



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**GENEROVÁNÍ PROJEVU FALZIFIKÁTU
DO SYNTETICKÝCH OTISKŮ PRSTŮ
Z GENERÁTORU SFINGE**

GENERATION OF SPOOF EFFECTS INTO SYNTHETIC FINGERPRINTS

FROM SFINGE GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ŽOFIA VRÁBL'OVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce



21537

Studentka: **Vrábl'ová Žofia**
Program: Informační technologie
Název: **Generování projevu falzifikátu do syntetických otisků prstů z generátoru SFinGe**
Generation of Spoof Effects into Synthetic Fingerprints from SFinGe Generator
Kategorie: Bezpečnost

Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se falzifikátů otisků prstů a biometrického rozpoznávání podle otisků prstů. Seznamte se s generátorem syntetických otisků prstů SFinGe.
2. Navrhněte vhodný model a posléze algoritmus pro generování specifických projevů falzifikátů (vnější hrany otisku, vzduchové bubliny uvnitř falzifikátu, atp.) do syntetických otisků prstů pocházejících z generátoru SFinGe.
3. Implementujte navržený algoritmus z předchozího bodu.
4. Otestujte algoritmus z předchozího bodu vygenerováním syntetických otisků prstů se všemi výše uvedenými poškozeními a ověřením výstupu s pomocí vhodného algoritmu na porovnávání otisků prstů (např. Neurotechnology VeriFinger, Innovatrics IDkit).
5. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná rozšíření Vašeho řešení.

Literatura:

- Maltoni, D., Maio, D., Jain, A.K. and Prabhakar, S.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2009, pages 512. ISBN 978-1-8488-2254-2.
- Champod, C., Espinoza, M.: *Forgeries of Fingerprints in Forensic Science*, Handbook of Biometrics Anti-Spoofing, Springer, 2014, pp. 13-34, ISBN 978-1-4471-6523-1.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Vedoucí práce: **Kanich Ondřej, Ing.**
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2018
Datum odevzdání: 15. května 2019
Datum schválení: 1. listopadu 2018

Abstrakt

Cielom práce je návrh a vytvorenie aplikácie pre generovanie prejavov falzifikátov do syntetických odtlačkov prstov z generátora SFinGe. Prejavy falzifikátov vybrané pre túto prácu sú prítomnosť vzduchových bublín, neprirodzený celkový tvar a náhle ukončenie papilárnych línií na okrajoch odtlačku. Vybrané prejavy boli analyzované, bol vytvorený návrh metód pre ich generovanie a metódy boli následne implementované. Generovaním implementovaných prejavov falzifikátov sa na základe testovania preukázateľne zhoršila kvalita syntetického odtlačku prsta. Pri vygenerovaní kombinácie všetkých implementovaných prejavov skóre v komerčnom nástroji kleslo priemerne o 49,37 % a kvalita odtlačku, určená metódou vytvorenou v rámci diplomovej práce pána Ing. Oravca, klesla priemerne o 6,18 %.

Abstract

The goal of this thesis is to create application to generate spoof effects into synthetic fingerprints from the SFinGe generator. Spoof effects chosen for this thesis are air bubbles, unnatural overall shape and clear external contours of fingerprint. Those effects were analyzed, methods to generate these effects were designed and then implemented. According to testing, generation of implemented methods led to reduction in quality of fingerprint images. Score gained in a commercial tool decreased by 49.37 % in average and image quality evaluated by the method designed in Ing. Oravec's thesis decreased by 6.18 % in average, when the combination of all implemented spoof effects was generated.

Kľúčové slová

odtlačky prstov, falzifikáty odtlačkov prstov, syntetické odtlačky prstov, generátor SFinGe, prejavy falzifikátov, vzduchové bubliny, neprirodzený celkový tvar, vonkajšie hrany

Keywords

fingerprints, spoofed fingerprints, synthetic fingerprints, SFinGe generator, spoof effects, air bubbles, unnatural overall shape, external contours

Citácia

VRÁBLOVÁ, Žofia. *Generování projevu falzifikátu do syntetických otisků prstů z generátoru SFinGe*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich

Generování projevu falzifikátu do syntetických otisků prstů z generátoru SFinGe

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracovala sama pod vedením pána Ing. Ondřeja Kanicha. Uviedla som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpala.

