikujú binárne obrazy podľa určitých pravidiel. Morfológickú operáciu určíme reťazcom s jej názvom, ktorý odovzdáme ako argument funkcie *bwmorph()*. My sme využili zopár týchto operácií, no najdôležitejšou z nich bola operácia s názvom *thin* – zúženie objektov na 1-bodové čiary. Papilárne línie, ktoré obsahujú diery (či už prirodzené alebo falošné) sa prevedú na tenké čiary obsahujúce oká.

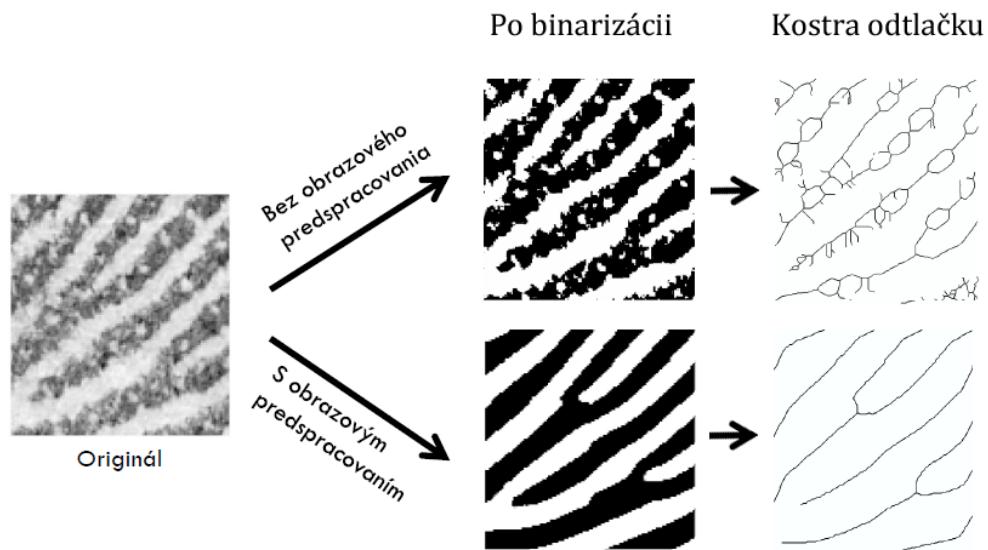
Krátky opis použitých morfológických operácií, v poradí v akom boli aplikované na binárny odtlačok:

- *thin* – zúženie hrúbky papilárnych línii
- *clean* – odstraňovanie izolovaných obrazových bodov (hodnota 1 obklopená 0)
- *fill* – vyplnenie vnútorných izolovaných bodov (hodnota 0 obklopená 1)
- *hbreak* – odstránenie štruktúr v tvare H
- *spur* – odstránenie 1-bodových výbežkov z papilárnych línii



Obrázok 54 Kostra odtlačku vytvorená použitím morfológickej funkcie *bwmorph()*

Na tomto mieste by sme chceli opäťovne zdôrazniť prínos Gaborovho filtra pri spracovaní odtlačkov. Kostra odtlačku vytvorená v tomto kroku je podkladom pre extrakciu markantov. Hlavným cieľom je, aby bola čo najviac podobná originálnemu odtlačku a obsahovala nezmenené polohy a tvary markantov. Ľudským okom jasne rozpoznateľný tvar v pôvodnom odtlačku môže byť pri absencii techniky filtrovania prevedený do skreslenej podoby. Táto situácia je ilustrovaná na obrázku 55, kde vidíme porovnanie kostry odtlačku vytvorenej bez predchádzajúceho spracovania Gaborovym filtrom a s ním.



Obrázok 55 Vplyv spracovania obrazu Gaborovým filtrom na kvalitu kostry odtlačku

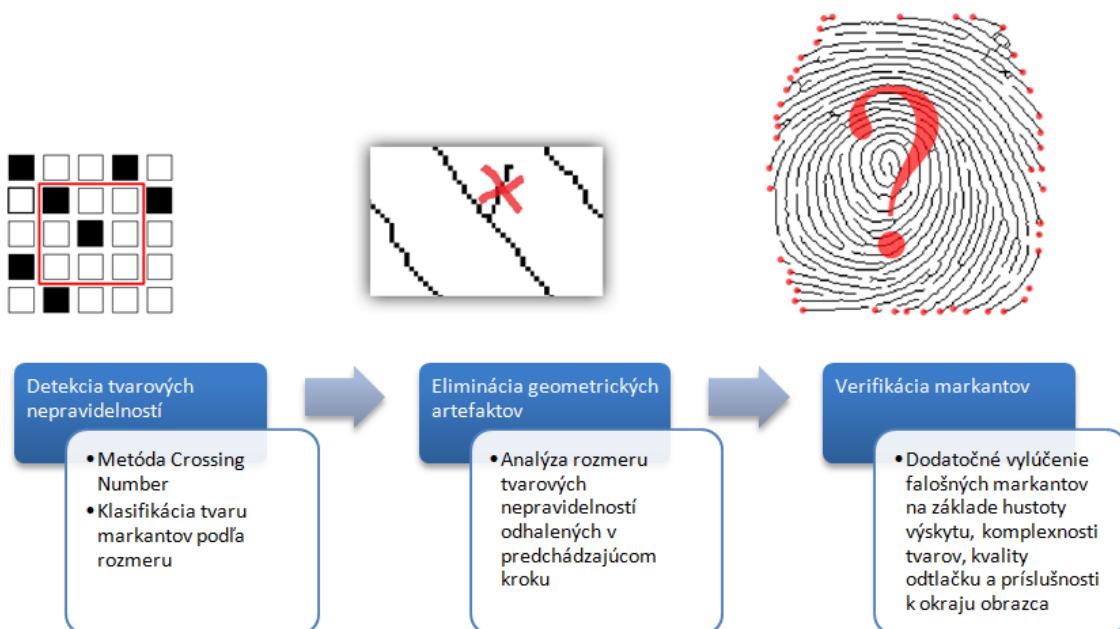
2.3 Postup pri návrhu extrakcie markantov

Vstupným parametrom do modulu extrakcie markantov bola kostra odtlačku. Modul extrakcie vie momentálne rozpoznávať 5 najfrekventovanejších tvarov markantov. Podľa sekvenčného diagramu na obrázku 33 v časti 2.1 je prvým krokom spracovania v tomto module detekcia tvarových nepravidelností a ich následná klasifikácia podľa tvaru. Tvarovými nepravidelnosťami myslíme 2 základné topologické štruktúry: ukončenie a rozdvojenie papilárnej línie. Z nich sa dajú odvodiť všetky markenty, ktoré sú uvedené v klasifikačnej schéme v tabuľke 1 v časti 1.3.5. Na detekciu tvarových nepravidelností sme využili metódu Crossing Number. Aby sme mohli v tejto množine rozpoznať tvar 5 najfrekventovanejších markantov (vidlica,

ukončenie, jazero, fragment a izolovaný bod) potrebovali sme tvarové nepravidelnosti klasifikovať podľa pravidiel stanovených v časti 1.5.3. Základným nástrojom na rozlišovanie markantov bola stanovená konštantă L vyjadrujúca priemernú vzdialosť medzi dvoma susednými potnými pôrmi papilárnej línie.

Ďalším krokom bola eliminácia niektorých umelých konfigurácií papilárnych línii. Analýzou inverzného obrazu kostry a vyšetrovaním každej tvarovej nepravidelnosti v predchádzajúcej fáze sme z kostry odtlačku odstránili body tvoriace falosné markanty a zúžili sme tak množinu extrahovaných markantov. Elimináciu bolo možné zaradiť ako prvý krok modulu extrakcie, ale z dôvodu vyhodnotenia miery úspešnosti odstraňovania falosných markantov sme ju zaradili až za detekciu a klasifikáciu tvarových nepravidelností.

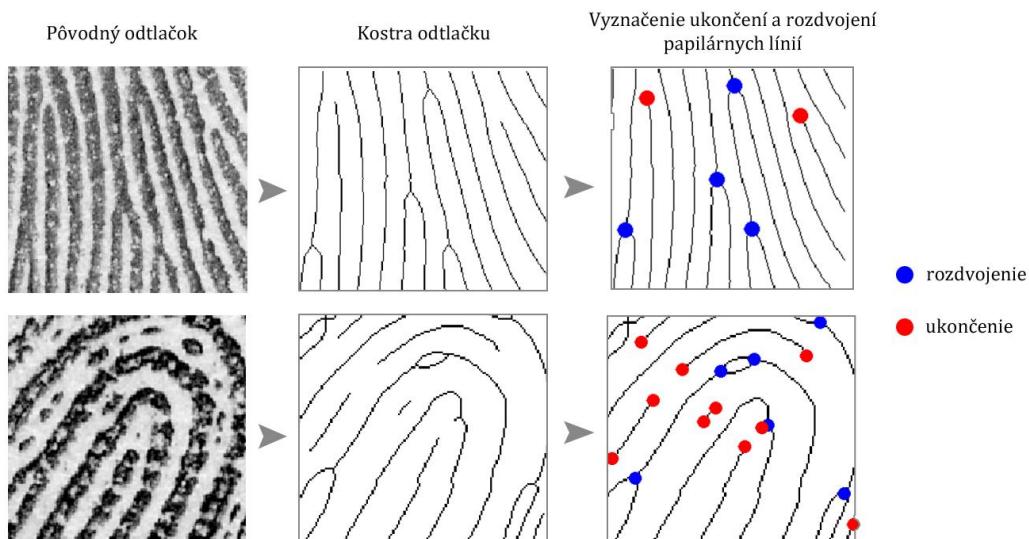
Konečnú množinu extrahovaných markantov sme nadobudli po verifikácii markantov. Úlohou verifikácie bolo vylúčiť tie markanty, ktoré sa vyskytovali v obrazci odtlačku v hustých zhľukoch, boli súčasťou umelých prepojení v tvare H, nachádzali sa na okraji vzoru odtlačku alebo boli ich miesta výskytu označené koherenčnou mapou za nevhodné na spoľahlivú extrakciu. Celý postup je graficky znázornený na obrázku 56.



Obrázok 56 Proces extrakcie markantov

2.3.1 Detekcia tvarových nepravidelností a klasifikácia markantov

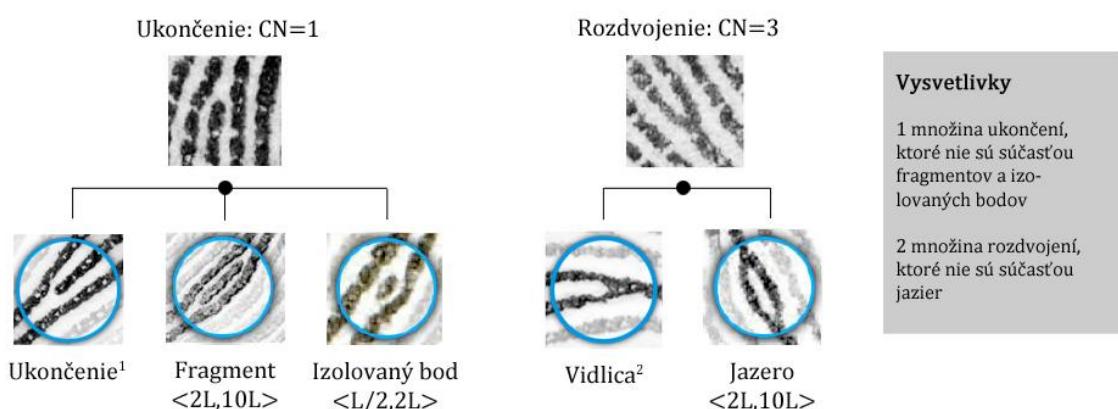
Ukončenia a rozdvojenia papilárnych línii, ktoré boli najfrekventovanejšími markantami sme odhalili v kostre odtlačku prostredníctvom metódy Crossing Number. Jej princíp je stručne charakterizovaný v časti 1.5.5. Vyšetruje sa okolie čiernych bodov, ktoré v kostre patria papilárnym líniám. Pre každý bod papilárnej línie sa vypočíta ukazovateľ s názvom CN , ktorý vyjadruje počet susedných bodov patriacich papilárnym líniám. Ak $CN = 3$, tak je vyšetrovaný bod pozíciou rozdvojenia papilárnej línie. Ak $CN = 1$, potom je bod označený ako ukončenie papilárnej línie (viď obrázok 31 v časti 1.5.5). Pozície odhalených ukončení a rozdvojení sú graficky vyznačené na obrázku 57. Na tomto obrázku je v hornom riadku označenie tvarových nepravidelností v odtlačku s kvalitnou štruktúrou obrazca. V spodnej riadku vidíme okrem skutočných tvarov aj označenie nepravidelností, ktoré sa v pôvodnom odtlačku nenachádzajú. Táto situácia vznikala často pri odtlačkoch s nižšou kvalitou papilárneho terénu. Ošetrením týchto nedostatkov sa budeme venovať v častiach 2.3.2 a 2.3.3. Detekcia ukončení a rozdvojení je implementovaná vo funkcií *fingerDetection()*.