.....

Žofia Vráblová
15. mája 2019

Podakovanie

Chcela by som pekne poďakovať môjmu vedúcemu Ing. Ondřejovi Kanichovi za všetky jeho rady, trpezlivé odpovede na moje otázky, diskusie o pokrokoch v práci a ústretovosť v každej situácii.

Obsah

1	Úvod	2
2	Odtlačky prstov	3
2.1	Charakteristiky odtlačkov prstov	4
2.2	Získavanie odtlačkov prstov	6
2.3	Rozpoznávanie odtlačkov prstov	7
2.4	Porovnávanie odtlačkov prstov	8
3	Falzifikáty odtlačkov prstov	10
3.1	Výroba falzifikátov	11
3.2	Artefakty falzifikátov	14
3.3	Detekcia živosti	15
3.4	Detekcia falzifikátov na základe posúdenia kvality obrázka	16
3.5	Zhrnutie uplynulého vývoja detekcie falzifikátov	17
4	Generátor SFinGe	18
4.1	Syntetické odtlačky prstov	18
4.2	Generovanie hlavného odtlačku (master fingerprint)	19
4.3	Generovanie odvodených odtlačkov	21
5	Návrh metód pre generovanie prejavov falzifikátov	23
5.1	Vzduchové bubliny	23
5.2	Postupné miznutie papilárnych línií	27
5.3	Celkový tvar odtlačku	30
6	Implementácia navrhnutých metód a dosiahnuté výsledky	33
6.1	Výber implementačných prostriedkov	33
6.2	SpoofGenerator	35
6.3	AirBubbles	36
6.4	DisappearingEdges	38
6.5	FingerprintShape	39
6.6	Kombinácie prejavov falzifikátov	40
7	Testovanie dosiahnutých výsledkov	42
7.1	Vytvorené dátové sety	42
7.2	Vyhodnotenie testovania	43
8	Záver	48
	Literatúra	50

Kapitola 1

Úvod

Odtlačky prstov sú v súčasnosti najpoužívanjšou biometrikou. Vzor odtlačku prsta každého človeka je jedinečný, čiže na základe odtlačkov môžu byť rôzne osoby od seba spoľahlivo odlišiteľné. Získanie digitálnej reprezentácie odtlačku od užívateľa prebieha jednoduchým spôsobom, pri ktorom stačí priloženie jeho prsta na plochu skenera. Vďaka širokému spektru dostupných skenerov odtlačkov prstov sa ľudia stretávajú s týmto zabezpečením v každodennom živote vo svojich notebookoch či mobilných telefónoch, v dôsledku čoho akceptovanie tejto biometriky medzi užívateľmi narastá. Dôvera ľudí v zabezpečenie pomocou odtlačkov je pomerne vysoká aj vďaka tomu, že už mnohé roky sú odtlačky prstov používané ako dôkaz pre usvedčenie páchatela v kriminalistike.

Nevýhodou odtlačkov prstov je, že ich je možné pomerne jednoducho sfalšovať. Kvôli konštantnému vylučovaniu mastného sekrétu na ich povrchu človek zanecháva odtlačky na mnohých materiáloch, ktorých sa dotkne. Takto zanechaný odtlačok je ľahko dostupný pre páchatela, ktorý má v úmysle vyrobiť falzifikát odtlačku prsta. Vďaka falzifikátu môže získať neoprávnený prístup do nejakého zariadenia alebo k chráneným údajom.

Proti oklamaniu skenera falzifikátmi sa výrobcovia snažia bojovať detekciou živosti. Detekcia živosti sa vždy zakladá na určitej metóde, pomocou ktorej skener určuje, či je priložený živý prst, a teda sa nejedná o vyrobený falzifikát. Aj keď sú v dnešnej dobe skenery už vybavené detekciou živosti, úspešné použitie falzifikátov je stále u niektorých skenerov možné.

Preto je hlavným cieľom tejto práce vytvorenie aplikácie, vďaka ktorej je možné upravovať syntetické odtlačky prstov tak, aby obsahovali typické znaky falzifikátov. Obrázky falzifikátov potom môžu byť použité pri vyvíjaní alebo testovaní metód pre úspešnejšie odhalenie situácie, v ktorej je skenerom nasnímaný falzifikát.

V kapitole 2 sú uvedené informácie ohľadom odtlačkov prstov, ktoré oboznamujú čitateľa s teoretickým základom potrebným pre pochopenie problematiky. V kapitole 3 sú k základným informáciám o odtlačkoch doplnené informácie o falzifikátoch odtlačkov, metódach ich výroby, detekcie a sú v nej vymenované znaky, ktoré falzifikáty zvyčajne obsahujú. Kapitola 4 obsahuje opis spôsobu generovania syntetických odtlačkov prstov generátorom SFinGe, pretože práve odtlačky z tohto generátora sú používané ako zdrojové odtlačky, do ktorých sa generujú prejavy falzifikátov. V kapitole 5 sú uvedené závery získané počas analýzy troch vybraných znakov falzifikátov a na ich základe vytvorené algoritmy pre generovanie daných znakov do syntetických odtlačkov. Implementácia je opísaná v kapitole 6 spolu s dosiahnutými výsledkami. Po dokončení implementácie bolo vytvorených 7 dátových setov s odtlačkami s prejavmi falzifikátov generovanými vo vytvorenej aplikácii. Dátové sety boli otestované a v kapitole 7 sú podrobnejšie opísané spolu s priebehom testovania a jeho výsledkami.

Kapitola 2

Odtlačky prstov

Biometria je v zmysle IT (informačných technológií) rozpoznávanie jedincov na základe ich anatomických alebo behaviorálnych vlastností [1]. Akákoľvek vlastnosť môže byť použitá ako biometrická charakteristika, ak spĺňa nasledujúce kritériá [2]:

- Univerzálnosť – danú vlastnosť má každý človek,
- jedinečnosť – nemôže byť u žiadnych dvoch ľudí rovnaká,
- permanentnosť – vlastnosť je nemenná s časom,
- navyac musí byť možné ju kvantitatívne merať a navzájom porovnávať.

V súčasnosti sa v aplikáciách používa množstvo biometrických charakteristík, z ktorých každá má silnejšie aj slabšie stránky. Pri výbere vhodnej biometrickej charakteristiky pre aplikáciu sa zisťuje zhoda požiadaviek aplikácie a vlastností biometrickej charakteristiky. Napríklad DNA (deoxyribonukleová kyselina) spĺňa požiadavky na zaradenie medzi biometrické charakteristiky, ale nie je vhodná na použitie v aplikáciách. Medzi používané anatomické biometrické charakteristiky patrí napríklad infračervený termogram tváre, ruky a žíl na ruke, geometria ruky, dúhovka a sietnica oka a mnohé iné. Medzi behaviorálne biometrické charakteristiky patrí medzi inými napríklad rozoznávanie na základe chôdze, podpisu, hlasu alebo písania na klávesnici. [2] [3]

Použitie vlastností ako biometrických charakteristík závisí aj na miere ich entropie. Niektoré nemajú dostatok entropie, a preto sú nevhodné pri rozpoznávaní veľmi veľkého množstva užívateľov. Naopak iné, ako napríklad odtlačky prstov, DNA, očná dúhovka, ktoré majú dostatok entropie, sú spoľahlivé aj v rozoznávaní veľkého množstva osôb. [3]