Obrázok 57 Ukončenia a rozdvojenia odhalené metódou Crossing Number

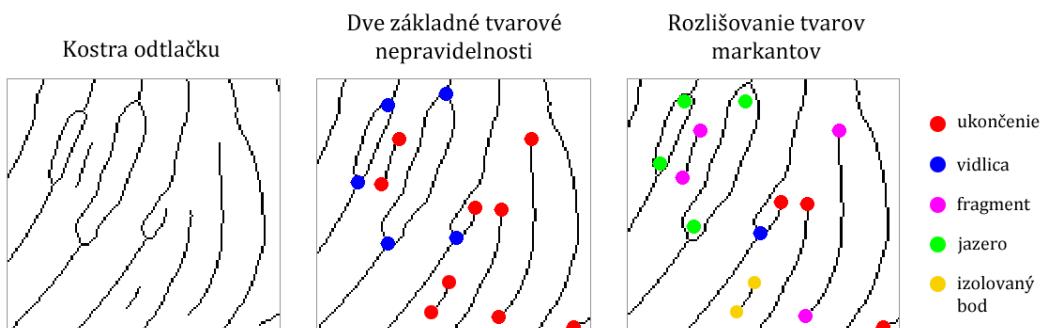
Náš softvérový modul extrakcie dokáže rozpoznať 5 tvarov markantov, ktoré sú všeobecne považované za najfrekventovanejšie. Všetkých 5 tvarov sa dá odvodiť od 2 základných tvarových nepravidelností: ukončenie a rozdvojenie papilárnej línie. Po odhalení tvarových nepravidelností, sme ďalej vyšetrovali ich vlastnosti a klasifikovali

sme ich do 5 tvarových tried. Množinu rozdvojení papilárnych línií sme rozdelili na 2 podmnožiny podľa vlastností rozdvojenia: vidlice a jazerá (tie boli tvorené dvojicami rozdvojení, ktorých vetvy sa navzájom spájali). Markant vidlica sa odlišoval od jazera tým, že dve vetvy papilárnych línií sa na určitej vzdialosti opäťovne nezlúčili. Podobným spôsobom sa rozdelila množina všetkých ukončení. Niektoré ukončenia boli priamo markantmi a osobitné rozmiestnenia dvojíc ukončení tvorili zriedkavé markanty ako sú fragment a izolovaný bod. Takto sme vytvorili množiny 5 najfrekventovanejších tvarov markantov. Schéma klasifikácie dvoch základných tvarových nepravidelností (ukončenie a rozdvojenie) do 5 tvarových tried je znázornená na obrázku 58.



Obrázok 58 Rozlišovanie 5 tvarových typov markantov

Na ilustráciu klasifikácie tvarových nepravidelností do 5 tried markantov uvádzame obrázok 59. Vľavo vidíme kostru odtlačku, v strede označenie základných tvarových nepravidelností a vpravo sú základné nepravidelnosti klasifikované podľa rozmerov a špecifických konfigurácií do jednotlivých tried markantov. Na klasifikáciu tvarov sme použili pravidlá stanovené v časti 1.5.3.



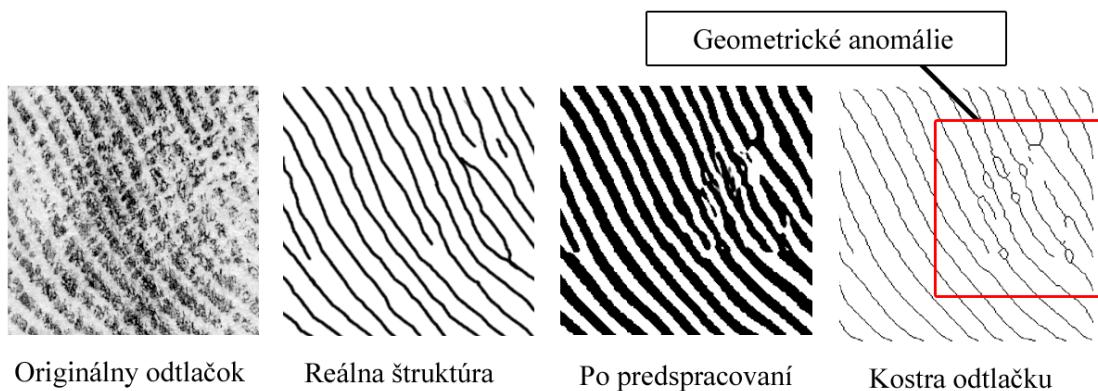
Obrázok 59 Označovanie markantov odhalených implementovaným softvérom

2.3.2 Eliminácia geometrických anomalií v kostre odtlačku

Kostra odtlačku bola charakteristická tým, že zvýraznila všetky chyby, ktoré neodstránilo obrazové predspracovanie. Podľa (Maltoni et al., 2009, s. 143) sa dajú problémy reprezentácie odtlačku prostredníctvom kostry rozdeliť do týchto 3 kategórií:

- Transformácia pôvodného odtlačku nízkej kvality do podoby kostry je proces, v ktorom je náročné zachovať pôvodnú štruktúru odtlačku.
- Vo fázach obrazového predspracovania dochádza k eliminácii pôvodných markantov.
- Obrazové predspracovanie má tendenciu vytvárať mnohé umelé tvary, ktoré nie sú fyzicky prítomné v odtlačku.

V kostrách sa vyskytujú umelé papilárne línie, kde zaraďujeme malé výbežky, diery v liniach, veľmi krátke papilárne línie, 1-bodové línie, premostenia, rozseknutia a kombinácie všetkých spomenutých útvarov. Výsledkom bolo, že podmnožina pôvodných markantov bola tvarovo deformovaná a nové útvary prispievali k zvýšenému počtu detekcie falošných markantov. Na obrázku 60 je ukážka kostry časti odtlačku nízkej kvality a okolie, ktoré bolo natoľko rozmanité, že vytvorilo namiesto súvislých linií spletitý obrazec tvarov, ktoré v skutočnosti neexistujú.



Obrázok 60 Umelo vytvorené tvary v kostre odtlačku

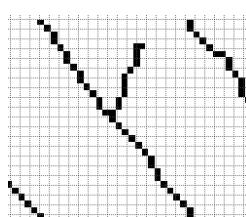
Rozhodli sme sa teda hned po extrakcii základných tvarových nepravidelností pomocou metódy CN, implementovať algoritmus priameho odstránenia niektorých falošných útvarov. Preverovali sme teda už len tie body, ktoré boli označené ako vidlice

alebo ukončenia, pretože z nich sú utvorené všetky valídne a falošné útvary v kostre odtlačku. Na zvýšenie úspešnosti extrakcie stačilo nájdené markanty len overiť, nebolo treba ich odstrániť. Na účely vzájomnej výmeny dát pre potreby rozpoznávania boli vyvinuté kódovacie štandardy extrahovaných markantov a niektoré si vyžadujú okrem údajov o markantoch ukladanie kostry odtlačku. Príkladom je štandard ISO/IEC 19794-2 zavedený v roku 2005 (Maltoni et al., 2009, s. 155). My sme sa rozhodli modifikovať kostru odstránením geometrických kazov, aby jej štruktúra zodpovedala množine extrahovaných markantov a bola tak vhodná na uloženie do kompatibilného formátu, ktorý by sa dal použiť v biometrických systémoch.

Na základe nášho pozorovania sme definovali najčastejšie útvary, ktoré v kostre odtlačku vznikli ako dôsledok neobnovenej štruktúry. Existuje viacero falošných tvarov, ktoré môžeme nájsť v kostre odtlačku (Maltoni et al., 2009, s. 158). Avšak kvôli ich tvarovej komplexnosti sme ich priamo z obrazu neodstraňovali, ale sme ich vylúčili v procese verifikácie markantov, ktorá je opísaná v časti 2.3.3. Na odstránenie uvedených útvarov sme použili stopovanie bodov papilárnych línii a pravidlá založené na porovnávaní rozmerov. Postup eliminácie umelých útvarov je implementovaný vo funkcií *fingerGeoElim()*. Odstránením týchto útvarov sme dosiahli priemerný nárast úspešnosti extrakcie markantov 8 %. Špecifikovali sme tieto umelé útvary:

- Umelý výbežok
- Umelý fragment
- Umelý izolovaný bod
- Umelé jazero

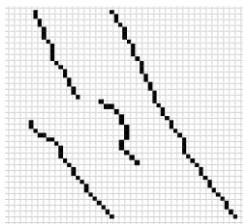
a) umelý výbežok



Umelé výbežky vznikali väčšinou v dôsledku necelistvosti kontúr papilárnych línii. V kostre boli reprezentované ako krátke čiary, ktoré vychádzali najčastejšie v kolmom smere na materskú papilárnu líniu. Z obrazu sme ich eliminovali porovnaním s prahovou hodnotou L . Postupne sme vyšetrovali každý bod tvarovej nepravidelnosti, ktorý bol označený ako ukončenie. Od bodu ukončenia sme sledovali papilárnu, ktorá k nemu prislúchala. Ak sa nachádzalo vo

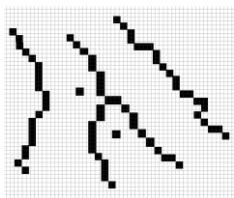
vzdialenosť $L/2$ a menšej (od ukončenia) rozdvojenie papilárnej línie, tak sme daný výbežok nahradili bielymi bodmi, čím sme ho odstránili z obrazu.

b) *umelý fragment*



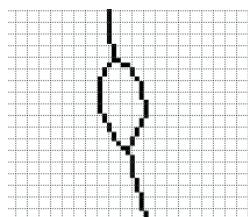
Prirodzené fragmenty papilárnych línií sme odlišovali od umelých na základe ich dĺžky. Umelý fragment predstavoval veľmi krátku líniu, kratšiu ako základná jednotka L . Jeho rozmer sme určili v intervale $<1, L/2>$. Postupne sme vyhodnocovali množinu ukončení a keď sme zistili, že od daného bodu viedie krátká línia, ktorá na danej vzdialenosť končí, všetky obrazové body k nej patriace sme odstránili. V duálnej kostre zodpovedalo k umelému fragmentu veľmi krátke jazero. Tieto obrazové útvary boli dôsledkom rozdelenia jednej línie na viacero častí vplyvom nízkej kvality alebo premenlivosti intenzity papilárnej línie. Zastupovali takisto aj malé vmedzerené papilárne línie, ktoré sme pri extrakcii ignorovali.

c) *umelé izolované body*



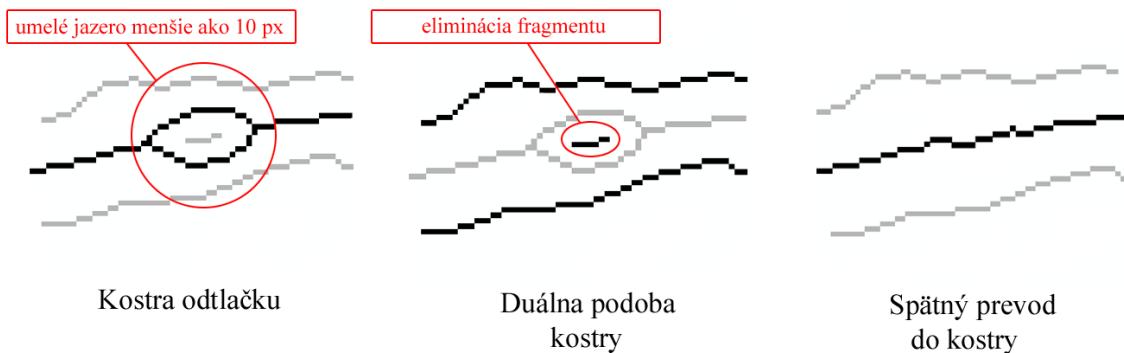
Tieto útvary boli pozostatkom drobných umelých častíc v obraze, pretože pri rozlíšení 1 000 dpi nemohli vzhľadom na ich veľkosť predstavovať žiadnu prirodzenú vlastnosť papilárnej línie. Tieto body boli eliminované priamo prostredníctvom metódy CN. Ak $CN = 0$, tak bol vyšetrovaný bod z obrazu odstránený.

d) *umelé jazero*



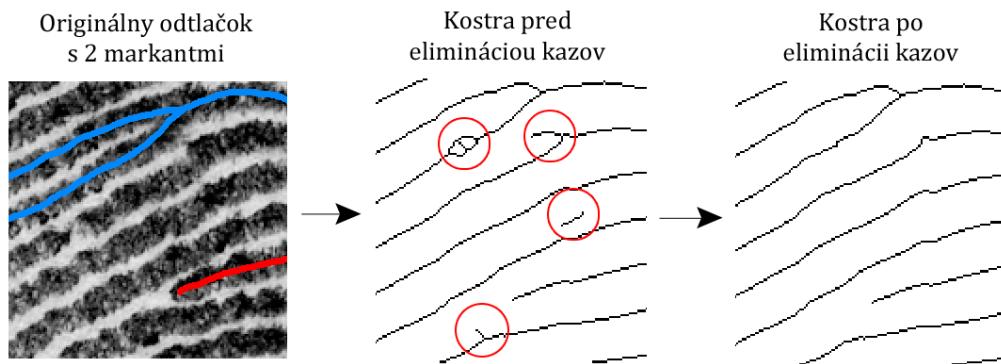
Papilárne línie obsahujú potné póry, ktoré sú pri mnohých snímacích technológiách odtlačkov v obraze zastúpené svetlými bodmi. Príliš veľké póry neboli zahladené ani Gaborovym filtrom a tak sa prenesli do binárneho obrazu, kde sa po zúžení hrúbky papilárnych línií prejavili v kostre ako umelé jazerá. Tu sme mohli využiť fakt, že tieto útvary majú podobný rozmer ako samotné póry resp. sú kratšie ako vzdialosť L . V kostre, sme ich mohli identifikovať ako dve blízke vidlice. Na zjednodušenie ich hľadania sme si pomohli duálnou podobou kostry, kde

vystupovali ako krátke fragmenty, ktorých elimináciu sme opísali v bode b). Po ich odstránení z duálneho obrazu sme opäť obraz previedli do pôvodnej kostry. Tento proces je zachytený na obrázku 61. Umelé jazerá sa zvykli vyskytovať v zhľukoch na miestach, kde papilárne línie mali husto rozmiestnené póry.



Obrázok 61 Postup pri eliminácii umelého jazera

Eliminácia vyššie definovaných útvarov je zachytená obrázkom 62. Vľavo vidíme výrez z originálu odtlačku, ktorý obsahuje len 2 markanty: ukončenie a vidlicu. V strede je kostra odtlačku, ktorá obsahuje niektoré útvary, ktoré boli vygenerované počas obrazového predspracovania z dôvodu neideálnych geometrických vlastností papilárnych línií. Vpravo je kostra, z ktorej boli odstránené umelé útvary v spracovaní vo funkcií *fingerGeoElim()*.



Obrázok 62 Výsledok eliminácie umelých útvarov z kostry odtlačku

2.3.3 Verifikácia markantov

Po eliminácii základných geometrických kazov kostry odtlačku sme pristúpili k záverečnej verifikácii markantov. Bol to posledný krok, v ktorom bolo úlohou vylúčiť z množiny markantov tie útvary papilárnych línii, ktoré spĺňali kritériá overované v jednotlivých krokoch ilustrovaných diagramom na obrázku 63. Implementácia verifikácie markantov je vo funkcií *fingerVerification()*.



Obrázok 63 Proces verifikácie markantov

a) hľadanie umelých prepojení v tvare „H“ a umelých preseknutí

V miestach nespracovaného odtlačku, kde sa papilárne línie k sebe veľmi približovali alebo v poškodených oblastiach sa často vyskytovali umelé prepojenia papilárnych línii v tvare písmena H. Na Obrázku 64 vidíme umelé prerušenie línie (vľavo) a H štruktúru a jej kombinácie (vpravo).



Obrázok 64 Umelé prerušenie papilárnej línie a H štruktúra
(Maltoni, D. et al.: *Handbook of Fingerprint Recognition*, 2009, s.158)

Prepojenia v tvare H sme neodstraňovali nakoľko sa nedalo spoľahlivo určiť, ktorá časť tohto umelého útvaru je skutočne prítomná vo vzore odtlačku a ktorá je falošná. Tak sme tieto časti v odtlačku ponechali, ale po ich odhalení sme ich vylúčili z množiny extrahovaných markantov.

Postup pri hľadaní umelých prepojení sa dá zhrnúť do týchto bodov:

1. Vybrali sme z množiny extrahovaných markantov iba vidlice pretože umelé prepojenia boli tvorené len z vidlíc.
2. Stopovali sme všetky 3 vetvy každej vidlice maximálne do dĺžky L .
3. Ak niektorá z vetiev obsahovala iný bod označený ako vidlica, tak potom sa všetky tieto body vrátane analyzovanej vidlice označili ako falošné markanty.

Umelé prerušenia sme hľadali v množine ukončení. Do každého ukončenia sme zafixovali obrazový blok o veľkosti $L/2 \times L/2$. Ak sa v bloku nachádzalo iné ukončenie, tak sme obe považovali za falošné.

b) vylúčenie oblastí s nadštandardnou hustotou výskytu markantov

Z experimentálnych výsledkov, ktoré uviedol R. Thai vo svojej publikácii (2003) sme sa dozvedeli, že priemerná hustota markantov je 1 markant/ 5 mm^2 , čo je v prepočte 0,2 markantu/ 1 mm^2 . Aj iné štúdie hustoty markantov v literatúre uvádzajú podobnú priemernú hustotu. Hodnota 1 mm^2 predstavuje približne 40 obrazových bodov. Na základe tejto štatistickej vlastnosti sme založili náš postup pri vylúčení falošných markantov patriacich do zhľukov s vysokou hustotou na malej ploche:

1. Kostru odtlačku sme rozdelili do blokov 40×40 obrazových bodov.
2. Vypočítali sme počet markantov padajúci na každý blok.
3. Ak sa v niektorom bloku nachádzali viac ako 2 markanty, tak sme ich označili za falošné

Niekedy sa zvyknú nachádzať dva markanty blízko vedľa seba, napríklad dve prekrývajúce sa ukončenia alebo viacero fragmentov idúcich za sebou. Z toho dôvodu sme hranicu tolerancie posunuli až nad 2 markanty.

c) eliminácia podľa koherenčnej mapy

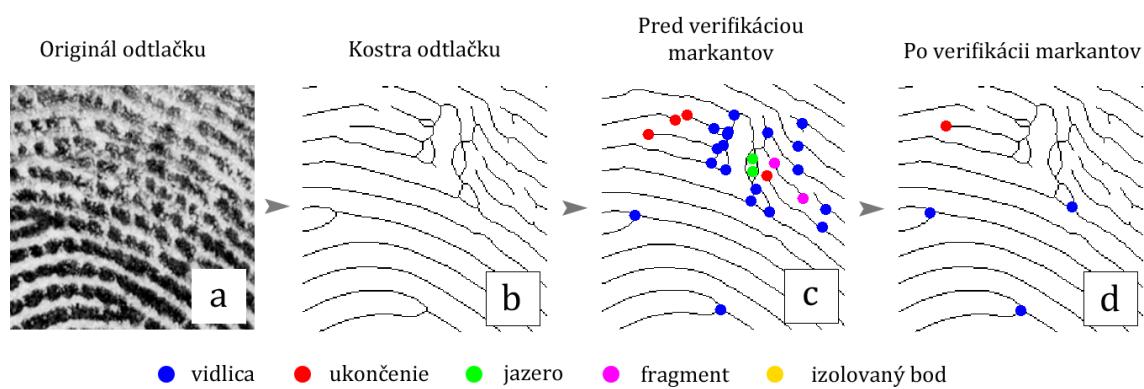
Koherenčná mapa bola vypočítaná zo smerovej mapy odtlačku, aby ukázala miesta, kde dochádza k chaotickej orientácii papilárnych línii, čo bolo v mnohých prípadoch spôsobené poškodeným papilárny terénom. Spoločnosť extrakcie v týchto

oblastiach bola veľmi nízka a preto sme ignorovali markanty v tých obrazových blokoch, ktoré koherenčná mapa vyhodnotila ako nevhodné. Za nevhodné sme považovali tie bloky, kde hodnota koherencie bola v intervale $< 0,0.25 >$.

d) vylúčenie ukončení papilárnych línii, ktoré boli na okraji dakyloskopického vzoru

Každý odtlačok obsahoval na svojich okrajoch množstvo ukončení. Tieto ukončenia nepredstavujú reálne markanty, ani sa nepoužívajú pri identifikácii. Preto sme sa ich rozhodli vylúčiť z množiny pravých markantov. Ako pravidlo sme použili porovnanie vzdialenosí s hraničnými bodmi masky segmentácie, ktorá hovorila, ktoré obrazové body patria odtlačku a ktoré nepatria. Postupne sme vyšetrali každý okrajový bod masky. Ak sa v jeho okolí 10×10 obrazových bodov nachádzal markant, tak bol označený za falošný. Okraje segmentačnej masky sme získali použitím funkcie *bwmorph()* v operačnom móde „remove“, ktorý vytvoril maticu s okrajovými bodmi masky.

Ošetrenie množiny extrahovaných markantov v zmysle vyššie opísanej verifikácie môžeme vidieť v ukážke na obrázku 65. Znázorňuje originál odtlačku (a), kostru odtlačku (b) a odhalené markanty v kostre, ktoré prislúchajú nekvalitným časťam papilárneho terénu a vyskytujú sa v príliš hustých zoskupeniach (c). Po verifikácii zostalo v papilárnom teréne označených menej markantov, pričom vylúčené označenia zodpovedali v prevažnej miere falošným markantom (d).



Obrázok 65 Verifikácia markantov v odtlačku v zhoršenej kvalite

3 ZHODNOTENIE IMPLEMENTOVANÉHO RIEŠENIA

3.1 Celkové zhodnotenie splnenia vytýčených cieľov

Všetky algoritmy obnovy kvality vzoru odtlačku a extrakcie markantov boli implementované v prostredí Matlab 2011b vo verzii pre operačný systém Windows. Algoritmy boli testované na PC so 4-jadrovým procesorom Intel Core i3 s frekvenciou 2,53 GHz a 4 GB RAM pamäťou. Použitý bol 64-bitový operačný systém Windows 7 Home Premium. Testovacie obrázky odtlačkov boli z obrazového formátu PSD prevedené do formátu JPEG. Obrázky boli taktiež prevedené z RGB farebného profilu do režimu Grayscale, teda úrovní šedej farby. Boli zosnímané v rozlíšení 1 000 dpi, kde bolo hlavné kvalitatívne kritérium viditeľnosť potných pórov. Rozmery obrázkov v obrazových bodov boli rôzne, nakoľko boli odtlačky softvérovo ručne vyrezávané z digitalizovaných daktyloskopických kariet.