U každého človeka sa na povrchu prstov na rukách nachádzajú papilárne línie, ktoré vytvárajú jedinečný vzor. Papilárne línie sú vyvýšené reliéfy kože, majú výšku v rozmedzí 0,1 – 0,4 mm a ich šírka sa pohybuje v rozmedzí 0,2 – 0,5 mm [1]. Vzor vytvorený papilárnymi líniami ostáva nemenný po celý život, od ich vzniku až po smrť. V dôsledku rastu a takisto starnutia sa papilárne línie mierne menia, avšak základné charakteristiky pretrvávajú a tým pádom nie je ovplyvnená klasifikácia ani identifikácia na základe odtlačkov prstov. [1] [2] [4]

Odtlačky prstov vznikajú počas embryonálneho vývoja, keď sa koža na končekom prstov začína diferencovať. Papilárne línie sa objavujú okolo štvrtého mesiaca vývinu a sú úplne sformované okolo siedmeho mesiaca vývinu. Prúdenie plodovej vody a poloha plodu sa počas ich formácie mení. V dôsledku toho bunky na končeku prsta rastú v určitom mikroprostredí, ktoré je rôzne pre každý prst. Odtlačky prstov sú preto odlišné na každej ruke

aj každom prste človeka a na rozdiel od DNA sme pomocou nich schopní rozlíšiť aj jednovaječné dvojčatá. Štruktúra papilárnych línií je okrem genetických faktorov ovplyvnená aj náhodnými fyzickými javmi počas procesu jej vytvárania. Tieto náhodné javy podporujú domnienku jedinečnosti vzoru každého jedinca. Je dôležité poznamenať, že jedinečnosť odtlačkov nie je pevne stanovený fakt, ale je výsledkom empirického pozorovania. [2] [5]

Povrchové zranenia, ako napríklad rezy alebo odreniny, zasahujúce do epidermálnej (prvej, najvrchnejšej) vrstvy kože spôsobia na štruktúre papilárnych línií len dočasné zmeny. Vzor papilárnych línií sa po vyliečení sám obnoví. Schopnosť regenerácie buniek v poškodennej oblasti môžu narušiť zranenia zasahujúce do dermálnej (druhej) vrstvy kože. Cielené zničenie všetkých papilárnych línií by vyžadovalo poranenia také vážne, že by nebolo možné ruku ďalej normálne používať. [4] [5]

Papilárne línie sa nachádzajú aj na povrchu dlaní, chodidiel a prstov na nohách, ale prsty na rukách sú najideálnejšie pre získanie ich grafickej reprezentácie, ktorú nazývame odtlačok prsta. Vďaka spomínaným vlastnostiam papilárnych línií sú odtlačky prstov veľmi kvalitnou biometrickou charakteristikou. [2]

2.1 Charakteristiky odtlačkov prstov

Na globálnej úrovni vytvárajú papilárne línie vzor, na báze ktorého sú odtlačky prstov rozdelené do tried [1]. Triedy sú znázornené na obrázku 2.1, zľava ľavá slučka, pravá slučka, oblúk, klenutý oblúk a špirála [1].



Obr. 2.1: Triedy odtlačkov prstov. Obrázok bol prebraný a upravený z [6].

Triedy odtlačkov prstov sú nápomocné v prípade automatického rozpoznávania, keď má byť odtlačok porovnávaný s obrovskou databázou odtlačkov prstov. Napríklad databáza FBI (Federal Bureau of Investigation – Federálny úrad pre vyšetrovanie) obsahuje viac ako 200 miliónov odtlačkov prstov [2]. Zaradením odtlačku do triedy pred samotným porovnávaním sa zníži výpočtová náročnosť aj čas vyhľadávania.