Splnenie cieľov teoretickej časti práce

Úlohou teoretickej časti práce bolo objasnenie hlavných pojmov v oblasti biometrie, biometrických systém a charakteristika pozadia riešeného problému. Časť 1.2 priniesla základné informácie o prínose biometrie a opis činnosti moderných biometrických systémov. Našu pozornosť sme sústredili hlavne na dve činnosti biometrického systému: obrazové predspracovanie a extrakciu markantov. V časti 1.3 sme analyzovali východiská našej práce a motiváciu spočívajúcu v skúmaní charakteristických vlastností odtlačkov. Biometrické rozpoznávanie identity je procesom, v ktorom sa spracúva obrazec odtlačku obsahujúci mnohé vzory tvorené papilárnymi líniemi. Štruktúru obrazcov papilárnych línií sme teoreticky spracovali v častiach 1.3.3 a 1.3.4. Vlastnosti daktyloskopických markantov a ich klasifikačná schéma (tabuľka 1), z ktorej sme vychádzali pri implementácii softvéru sú obsahom časti 1.3.5. Princíp metód obnovy obrazovej kvality odtlačku je spracovaný v časti 1.4. Jadrom tejto časti je opis techník, ktoré upravujú obrázok odtlačku do vhodnej formy na extrakciu markantov. Text v časti 1.5 opisuje použitú metodiku overenia úspešnosti extrakcie markantov a rovnako obsahuje definíciu pravidiel použitých pri rozpoznávaní vzorov markantov. Nástrojom na automatizované odhalenie pozícii dvoch základných

tvarov markantov je metóda Crossing Number, ktorej sme sa venovali v časti 1.5.5. V rámci kapitoly 2 uvádzame podrobný popis krokov návrhu softvérového riešenia extrakcie markantov. V prehľade v časti 2.1 je prezentovaná schéma dvoch hlavných modulov softvéru a stručný rozbor postupnosti algoritmov, ktoré ich tvoria. Diskusia a vysvetlenie zvoleného postupu pri implementácii týchto algoritmov je obsahom častí 2.2 a 2.3. Na ilustráciu postupov a dosiahnutých výsledkov sme text doplnili o obrázky, ktorými sa snažíme zdôrazniť špecifickú zvoleného spôsobu riešenia čiastkových problémov.

Splnenie cieľov praktickej časti práce

Výsledkom praktickej časti práce je implementovaný softvér, ktorého úlohou je spracovať obrazec papilárneho terénu odtlačku a extrahovať z neho charakteristické znaky – markanty. Navrhnutý softvér je zložený z dvoch modulov. Modul obrazového predspracovania spracúva originál odtlačku v odtieňoch šedej farby a jeho výsledkom je kostra odtlačku. Kostra je reprezentácia obrazca odtlačku, v ktorej je hrúbka papilárnych línii 1 obrazový bod. Najdôležitejším nástrojom obrazového predspracovania bol Gaborov filter, ktorý obnovoval štruktúru odtlačku priamou modifikáciou lokálneho smeru a frekvencie papilárnych línii. Druhý modul softvéru bol založený na analýze tvarov a konfigurácií papilárnych línii. Jeho cieľom bolo rozpoznať markanty v kostre odtlačku a klasifikovať ich podľa tvaru. Každý tvar markantu má osobitnú početnosť výskytu v odtlačkoch určitej populácie. V súčasnom stave náš softvér rozlišuje medzi 5 najfrekventovanejšími tvarmi markantov vo vzorke odtlačkov pochádzajúcich zo zbierky KEÚPZ. Na zvýšenie úspešnosti extrakcie sme implementovali techniku eliminácie geometrických artefaktov kostry a verifikácie markantov. Tieto techniky sú opísané postupne v častiach 2.3.2 a 2.3.3. Technická dokumentácia so špecifikáciou vstupov a výstupov algoritmov a komentárimi k zdrojovým kódom sa nachádza na CD priloženom k práci.

Priemerný čas trvania jednotlivých procesov implementovaného softvéru

Časovo najnáročnejšou fázou v rámci modulu obrazového predspracovania bola aplikácia Gaborovho filtra – v priemere 13,71 s. Do tohto času sa započítalo trvanie výpočtu smerovej mapy odtlačku, výpočtu frekvenčnej mapy a samotná aplikácia filtra na všetky obrazové body. Druhou najdlhšou operáciou bola segmentácia daktyloskopického vzoru – 6,37 s. Najväčší podiel na tomto fakte má aplikácia Wienerovho filtra, ktorá je potrebná na vylúčenie blokov obrazu okolia odtlačku z masky, ktorá určuje obrazec papilárnych línií. Počas aplikácie tohto filtra sa odstraňuje šum počítaním štatistiky blokov obrazu. Čím väčší obrazový blok sa použije, tým má filter väčší účinok na potlačenie šumu. Veľkosť bloku však výrazne ovplyvňuje výpočtový čas. My sme aplikovali filter 3-krát postupne s rozmermi bloku 300×300 , 200×200 a 150×150 obrazových bodov. Najkratšie trvala normalizácia histogramu odtlačku – priemerne 0,05 s.

Tabuľka 3 Priemerná dĺžka trvania krokov modulu obrazového predspracovania

Algoritmus	Čas trvania (v sekundách)
Segmentácia daktyloskopického vzoru	6,37
Normalizácia histogramu	0,05
Aplikácia Gaborovho filtra	13,71
Odhad kvality papilárneho terénu	6,02
Adaptívna binarizácia	0,41
Zúženie hrúbky papilárnych línií	2,16
Spolu	28,72

Najdlhší čas v rámci modulu extrakcie markantov dosiahol algoritmus verifikácie markantov, ktorý vylučoval z množiny extrahovaných markantov tie markanty, ktoré boli súčasťou komplikovaných tvarov, vyskytovali sa v príliš hustých zhlukoch, boli na okrajoch odtlačku alebo sa vyskytovali v miestach, kde koherenčná mapa. V priemere trvala verifikácia 9,77 s. Najkratší čas dosiahol algoritmus eliminácie geometrických anomálií v kostre odtlačku s priemerným časom 4,21 s.

Tabuľka 4 Priemerná dĺžka trvania krokov modulu extrakcie markantov

Algoritmus	Čas trvania (v sekundách)
Detekcia tvarových nepravidelností	8,34
Klasifikácia markantov podľa tvaru	4,45
Eliminácia geometrických anomálií	4,21
Verifikácia markantov	9,77
Spolu	26,77

3.2 Zhodnotenie techník predspracovania a obnovy obrazovej kvality

Pred extrakciou markantov bolo nutné, aby odtlačok podstúpil proces obrazového predspracovania a obnovy kvality jeho štruktúry. Obrázky odtlačkov obsahovali okrem daktyloskopického obrazca aj nepotrebné okolie. Oddelenie okolia od pozadia sme použili metódu merania rozptylu intenzity obrazových bodov v malých blokoch obrazu. Nízky rozptyl bloku naznačoval neprítomnosť striedavého vzoru papilárnych línii odtlačku a tak sa blok nezaradil k daktyloskopickému vzoru. Problematické boli časti rozmazaného papilárneho terénu, ktoré patrili odtlačku, ale neboli charakteristické vyšším rozptylom intenzity. Rozmazané časti boli väčšinou tmavšie ako okolie. Časti obrazu, ktoré boli tmavšie ako globálny priemer boli zaradené do daktyloskopického vzoru. Algoritmus segmentácie daktyloskopického vzoru označoval pomerne presne skutočný daktyloskopický vzor. Časti obrazu s nižším kontrastom niekedy neboli správne zaradené do daktyloskopického vzoru pretože nedosahovali požadovaný rozptyl ani priemernú intenzitu obrazových bodov.

V procese normalizácie histogramu odtlačku sme zvyšovali kontrast medzi papilárnymi líniami a svetlým pozadím odtlačku. Týmto spôsobom boli zdôraznené obrys papilárnych línii, čo zabraňovalo ich umelému prepojeniu pri spracovaní Gaborovym filtrom.

Po normalizácii histogramu nasledovalo spracovanie odtlačku Gaborovym filtrom, ktorý obnovoval pôvodné tvary obrazca odtlačku. Gaborov filter bol parametrizovaný lokálou orientáciou a frekvenciu papilárnych línii. Gaborov filter

obnovoval celistvosť papilárnych línii, ktorá bola skreslená geometrickými deformáciami alebo príliš veľkými potnými pórmi. Potné póry v niektorých miestach predeľovali papilárne línie. Gaborov filter bol schopný tieto miesta opäťovne prepojiť. V miestach, kde bola hranica medzi papilárnymi líniami takmer neviditeľná dochádzalo dôsledkom aplikácie filtra k umelým spojeniam, čo sa neskôr prejavilo pri extrakcii markantov. Vo všeobecnosti však Gaborov filter zachovával rozmiestnenia aj tvary markantov. Našou snahou do budúcnosti je implementovať modifikovaný Gaborov filter, ktorý je opísaný na konci časti 1.4.4. Modifikácia spočíva v zavedení nového matematického vyjadrenia Gaborovho filtra, ktoré lepšie modeluje vlastnosti odtlačku hlavne v oblastiach s príliš širokými alebo úzkymi papilárnymi líniami.

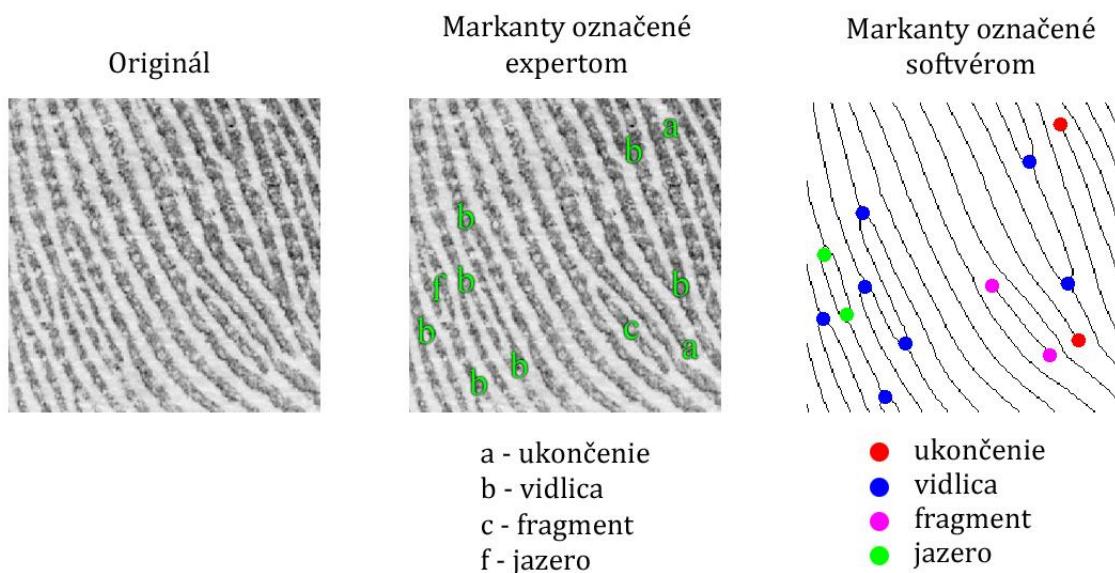
Papilárny terén vykazuje v lokálnych oblastiach konštantný smer aj frekvenciu. Odtlačky s prítomnosťou šumu alebo akéhokoľvek iného zdroja degradácie štruktúry odtlačku nie sú smerovo jednotné. Poškodený papilárny terén sme odhalili meraním lokálnych rozptylov smeru v smerovej mape odtlačku. Netypicky vysoké hodnoty rozptylu do vysokej miery reprezentovali porušený papilárny terén. Rozdelením obrázku odtlačku na malé bloky a výpočtom smerovej jednotnosti v každom z nich sme vypočítali tzv. koherenčnú mapu. Koherenčná mapa priradovala každému bodu odtlačku vyjadrenie smerovej jednotnosti jeho okolia. Markanty, ktoré boli v ďalších krokoch extrahované v smerovo nejednotných blokoch boli ignorované.