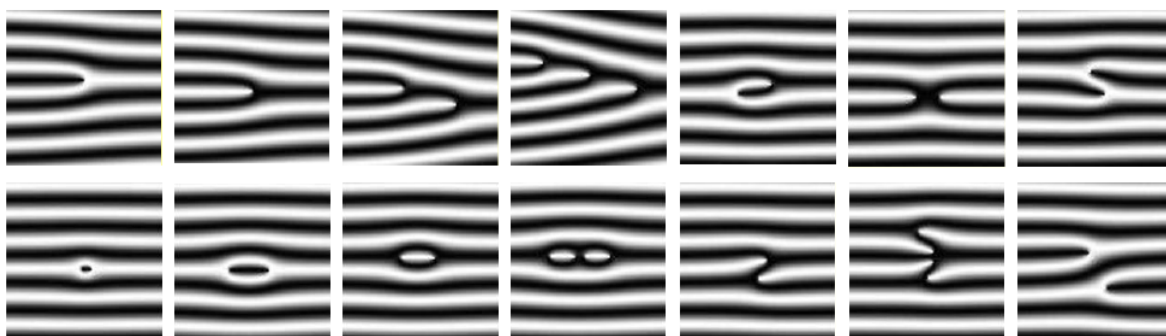
Klasifikácia odtlačkov prstov je proces, v ktorom sa množine odtlačkov prstov priradí reťazec pozostávajúci z čísel a písmen na základe interpretácie vzoru a detailov papilárnych línií odtlačkov prstov [4]. Pri klasifikácii odtlačkov prstov sa používajú riadiace body, takzvané singulárne body (singular points), okolo ktorých sa „ovíjajú“ papilárne línie [2]. Medzi singulárne body patrí *delta* – miesto, v ktorom prebiehajú papilárne línie do troch smerov (na obrázku 2.2 znázornená trojuholníkom), a *jadro* – stred odtlačku prsta, nachádza sa na najspodnejšom vyklenutí papilárnych línií (na obrázku 2.2 znázornené krúžkom) [1]. Okrem riadiacich bodov sa ku klasifikácii odtlačkov viaže pojem *typové línie* – vymedzujú priestor medzi najvrchnejšou papilárnou líniou patriacou k strednej a najspodnejšou papilárnou líniou patriacou k delte [1].



Obr. 2.2: Riadiace body odtlačku – delta znázornená trojuholníkom a jadro krúžkom. Obr. 2.3: Najpoužívanejšie markanty – vidlička a ukončenie.

Pre klasifikáciu odtlačkov sa na globálnej úrovni okrem tried používa aj ďalšia metrika, a to počet papilárnych línií medzi dvoma definovanými bodmi na odtlačku. Najpoužívanejšími bodmi sú jadro s deltou a počet papilárnych línií medzi nimi sa môže počítat vo vertikálnom aj horizontálnom smere [1].

Na lokálnej úrovni rozlišujeme odtlačky prstov na základe *markantov*, čiže zvláštnych útvarov, ktoré vytvárajú papilárne línie [1]. Existuje mnoho markantov, z ktorých nie všetky sa používajú pri rozlišovaní odtlačkov prstov. Dvomi najpoužívanejšími markantmi sú *ukončenie* a *vidlička*, znázornené na obrázku 2.3. Ukončenie je bod, v ktorom papilárna línia náhle končí [2]. Vidlička je bod, v ktorom sa papilárna línia rozdeľuje do dvoch vetiev [2]. Prístupové systémy si vystačia so spomínanými dvomi typmi markantov [1], avšak pre kriminalistické účely sa používa väčšie množstvo markantov, ktoré sú odvodené od základných typov uvedených na obrázku 2.4. V hornom rade zľava je to *ukončenie*, *vidlička*, *dvojitá vidlička*, *trojitá vidlička*, *hák*, *kríženie*, *bočný kontakt*. V dolnom rade pokračuje zľava *bod*, *interval*, *jednoduchá slučka*, *dvojitá slučka*, *jednoduchý most*, *dvojitý most*, *priesečná línia*.



Obr. 2.4: Základné typy markantov. Obrázok bol prebraný a upravený z [6].

Na veľmi jemnej úrovni môžeme detegovať detaily vo vnútri papilárnych línií – jedná sa o *potné žľazy* prsta, podľa pozície a tvaru ktorých sú odtlačky veľmi spoľahlivo rozlíšiteľné. Rozlišovanie podľa nich ale nie je úplne praktické, nakoľko vyžaduje veľmi kvalitný obrázok odtlačku prsta. [2]

2.2 Získavanie odtlačkov prstov

Vzhľadom na rôzne spôsoby snímania odtlačkov prstov sa stretávame s tromi rôznymi druhmi odtlačkov prstov [1]:

- Rolovaný (tiež váľaný alebo farbený),
- pichaný (tiež živý),
- latentný (tiež skrytý),

ktoré sú znázornené na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Porovnanie druhov odtlačkov: rolovaný (vľavo), pichaný (stred) a latentný (vpravo). Obrázok bol prebraný a upravený z [7].

V začiatkoch systematického používania odtlačkov prstov pre identifikáciu osôb sa odtlačky zaznamenávali na daktyloskopickú kartu, ktorá obsahovala rolované aj pichané odtlačky všetkých desiatich prstov konkrétnej osoby. Prst bol natretý čiernym atramentom a následne bol rolovaný odtlačok vytvorený rolovaním prsta z jednej strany na druhú, pichaný odtlačok vznikol priamym priložením prsta na papier. [5]

Z rovnakej metódy sa vychádzalo pri potrebe transformovať odtlačky prstov do digitálnej podoby vhodnej pre aplikácie. Prst subjektu, ktorého odtlačok sa mal dostať do aplikácie, bol natretý čiernym atramentom a priložený na papierovú kartu, ktorá bola následne naskenovaná klasickým skenerom pre papier a výsledkom bol digitálny obrázok. Tento proces sa nazýva *off-line* získavanie odtlačkov prstov. [2] [3]

V dnešnej dobe väčšina civilných aj kriminálnych aplikácií akceptuje *live-scan* digitálne obrázky získané priamym snímaním povrchu prsta elektronickým skenerom odtlačkov prstov. Táto metóda nevyžaduje prácu s atramentom, subjekt len priloží prst na plochý povrch

live-scan skeneru. Takto vzniknuté obrázky musia spĺňať určité špecifikácie, ktoré určujú ich kvalitu a formát, za účelom maximalizovať kompatibilitu medzi rozličnými aplikáciami využívajúcimi odtlačky prstov pochádzajúce z rôznych skenerov. [2]

Vo forenzej vede existuje ešte špeciálny druh odtlačku prsta, takzvaný *latentný odtlačok* [2], ktorého získavanie sa zaraďuje taktiež medzi off-line metódy. Konštantné vylučovanie potu z potných pórov v papilárnych líniách a kontakt povrchu prsta s inými časťami tela a rôznymi objektmi zanechávajú na povrchu prsta vrstvu vlhkosti a/alebo mastnoty [2]. Pri dotyku prsta s nejakým objektom (napríklad pohárom) sa táto vrstva odtlačí na povrch objektu a takýto odtlačok je potom označovaný ako latentný [2]. V tomto prípade nie je k dispozícii reálny trojdimenzionálny prst a kópia latentného odtlačku musí byť odobratá z povrchu objektu, na ktorom je prítomný. Latentný odtlačok je zle viditeľný a jeho odobratie vyžaduje použitie určitých chemických techník, ako napríklad poprášenie práškom [2]. V porovnaní s rolovanými či pichanými odtlačkami prstov majú latentné odtlačky väčšinou slabú kvalitu [5].