Poslednými dvoma krokmi obrazového predspracovania bola binarizácia odtlačku a zúženie hrúbky papilárnych línii. Odtlačok v binárnej forme bol definovaný len hodnotami 0 a 1 s priemernou hrúbkou papilárnej línie približne 10 obrazových bodov. Zúžením hrúbky papilárnych línii prostredníctvom morfologických operácií sme vytvorili kostru odtlačku, ktorá bola charakteristická tým, že všetky papilárne línie mali hrúbku 1 obrazový bod. Kostra odtlačku umožnila jednoduché stopovanie a analýzu tvarov a rozmerov papilárnych línii, ktoré sme následne využili pri extrakcii markantov.

Prínos techník obrazového predspracovania pri extrakcii markantov hodnotíme v časti 3.3. Porovnali sme úspešnosť softvérovej extrakcie markantov s použitím týchto techník a bez nich. Vyššiu úspešnosť sme zaznamenali práve s ich použitím a preto považujeme ich zahrnutie do softvéru aj napriek predĺženiu výpočtového času za logický a potrebný krok.

3.3 Zhodnotenie extrakcie markantov

Ukazovateľom úspešnosti softvérového riešenia pri extrahovaní markantov bol index extrakcie markantov definovaný vzťahom (17) v časti 1.5.2. Na výpočet indexu extrakcie markantov sme potrebovali mať k dispozícii výsledky manuálnej extrakcie markantov vykonanej forenzným expertom. Index vyjadroval aký podiel predstavujú skutočné (expertom označené) markanty v množine všetkých softvérovo odhalených markantov. Podiel expertom označených markantov v množine extrahovaných markantov našim softvérom sme získali porovnaním grafického vyznačenia v obrázkoch. Expert označoval markanty malými písmenami abecedy, pričom každé písmeno zastupovalo iný tvarový typ markantu. Náš softvér označoval markanty farebnými bodmi. Ukážka časti papilárneho terénu s označenými markantmi je na obrázku 66.



Obrázok 66 Množina markantov odhalených expertom a našim softvérom

Náš softvér sme testovali na súbore 30 odtlačkov, kde boli v rovnakom pomere zastúpené kvalitné aj nekvalitné odtlačky. Celkovú dosiahnutú úspešnosť extrakcie markantov a úspešnosť extrakcie jednotlivých tvarov markantov uvádzame v grafe na obrázku 67. Graf obsahuje dva rady – modrý a červený. Modrý rad graficky znázorňuje index extrakcie bez použitia techník obrazového predspracovania a červený rad je vizualizáciou indexu extrakcie s použitím obrazového predspracovania.

Najnižšiu hodnotu indexu extrakcie pri absencii predspracovania (9,1 %) dosiahol izolovaný bod hlavne kvôli tomu, že v poškodených častiach odtlačku dochádzalo k rozdeleniu jednej papilárnej línie na množstvo malých fragmentov. Tieto krátke papilárne línie spĺňali kritériá, ktoré sme si stanovali pri extrakcii izolovaných bodov a tak pomerne veľkú časť všetkých extrahovaných izolovaných bodov tvorili falošné izolované body. Index extrakcie izolovaných bodov sme vypočítali aj v prípade použitia obrazového predspracovania, kde izolovaný bod už nedosahoval najnižšiu hodnotu indexu (62,8 %). Je to spôsobené predovšetkým tým, že Gaborov filter spájal umelo rozdelené papilárne línie a tak sa pomer falošných izolovaných bodov zmenšil.

Druhú najnižšiu hodnotu indexu extrakcie bez použitia techník predspracovania sme zaznamenali pri markante jazero (10,3 %). S predspracovaním dosahovali jazerá najnižšiu hodnotu indexu (38,7 %), pretože predspracovanie bolo pri eliminácii falošných jazier menej účinné ako pri iných markantoch. Nižšia úspešnosť jeho odhalenia oproti iným markantom sa dá pripísť hlavne veľkým potným pórom, ktoré v mnohých prípadoch vytvárali umelé jazerá s parametrami prirodzených jazier. Zdrojom falošných jazier bolo aj spájanie blízkych papilárnych línií Gaborovym filtrom, čo vytváralo falošné vidlice. Tie v konfigurácii s inými vidlicami tvorili falošné jazerá.

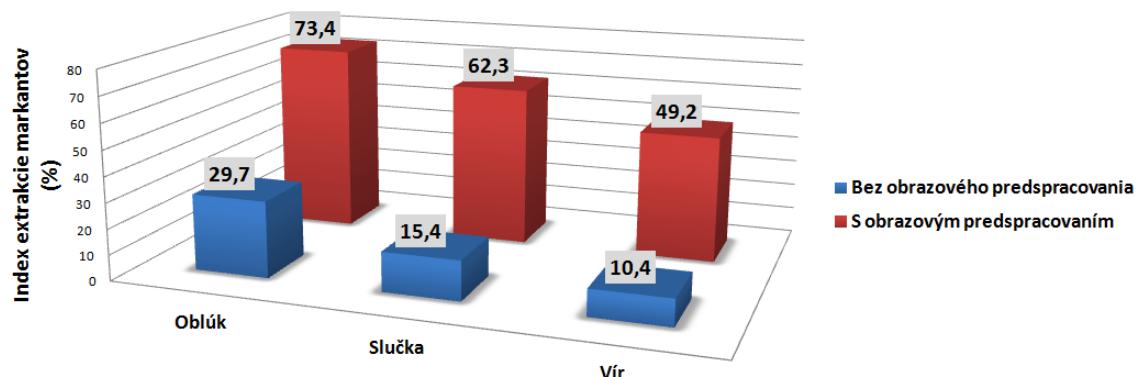
Najvyššiu hodnotu indexu extrakcie bez použitia predspracovania dosiahli ukončenia (32,3 %). Najvyššiu hodnotu indexu extrakcie s použitím predspracovania dosiahla vidlica (75,1 %). Vidlica dosiahla najväčší nárast úspešnosti extrakcie (57,8 %) pri porovnaní úspešnosti bez predspracovania a s ním.

Celková hodnota indexu extrakcie všetkých markantov dosiahla úroveň 18,5 % bez predspracovania a 61,64 % s ním. Obrazové predspracovanie zvýšilo celkový index extrakcie o 43,14 %. Obrazové predspracovanie spôsobilo najmenší nárast indexu extrakcie pri jazere – zvýšenie o 28,4 %.



Obrázok 67 Zhodnotenie výsledkov softvéru indexom extrakcie markantov

Index extrakcie sme porovnali aj pri jednotlivých daktyloskopických vzoroch. Opäťovne sme vypočítali indexy extrakcie pri použití predspracovania a bez neho. Vo vzorke 30 testovacích odtlačkov boli rovnako zastúpené všetky daktyloskopické vzory – 10 oblúkov, 10 vírov a 10 slučiek.

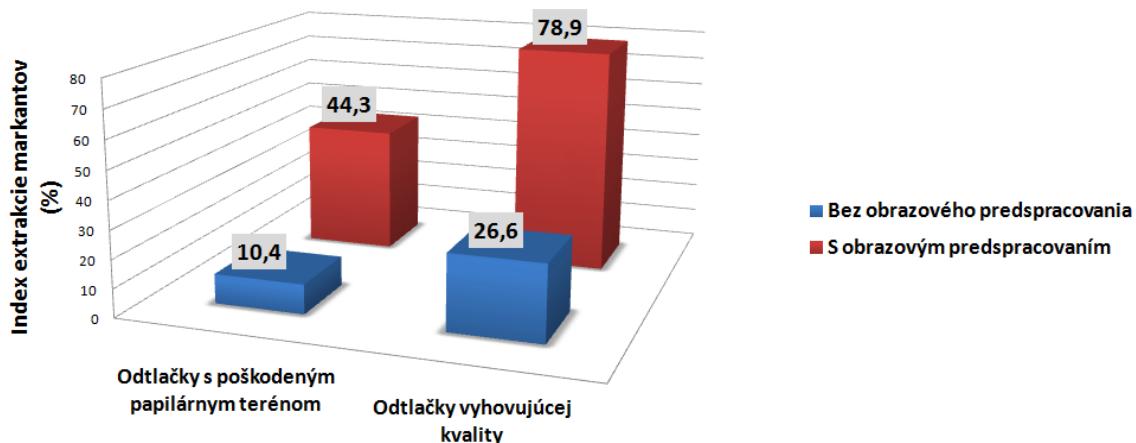


Obrázok 68 Index extrakcie pri jednotlivých daktyloskopických vzoroch odtlačku

Oblúkový vzor neobsahoval singulárne body (vrchol ohybu slučky, vírová formácia a delta) a preto odtlačok tohto typu neobsahoval oblasti s nadmerným zakrivením papilárnych línii na malých plochách. V oblastiach nevýrazného zakrivenia bol odhad orientácie papilárnych línii presný. Z toho dôvodu aj Gaborov filter

modifikoval pôvodné tvary papilárnych línii len v minimálnej miere, pretože jedným z jeho parametrov bola lokálna orientácia papilárneho terénu. To sa odzrkadlilo aj v úspešnosti extrakcie. Index extrakcie markantov bol najvyšší práve na odtlačkoch, ktoré boli tvorené oblúkovým vzorom. Platilo to pri extrakcii s použitím obrazového predspracovania (29,7 %) aj bez neho (73,4 %). Index extrakcie znázornený na obrázku 68 je vypovedá o celkovej úspešnosti odhalenia, teda bez rozlišovania jednotlivých typov markantov.

Ďalším aspektom hodnotenia extrakcie markantov bolo rozlišovanie úspešnosti extrakcie softvéru na odtlačkoch s nevyhovujúcou a vyhovujúcou kvalitou papilárneho terénu. V tomto prípade sme najprv počítali index extrakcie zvlášť na 15 obrázkoch odtlačkov, ktoré obsahovali šum, rozmazané časti, nízky kontrast, nejasne oddelené papilárne línie a iné kazy v štruktúre obrazca. Potom sme index extrakcie vyčíslili pre 15 odtlačkov, v ktorých sa dali zreteľne rozoznať aj najmenšie geometrické atribúty papilárnych línii a boli expertom vyhodnotené na celej ploche. V tomto prípade dosiahli podľa nášho očakávania lepšie výsledky odtlačky s vyššou kvalitou s hodnotou indexu extrakcie 26,6 % s použitím predspracovania a 78,9 % bez neho.



Obrázok 69 Index extrakcie markantov z kvalitných a poškodených odtlačkov

Okrem vlastného zhodnotenia výsledkov sme úspešnosť nami implementovanej metódy extrakcie markantov porovnali aj výsledkami v literatúre dostupných metód. Výsledky sme porovnali so 4 metódami založenými na odlišných princípoch detekcie tvarových zvláštností odtlačku. Bližšie sú tieto metódy opísané v časti 1.5.2. Obmedzením bola možnosť porovnať len úspešnosť extrakcie dvoch tvarových typov

markantov: vidlica a ukončenie. Algoritmus týchto metód nerozlišoval medzi inými tvarmi. Na porovnanie sme nepoužili index extrakcie, ale ukazovatele (18), (19) a (20) prevzaté z (Zhao et al., 2007, s.8). Ich význam a spôsob výpočtu je uvedený v časti 1.5.2, ale v stručnosti si ich pripomenieme aj na tomto mieste. Ukazovateľ (18) má názov False Minutiae (%) a percentuálne vyjadruje mieru odhalenia falošných (neexistujúcich) markantov. Ukazovateľ (19) nesie názov Dropped Minutiae (%) a vyjadruje mieru neodhalenia (vynechania) markantov označených expertom. Posledným ukazovateľom je Total Error (%) daný vzťahom (20) vyjadrujúci celkovú mieru chyby extrakcie vypočítanú sčítaním hodnôt predchádzajúcich ukazovateľov. Keďže sme mohli porovnať len extrakciu vidlice a ukončenia museli sme nás algoritmus dočasne upraviť tak, aby rozlišoval len medzi týmito dvoma tvarmi. Extrakciu markantov sme realizovali aj s počiatočným obrazovým predspracovaním. Hodnoty ukazovateľov, ktoré dosiahli porovnávané metódy sme prevzali z (Zhao et al., 2007, s.8).

Tabuľka 5 Porovnanie výsledkov extrakcie s inými metódami v literatúre

Metóda	False Minutiae (%)	Dropped Minutiae (%)	Total Error (%)
Naša metóda	16,1	11,4	27,9
Zhao et al.	15,3	6,9	22,2
Maio et al.	11,8	6,5	18,3
Cheng et al.	9,6	15,9	25,5
Kim et al.	25,8	13,8	39,6

Pozn.: Porovnávali sa len výsledky extrakcie vidlice a ukončenia.

Naše riešenie extrakcie markantov dosiahlo vo všetkých 3 ukazovateľoch porovnatelné výsledky. Falošné markenty mali väčší podiel na celkovej chybe extrakcie (Total Error) ako neodhalené markenty. Ich zdrojom boli nekvalitné časti odtlačku alebo nedostatky algoritmov, ktoré vo fáze obrazového spracovania v niektorých prípadoch produkovali umelé papilárne línie. Najnižšiu chybu (18,3 %) dosiahol algoritmus od autorov Maio et al. (1997), ktorý neodhaloval markenty v kostre, ale priamo v obraze v stupnici šedej farby. Celková chyba našej metódy bola oproti nej o 9,6 % vyššia.

3. 4 Smery ďalšieho vývoja softvéru

Podarilo sa nám v rámci práce vytvoriť softvérové riešenie, ktoré je schopné rozpoznávať 5 najčastejšie sa vyskytujúcich druhov markantov. Ukázalo sa, že niektoré kroky spracovania odtlačkov dosahujú uspokojivé výsledky a niektoré treba ďalej vyvíjať, aby sa dosiahla úspešnosť softvéru, ktorá mu umožní aplikovať ho do praxe. Riešenie navrhnuté v práci budeme ďalej vyvíjať a prispôsobovať ho v rámci možností najmodernejším trendom v biometrii.

Pri testovaní nášho softvéru sme odhalili niekoľko nedostatkov, ktoré by sme chceli v budúcnosti odstrániť zavedením úplne nového spôsobu riešenia alebo modifikáciou existujúcej implementácie. Jedným z budúcich cieľov je zavedenie nového matematického vyjadrenia Gaborovho filtra tak, aby výraznejšie obnovoval kvalitu papilárneho terénu v miestach s príliš širokými alebo úzkym papilárnymi líniami. Základom nového matematického pozadia Gaborovho filtra je náhrada kosínusovej funkcie novou periodickou funkciou s dvoma nastaviteľnými periódami. Táto funkcia je podrobne opísaná v literatúre (Yang et al., 2003). Dôsledkom novej funkcie je vyššia kvalita rekonštrukcie papilárneho terénu, ktorého topológia sa nedá approximovať rovinou zvlnenou kosínusovým resp. sínusovým priebehom.

Ďalším cieľom je vývoj techník extrakcie ďalších vzácnejších tvarových typov markantov. Zo všetkých tvarov markantov v tabuľke 1 je nás softvér schopný rozpoznať 5 najfrekventovanejších. Ostatné markanty sú charakteristické zložitejšími tvarmi, pri ktorých nebudú na rozpoznanie stačiť metódy analýzy samostatnej papilárnej línie. Pri ich odhalovaní v odtlačku bude nutné analyzovať susedné papilárne línie a ich orientáciu nakoľko sú všetky tieto markanty tvorené usporiadaním viacerých papilárnych línii. Okrem vývoja metód extrakcie ďalších tvarov markantov budeme nás softvér overovať porovnávaním frekvencií výskytu markantov s frekvenciami v manuálne vyhodnotených odtlačkoch.

Okrem odtlačkov prstov by sme chceli nás softvér použiť na odtlačkoch dlani. Extrakciou markantov z odtlačkov dlaní by sme chceli vyhodnotiť ich štatistické vlastnosti, ktoré nie sú preskúmané do takej miery ako je to v prípade odtlačkov prstov.

4 ZÁVER

Odtlačky prstov majú dominantné postavenie v rámci biometrického rozpoznávania osôb. Manuálne aj automatizované spracovanie odtlačkov prstov prebieha analýzou daktyloskopického obrazca tvoreného papilárnymi líniami. Komparácia odtlačkov je založená na extrakcii charakteristických znakov a vyhodnotení ich podobnosti. Charakteristickými znakmi odtlačkov prstov sú daktyloskopické markanty. Sú to tvarové zvláštnosti papilárnych línii. Variabilita ich tvarov a rozmiestnenia v rámci papilárneho terénu je považovaná za jedinečnú pre každého jedinca. Novým trendom pri daktyloskopickej identifikácii v oblasti kriminalistiky je vyšetrovanie kvalitatívnych atribútov markantov, medzi ktoré patria predovšetkým špecifický tvar a vzácnosť výskytu. Toto rozlišovanie biologickej variability má potenciál nahradíť v súčasnosti v mnohých oblastiach zaužívaný kvantitatívny prístup k identifikácii odtlačkami prstov.

Automatizovaná forma extrakcie markantov je netriviálna úloha, ktorá čelí mnohým problémom. Jedným z nich je spracovanie odtlačkov, ktoré nedosahujú ideálnu kvalitu. Extrakčné moduly biometrických systémov často rozlišujú len dva typy markantov: vidlica a ukončenie, čím sa zanedbáva vnútorná variabilita atribútov odtlačku, ktorá individualizuje jeho pôvodcu. V teoretickej časti práce sme charakterizovali dôležité aspekty daktyloskopických markantov a vytvorili ich klasifikačný systém. Rovnako sme vypracovali prehľad metód obrazového predspracovania odtlačkov a metód extrakcie špecifikovaných typov markantov. V praktickej časti práce sme navrhli softvér, ktorý pozostával z postupnosti dvoch krokov. Najprv sme prostredníctvom techník na obnovu štruktúry papilárneho terénu pripravili obrázky odtlačkov do vhodnej formy na extrakciu markantov. Najdôležitejším nástrojom spomedzi týchto techník bolo aplikovanie Gaborovho filtra parametrizovaného lokálnou orientáciou a frekvenciou papilárnych línii. V druhej fáze činnosti softvéru sa z odtlačku reprezentovaného vo forme kostry extrahovali špecifikované markanty. Softvér rozlišoval 5 druhov markantov: vidlica, ukončenie, fragment, jazero a izolovaný bod.

Pravidlá detekcie markantov v papilárnom teréne boli založené na analýze tvarov a rozmerov, z ktorej vychádzajú aj experti pri daktyloskopickej expertíze. Zhodnotením výsledkov sme tak vyhodnotili použiteľnosť manuálnych postupov pri

automatizovanej extrakcii markantov. Extraktia markantov bola rozšírená o elimináciu geometrických artefaktov. Konkrétnie sme definovali pravidlá na odstránenie umelých výbežkov, jazier, fragmentov a izolovaných bodov, ktoré ovplyvňovali úspešnosť softvéru. Na ošetrenie chýb extrakcie sme využili aj niektoré parametre odtlačkov ako sú hustota výskytu markantov alebo konzistencia smeru papilárnych linií.

Na zhodnotenie úspešnosti softvéru sme využili výpočet indexu extrakcie markantov. Index extrakcie markantov bol ukazovateľ, ktorý vyjadroval podiel skutočných expertom odhalených markantov v množine softvérovo extrahovaných markantov. Na vzorke 30 odtlačkov sme testovali softvér v dvoch prípadoch. Najprv sme vyhodnotili extrakciu bez použitia modulu obrazového predspracovania, kde sme dosiahli celkovú úspešnosť 18,5 %. S použitím obrazového predspracovania sa úspešnosť zvýšila o 43,14 % na úroveň 61,64 %. Naše riešenie sme porovnali aj s inými metódami v literatúre. Porovnali sme ho z hľadiska výpočtu podielu falošných markantov v množine extrahovaných markantov a podielu neodhalených markantov vo všetkých markantoch označených expertom. V oboch prípadoch sme dosiahli porovnatelné výsledky.

Jedným z možných využití nášho softvéru je zber štatistických údajov z odtlačkov prstov na účely tvorby modelu kvalitatívneho prístupu k daktyloskopickej identifikácii. Ďalším vývojom a zdokonaľovaním navrhnutého riešenia je možné vytvoriť nástroj na analýzu variability atribútov markantov a rozšíriť tak súčasné smery výskumu jedinečnosti odtlačkov o nové poznatky. Ďalším z možných uplatnení navrhnutého riešenia v praxi je jeho použitie v rámci biometrického rozpoznávacieho systému. Rozlišovaním viacerých tvarov markantov prostredníctvom nášho softvéru sa zaznamenávajú charakteristické vlastnosti odtlačkov, ktoré značná časť existujúcich biometrických systémov nezaznamenáva. Komparáciou týchto vlastností môžeme dosiahnuť vyššiu efektivitu rozpoznávania hlavne pri poškodených alebo latentných odtlačkoch.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- ALLAN, R. 2008. *Biometrics Looks To Solve Identity Crisis* [online]. Electronic Design, June 19, 2008. [cit. 2012-03-25]. Dostupné na WWW: <<http://electronicdesign.com/article/components/biometrics-looks-to-solve-identity-crisis19098>>.
- ASHBAUGH, D. R. 1999. *Ridgeology: Modern Evaluative Friction Ridge Identification* [online]. Royal Canadian Mounted Police : Forensic Identification Support Section, 1999, 53 p. [cit. 2011-11-06]. Dostupné na WWW: <http://www.dartmouth.edu/~chance/chance_news/for_chance_news/ChanceNews12.05/ridgeology.pdf>.
- BARTUNĚK, J. S. et al. 2006. Adaptive Fingerprint Binarization by Frequency Domain Analysis. In: *Circuits, Systems and Computers* [online]. 2006, 1977. Conference Record, p. 598 – 602. [cit. 2012-04-04]. Dostupné na WWW:<[http://btu.se/fou/Forskinfo.nsf/all/ bb66330d02d2801cc125733e008178d6/\\$file/Paper.pdf](http://btu.se/fou/Forskinfo.nsf/all/ bb66330d02d2801cc125733e008178d6/$file/Paper.pdf)>.
- Biometrics Market and Industry Report 2007 – 2012* [online]. International Biometric Group. [cit. 2012-01-16]. Dostupné na WWW: <http://www.electronicdesign.com/files/29/19098/fig_01.gif>.
- Biometrics Overview* [online]. NIST Information Technology Laboratory. [cit. 2012-03-02]. Dostupné na WWW: <<http://www.nist.gov/itl/biometrics/index.cfm>>.
- BOROVANSKÝ, L. a kol. 1973. *Soustavná anatomie člověka II*. 4. Vydání. Praha : Avicenum, 1973, 476 s.
- CARTER, R. G. 2012. *Authentication vs. Authorization* [online]. Durham : Duke University [cit. 2012-02-02]. Dostupné na WWW: <<http://www.duke.edu/~rob/kerberos/authvauth.html>>.
- CHENG, J. – TIAN, J. 2004. Fingerprint enhancement with dyadic scale-space. In: *Pattern Recognition Letters* [online]. 2004, Vol. 25, No. 1, p. 1273-1284. [cit. 2012-04-01]. Dostupné na WWW:<http://www.3dmed.net/paper/ChengJG_PRLetters%20.pdf>.
- DESSIMOZ, D. et al. 2005. *Multimodal Biometrics for Identity Documents: research report* [online]. Lausanne : Université de Lausanne, 2005, 150 p. [cit. 2012-03-04]. Dostupné na WWW:<<http://www.kalyss.ch/documents/multimodal.pdf>>.
- Fingerprint Biometrics* [online]. Biometric News Portal, [cit. 2012-01-12]. Dostupné na WWW: <http://www.biometricnewsportal.com/fingerprint_biometrics.asp>.
- FRONTHALER, H. et al. 2008. Fingerprint Image Quality Estimation and its Application to Multi-Algorithm Verification. In: *Information Forensics and Security* [online]. 2008, Vol. 3, No. 2, p. 331-338. [cit. 2012-04-22]. Dostupné na WWW: <<http://www2.hh.se/staff/josef/publ/publications/fronthaler06trep.pdf>>.
- FVC onGoing* [online]. On-line evaluation of fingerprint recognition algorithms. University of Bologna : Biometric System Laboratory. [cit. 2012-04-01]. Dostupné na WWW: <<https://biolab.csr.unibo.it/FVCOnGoing/UI/Form/Home.aspx>>.