2.3 Rozpoznávanie odtlačkov prstov

Niektoré metódy na porovnávanie odtlačkov prstov (založené na korelácii) pracujú priamo s digitálnymi obrázkami. Obrázky v odtieňoch sivej sú však nestálou reprezentáciou a väčšina algoritmov pre rozpoznávanie a klasifikáciu odtlačkov vyžaduje extrakciu znakov odtlačkov prstov z digitálneho obrázka. Získané znaky môžu slúžiť priamo pre porovnávanie alebo byť len medzikrokom potrebným pre získanie iných znakov. [2]

Jednotlivé kroky procesu spracovania odtlačku prsta sú schematicky znázornené na obrázku 2.6. Nasnímaný obrázok odtlačku prsta je potrebné predspracovať, aby sa z neho odstránil šum, ktorý je v obrázkoch odtlačkov prstov prítomný. Taktiež sa z neho extrahujú papilárne línie, čím sa získa popis priebehu papilárnych línií, s ktorým sa dá ďalej pracovať [1]. Po týchto úpravách proces ďalej pokračuje operáciami, ktoré sú podrobnejšie vysvetlené v ďalšom texte.



Obr. 2.6: Schematicky znázornené výstupy jednotlivých krokov procesu získania reprezentácie odtlačku prsta zo vstupného obrazu. Obrázok bol prebraný a upravený z [6].

2.3.1 Vytvorenie poľa orientácií

Obrázok odtlačku prsta je ponímaný ako dvojdimenzionálny povrch I , v ktorom každý bod má intenzitu – hodnotu odtieňa sivej z intervalu $\langle 0 - g \rangle$, kde g je horná hranica odtieňov sivej (biela farba, väčšinou číslo 1). Hodnota odtieňa sivej v bode so súradnicami x, y je vy-

jadrená ako $I[x, y]$. Podľa hodnoty $I[x, y]$, sa v každom bode obrazu spočíta smer papilárnej línie podľa jej okolia. Ak sa bod nachádza priamo na papilárnej línii, určuje jej smer s maximálnou pravdepodobnosťou. V ďalšom kroku je vytvorené blokové pole orientácií, ktoré je namapované na pôvodný obrázok. [1] [2]

2.3.2 Extrakcia papilárnych línií

Pomocou binarizácie – prevedením odtieňov sivej na bielu alebo čiernu, získame čiernobiely obrázok s papilárnymi líniami. Pre výpočet hodnoty každého pixelu sa používajú rôzne metódy, zjednodušene sa dá povedať, že tmavé pixely, ktorých hodnota intenzity sa blíži k 0, reprezentujú papilárne línie a svetlé pixely, ktorých hodnota intenzity sa blíži ku g , reprezentujú miesta medzi papilárnymi líniami. [1]

2.3.3 Stenčenie papilárnych línií

Po získaní reprezentácie papilárnych línií je potrebné upraviť ich na rovnakú šírku – šírku jedného pixela. Pre túto úpravu existuje niekoľko algoritmov, vždy však musí platiť, že papilárna línia nemôže ubúdať v žiadnom smere, aby nedošlo k problému s polohou markantov. [1]

2.3.4 Detekcia markantov

Pre detekciu markantov sa používa takzvaná Hongova metóda [1]. Základný princíp tejto metódy je nasledovný – podľa súčtu bodov v okolí na obrázku stenčenej papilárnej línie sa detegujú základné markanty, ktorými sú ukončenie a vidlička. Ich kombináciou vznikajú ostatné, zložitejšie markanty. Metóda detekuje ukončenie, keď je súčet bodov v okolí rovný 2, o vidličku sa jedná, keď je súčet bodov v okolí väčší ako 3 [1]. Ku každému detekovanému markantu sa ukladajú nasledujúce informácie [1]:

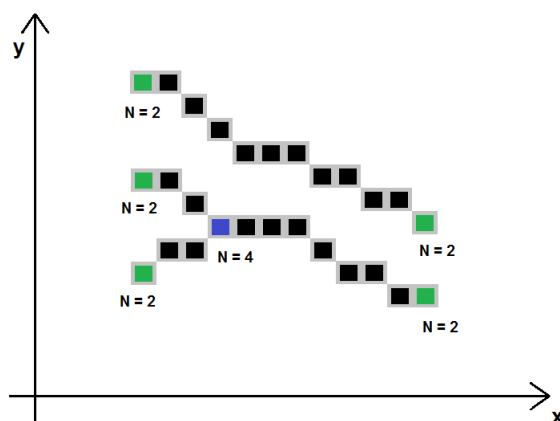
- Pozícia markantu – súradnice x a y ,
- typ markantu – napr. ukončenie,
- gradient – sklon papilárnej línie.