- GREENBERG, S. et al. 2000. Fingerprint Image Enhancement using Filtering Techniques. In: *Pattern Recognition* [online]. 2000, Vol. 3, p. 227-236. [cit. 2012-01-11]. Dostupné na WWW: <http://fvs.sourceforge.net/C27_icpr2000.pdf>.
- GUTIÉRREZ, E. et al. 2007. Biological Variability of the Minutiae in the Fingerprints of a Sample of the Spanish Population. In: *Forensic Science International* [online]. 2007, Vol. 172, Issues 2-3, p. 98-105. [cit. 2012-03-03]. Dostupné na WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073807000035>>.
- HE, Y. et al. 2003. Image enhancement and minutiae matching in fingerprint verification. In: *Pattern Recognition Letters* [online]. 2003, Vol. 24, No. 10, p. 1349-1360. [cit. 2012-02-17]. Dostupné na WWW:< <http://www.fingerpass.net/downloads/papers/Image%20Enhancement%20and%20Minutiae%20Matching%20in%20Fingerprint%20Verification.pdf>>.
- HELPUSH, M. S. – MOHAMMADPOUR, M. 2009. Fingerprint Segmentation. In: *World Applied Sciences Journal* [online]. 2009, Vol. 6, No. 3. [cit. 2012-01-12]. Dostupné na WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04530128>>.
- HÖDL, R. et al. 2009. Slap Fingerprint Segmentation. In: *Computer Vision Winter Workshop* [online]. PRIP: Vienna University of Technology, 2009, 8 p. [cit. 2012-03-20]. Dostupné na WWW:< http://www.icg.tu-graz.ac.at/Members/ram/CVWW09_Paper/at_download/file>.
- HONG, L. – WAN, Y. – JAIN, A. K. 1998. Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation. In: *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence* [online]. 1998, Vol. 20, No. 8, p. 777-789. [cit. 2012-03-05]. Dostupné na WWW: <<http://www.cse.msu.edu/biometrics/Publications/Fingerprint/MSU-CPS-97-35enhance.pdf>>.
- HSIEH, C. – LAI, E. – WANG, Y. 2001. An effective algorithm for fingerprint image enhancement based on wavelet transform. In: *Pattern Recognition* [online]. 2002, Vol. 36, No. 2, p. 303-312. [cit. 2012-01-21]. Dostupné na WWW:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320302000328>>.
- JAIN, A. K. – PANKANTI, S. 2000. *Fingerprint Classification and Matching* [online]. Academic Press, 2000, 32 p. [cit. 2012-03-07]. Dostupné na WWW: <<http://www.research.ibm.com/ecvg/pubs/sharat-handbook.pdf>>.
- JAIN, A. K. – CHEN, Y. – DEMIRKUS, M. 2007. Pores and Ridges: High-Resolution Fingerprint Matching Using Level 3 Features. In: *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence* [online]. 2007, Vol. 29, No. 1, p. 15-27. [cit. 2012-02-17]. Dostupné na WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4016547&tag=1>.
- KAZI, M. et al. 2011. Comparison of fingerprint enhancement techniques through Mean Square Error and Peak-Signal to Noise Ratio. In: *International Journal on Computer Science and Engineering* [online]. 2011, Vol. 3, No.1. [cit. 2012-02-02]. Dostupné na WWW:< <http://www.enggjournals.com/ijcse/doc/IJCSE11-03-01-129.pdf>>.

- KEKRE, H. B. – BHARADI, V. A. 2010. Fingerprint Core Point Detection Algorithm Using Orientation Field Based Multiple Features. In: *International Journal of Computer Applications* [online]. 2010, Vol. 1, No. 15, p. 97-103. [cit. 2010-03-15]. Dostupné na WWW: <<http://www.ijcaonline.org/journal/number15/pxc387482.pdf>>.
- KIM, S. – LEE, D. – KIM, J. 2001. Algorithm for Detection and Elimination of False Minutiae in Fingerprint Images. In: *AVBPA Proceedings, Third International Conference* [online]. 2001, Vol. 2091, p. 235-240. [cit. 2012-04-07]. Dostupné na WWW: <<http://hackipedia.org/Algorithms/General/pdf/Algorithm%20For%20Detection%20and%20Elimination%20False%20Minutiae%20in%20Fingerprint%20Images.pdf>>.
- KÜCKEN, M. – NEWELL, A. C. 2005. Fingerprint Formation. In: *Journal of Theoretical Biology* [online]. 2005, No. 235, p. 71-83. [cit. 2012-03-04]. Dostupné na WWW: <http://math.arizona.edu/~anewell/publications/Fingerprint_Formation.pdf>.
- LEE, C. et al. 2006. *Singular Points and Minutiae Detection in Fingerprint Images Using Principal Gabor Basis Functions* [online]. Chinese Culture University : Department of Computer Science, Taipei, Taiwan, 2006, 6 p. [cit. 2012-03-03]. Dostupné na WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.90.6590&rep=rep1&type=pdf>>.
- LIŠKA, P. – ŠMÍD, Z. – ZÍKA, J. 1982. Individuální identifikace v daktyloskopii. In: *Československá kriminalistika*. 1982, Ročník XV., s. 11 – 23.
- MAIO, D. – MALTONI, D. 1997. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 1997, Vol. 19, No. 1. [cit. 2012-02-18]. Dostupné na WWW: <[http://vlsi.catholic.ac.kr/pds/data/research/bio/\[3\]direct%20gray-scale%20minutiae%20detection%20in%20fingerprints%20.pdf](http://vlsi.catholic.ac.kr/pds/data/research/bio/[3]direct%20gray-scale%20minutiae%20detection%20in%20fingerprints%20.pdf)>.
- MALTONI, D. et al. 2009. *Handbook of Fingerprint Recognition* [online]. Second Edition. London : Springer, 2009. 496 p. [cit. 2011-12-14]. Dostupné na WWW: <<http://www.linbai.info/computers-it/handbook-of-fingerprint-recognition.html>>.
- MARÁK, P. 2010. *Rozpoznávanie a spracovanie odlačkov prstov pomocou informačných technológií* : diplomová práca. Bratislava : FEI STU, 2010. 143 s.
- METEŇKO, J. et al. 2010. *Trendy skúmania daktyloskopických stôp a ich výskum v projekte excellentnosti*. In: IV. mezinárodní konference věnovaná kriminalistice a dalším forenzním vědám. Praha: Policejní akademie ČR v Praze, 2010.
- MINKIN, V. 2008. Fingerprints and the Thermodynamics of Human Development. In: *Journal of Human Thermodynamics* [online]. 2008, Vol. 4, Issue 2, p. 8-12 [cit. 2012-04-12]. Dostupné na WWW: <<http://www.humanthermodynamics.com/jht/fingerprints.html>>.
- Oxford English Dictionary* [online]. Dostupné na WWW: <<http://oxforddictionaries.com/>>.

- PANKANTI, S. – PRABHAKAR, S. – JAIN, A. K. 2002. On the Individuality of Fingerprints. In: *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence* [online]. 2002, Vol. 24, No. 8. [cit. 2012-01-05]. Dostupné na WWW: <http://biometrics.cse.msu.edu/Publications/Fingerprint/PankantiPrabhakarJain_FpIndividuality_CVPR01.pdf>.
- ROSS, A. – SHAH, J. – JAIN, A. K. 2007. From Template To Image: Reconstructing Fingerprints from Minutiae Points. In: *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence* [online]. 2007, Vol. 29, No. 4, p. 544-560. [cit. 2012-01-07]. Dostupné na WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04107560>>.
- SAGAR, N. 2009. *Role of Middleware Companies in the Biometrics Industry* [online]. Frost & Sullivan, March 3, 2009. [cit. 2012-02-24]. Dostupné na WWW: <<http://www.frost.com/prod/servlet/market-insight-top.pag?Src=RSS&docid=160513179>>.
- SHAIFAT, F. – KEYSERS, D. – BREUEL, T. M. 2008. *Efficient Implementation of Local Adaptive Thresholding Techniques Using Integral Images* [online]. Technical University of Kaiserslautern : Department of Computer Science, 2008, 6 p. [cit. 2012-04-02]. Dostupné na WWW: <<http://www.dfki.uni-kl.de/~shafait/papers/Shafait-efficient-binarization-SPIE08.pdf>>.
- SHERLOCK, B. G. – MONRO, D. M. – MILLARD, K. 1994. Fingerprint Enhancement by Directional Fourier Filtering. In: *IEEE Proceedings: Visual Image Signal Processing* [online]. 1994, Vol. 141, No. 2. [cit. 2012-02-07]. Dostupné na WWW: <<http://visgraph.cs.ust.hk/biometrics/Papers/FingerPrints/fin-visp1994-04-01.pdf>>.
- THAI, R. 2003. *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction* [online]. University of Western Australia, 2003, 71 p. [cit. 2011-10-11]. Dostupné na WWW: <<http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/studentprojects/raymondthai/RaymondThai.pdf>>.
- WANG, Y. – HU, J. – HAN, F. 2007. Enhanced gradient-based algorithm for the estimation of fingerprint orientation fields. In: *Applied Mathematics and Computation* [online]. 2007, Vol. 185, No. 2, p. 823-833. [cit. 2012-03-04]. Dostupné na WWW: <<http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.85.9815&rep=rep1&type=pdf>>.
- YANG, J. – LIU, L. – JIANG, T. 2002. An Improved Method for Extraction of Fingerprint Features. In: *Proceedings of SPIE* [online]. 2002, Vol. 4875, p. 552-558. [cit. 2012-03-09]. Dostupné na WWW: <http://nlpr-web.ia.ac.cn/English/mic/jianweiyang/ICIG_yang.pdf>.
- YANG, J. et al. 2003. A modified Gabor filter design method for fingerprint image enhancement. In: *Pattern Recognition Letters* [online]. 2003, Vol. 24, Issue 12, p. 1805-1817. [cit. 2012-03-10]. Dostupné na WWW: <<http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.89.8984&rep=rep1&type=pdf>>.
- ZHANG, Y. – WANG, P. 1996. A Parallel Thinning Algorithm with Two-Subiteration that generates One-Pixel-Wide Skeletons. In: *Pattern Recognition* [online]. 1996, Vol. 4, p. 457-461. [cit. 2012-02-05]. Dostupné na WWW: <<http://www.uel.br/pessoal/josealexandre/stuff/thinning/ftp/zhang-wang-2.pdf>>.

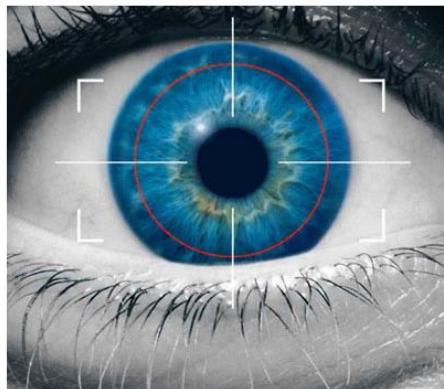
- ZHAO, F. – TANG, X. 2005. Preprocessing and postprocessing for skeleton-based fingerprint minutiae extraction. In: *Pattern Recognition* [online]. 2007, Vol. 40, No. 3, p. 1270-1281. [cit. 2011-12-03]. Dostupné na WWW:< <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.108.5844&rep=rep1&type=df>>.
- ZHU, E. et al. 2006. A systematic method for fingerprint ridge orientation estimation and image segmentation. In: *Pattern Recognition* [online]. 2006, Vol. 39, No. 9, p. 1452-1472. [cit. 2012-03-22]. Dostupné na WWW:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320306000884>>.

ZOZNAM PRÍLOH

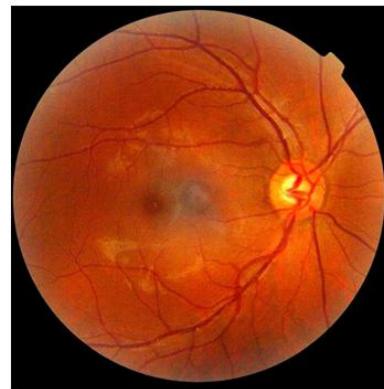
- Príloha A** Ukážky vybraných biometrických identifikátorov
- Príloha B** Grafický vývoj veľkosti tržieb v biometrickom priemysle
- Príloha C** Výsledky španielskeho výskumu variability markantov
- Príloha D** Identifikačné hodnoty markantov podľa Liškovho modelu
- Príloha E** Pohľad na biologické zloženie kože v oblasti bruška distálneho článku prsta
- Príloha F** CD obsahujúce tieto časti: diplomová práca v elektronickej PDF verzii, technická dokumentácia v PDF verzii, priečinok so zdrojovými kódmi implementovanými v jazyku MATLAB 2011b

Príloha A

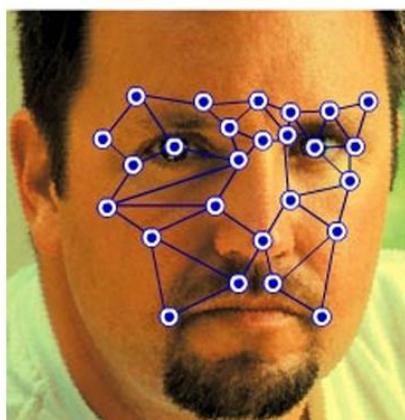
Obrázky niektorých často využívaných biometrických identifikátorov na účely rozpoznávania osôb.



Dúhovka



Sietnica



Fotografia tváre



Termogram tváre



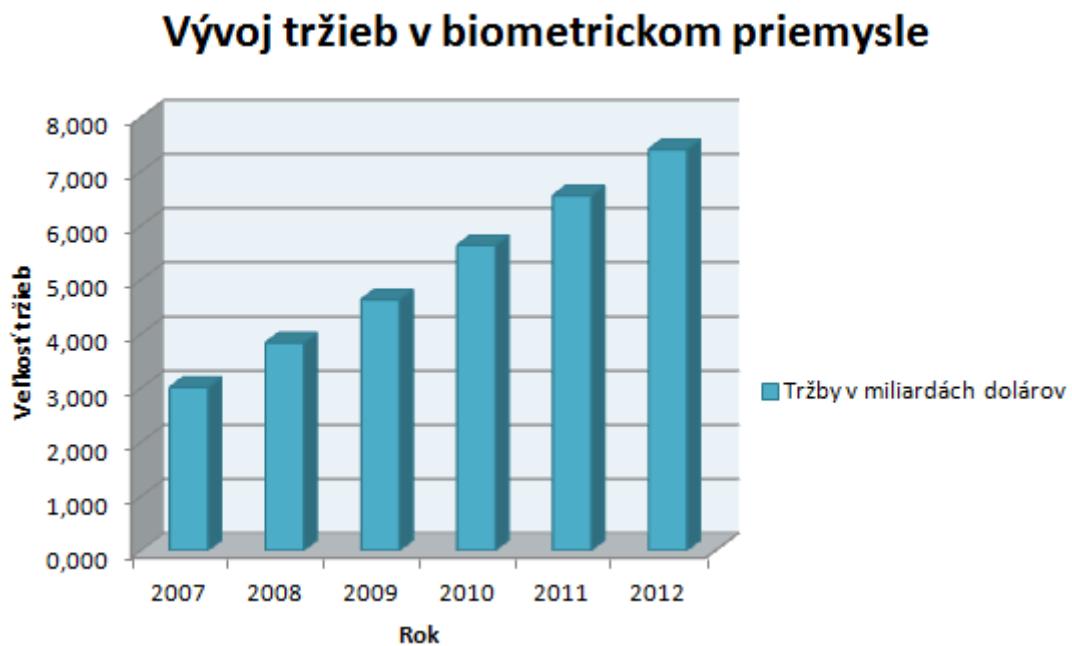
Mapa žíl



Podpis

Príloha B

Grafický vývoj veľkosti tržieb v globálnom biometrickom priemysle.



Zdroj: International Biometric Group: *Biometrics Market and Industry Report 2007-2012*

Príloha C

Výsledky výskumu variability markantov na odtlačkoch ľudí španielskej populácie. Tabuľka 3 obsahuje relatívne frekvencie markantov stanovených typov. Tabuľka 4 obsahuje frekvencie markantov v základných vzoroch odtlačkov. Tabuľka 5 hovorí o počtoch markantov v rôznych oblastiach odtlačku.

Table 3
Frequencies registered for minutiae (index finger, FII)

	FII	Total (%)	Males (%)	Females (%)
Ridge ending	53.16	52.37	54.06*	
Convergence	15.32	15.12	15.56*	
Bifurcation	12.91	12.76	13.09*	
Fragment	5.30	5.37	5.22	
Point o dot	3.11	3.35	2.83	
Break	3.33	4.07	2.47	
Enclosure	2.35	2.11	2.63*	
Overlap	1.57	1.65	1.47	
Crossbar	1.54	1.68	1.38	
Bridge	0.91	0.91	0.90	
Opposed bifurcation	0.29	0.35	0.23	
Y or M	0.15	0.19	0.11	
Dock	0.07	0.08	0.06	
Return	0.00	0.00	0.00	

* $p < 0.05$.

Table 5
Frequency for the type of pattern on the index finger (FII)

General Pattern	FII			
	Total ($n = 200$)		Males ($n = 100$) (%)	Females ($n = 100$) (%)
	n	%		
Arch	12	6	7	5
Radial Loop	29	14.5	15	14
Ulnar Loop	85	42.5	44	41
Whorl	74	37	34	40

Table 6
Descriptive statistics for the count of minutiae over whole fingerprint and inside and outside a circle (index finger, FII)

Area	FII (mean, S.D.)		
	Total ($n = 178$)	Males ($n = 89$)	Females ($n = 89$)
Total area	80.94, 16.58	86.43, 15.79	75.22, 15.54*
Inside circle	52.26, 10.93	53.94, 11.62	50.58, 10.06†
Outside circle	28.68, 18.25	32.49, 18.61	24.87, 17.11*

* $p < 0.001$.

† $p < 0.05$.

Zdroj: Gutiérrez, E. et al: *Biological variability of the minutiae in the fingerprints of a sample of the Spanish population*, 2007, s. 3-4

Príloha D

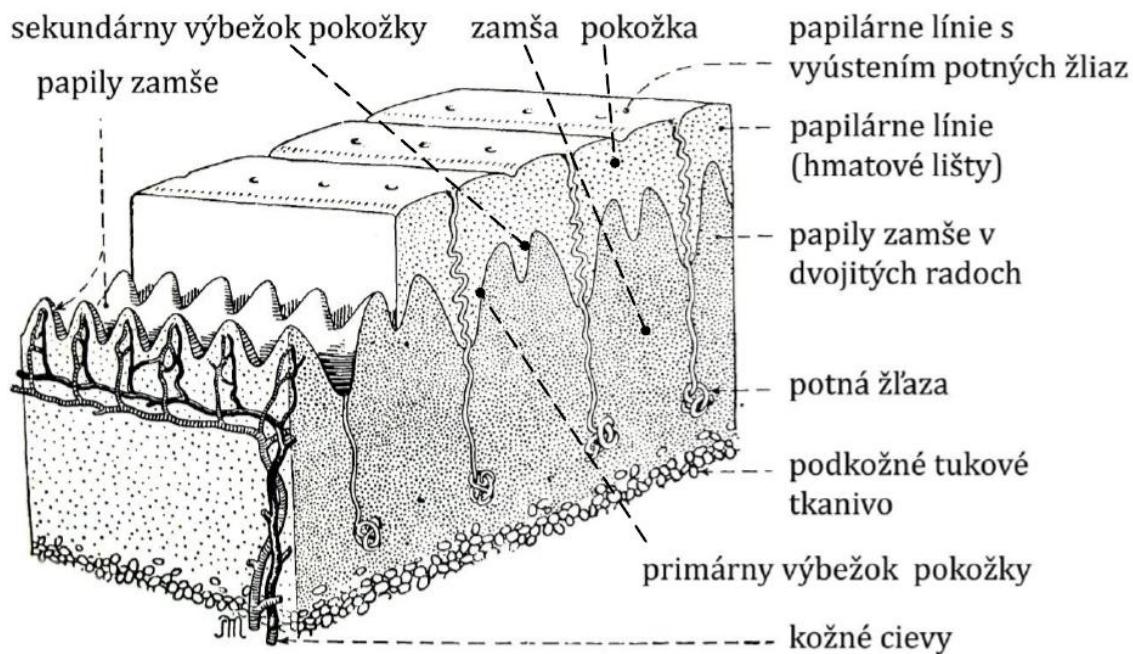
Tabuľka markantov, ktoré použili vedci z Kriminalistického ústavu Veřejné bezpečnosti v Praze na výskum individuality odtlačkov. Tabuľka obsahuje údaje o pravdepodobnosti výskytu markantu a ich identifikačné hodnoty. Tento štatistický model sa nazýva aj Liškov model.

Číslo	Znak	Pravdepodobnost výskytu na 1 mm ² P _i	Identifikační hodnota	
			H _i = $\frac{1}{P_i}$	I _i = - log P _i
1	—	0,1147	9	0,94
2	—	0,0452	22	1,34
3	—	0,0129	78	1,89
4	—	0,0074	135	2,13
5	—	0,0070	142	2,15
6	—	0,0065	155	2,19
7	—	0,0043	235	2,37
8	—	0,0038	262	2,42
9	—	0,0011	908	2,96
10	—	≈ 0,0004	2334	3,37
11	—	≈ 0,0004	2579	3,41
12	—	≈ 0,0004	2723	3,44

Zdroj: Liška, P. a kol. *Individuální identifikace v daktyloskopii*. 1982, s.17

Príloha E

Ilustrácia štruktúry vrstiev kože na spodnej strane distálneho článku prsta. Pohľad je prierezom, v ktorom môžeme vidieť ako vyzerá rozhranie medzi vrchnou a spodnou časťou kože, ktoré formuje vonkajší vzhľad odtlačku.



Zdroj: Borovanský, L. a kol.: *Soustavná anatomie člověka*. 1973, s. 948

Príloha F

CD obsahujúce tieto časti:

- diplomová práca v PDF verzii
- technická dokumentácia v PDF verzii
- priečinok so zdrojovými kódmi implementovanými v jazyku MATLAB 2011b.