Detekcia markantov je schematicky znázornená na obrázku 2.7. Modrou farbou je označená vidlička, zelenou farbou ukončenie. Počet bodov v okolí jednotlivých markantov udáva N .

2.4 Porovnávanie odtlačkov prstov

Rozhodnutie, či sú dva odtlačky rovnaké, nie je jednoduché najmä kvôli takzvanej *vnútrotriednej variabilite*. Vnútrotriedna variabilita znamená, že obrázky odtlačkov rovnakého prsta nasnímané v rôznych časoch a/alebo okolnostiach, môžu vďaka niektorým faktorom pôsobiť tak, akoby išlo o odtlačky dvoch netotožných prstov [2]. Hlavnými faktormi, ktoré vplyvajú na vnútrotriednu variabilitu sú posun, rotácia, čiastočné prekrytie, tlak, stav kože, šum a chyby spôsobené počas extrakcie znakov odtlačkov prstov z obrázkov.

Existuje mnoho algoritmov pre porovnávanie odtlačkov prstov. Vstupnými údajmi pre algoritmus sú dva odtlačky prstov. Výstupom algoritmu je buď rozhodnutie, či sú odtlačky rovnaké (binárna hodnota), alebo stupeň zhody – reálna hodnota medzi 0 a 1. Algoritmy



Obr. 2.7: Schematicky znázornená detekcia markantov v stenčených papilárnych líniách.

pre verifikáciu a identifikáciu sú veľmi podobné, pri potrebe porovnávať jeden odtlačok s n ďalšími sa jednoducho algoritmus použije n -krát. [2]

Algoritmy pre porovnávanie odtlačkov prstov môžeme rozdeliť do viacerých rodín, ktoré sú opísané v nasledujúcich podkapitolách.

2.4.1 Porovnávanie založené na korelácii

Porovnávanie založené na korelácii používa obrázky odtlačkov prstov v odtieňoch sivej. Porovnávané obrázky sa prekrývajú a korelácia medzi dvomi zodpovedajúcimi pixelmi sa počíta pre rôzne prekrytia obrázkov (ich posuny, rotácie, atď.). [2]

2.4.2 Porovnávanie založené na markantoch

Najpoužívanejšie je porovnávanie založené na markantoch. Z obrázka odtlačku prsta sú extrahované informácie o markantoch (postup extrakcie vysvetlený v kapitole 2.3) a uložené sú v dvojrozmernom poli. Porovnávanie potom spočíva v nájdení takého prekrytia dvoch polí, v ktorom je maximálny počet zhodných markantov. [2]

2.4.3 Porovnávanie založené na vlastnostiach papilárnych línií

V prípade, že obrázok odtlačku prsta je nekvalitný, detekcia markantov je náročná. Avšak iné vlastnosti papilárnych línií, ako napríklad zakrivenie alebo frekvencia, môžu byť z obrázka extrahované. Tieto metódy porovnávania sú menej spoľahlivé ako metódy založené na markantoch, môžu však slúžiť ako podporné informácie. [2]

Kapitola 3

Falzifikáty odtlačkov prstov

Na začiatku 20. storočia, keď sa odtlačky prstov začali používať na súdoch ako dôkazový materiál z miest činu, vznikla možnosť čeliť pri vyšetrovaní falošným odtlačkom prstov. Falošné odtlačky prstov sú používané osobami, ktoré páchajú trestný čin a snažia sa pozornosť strhnúť na nezainteresovanú osobu alebo ich použitím odkloniť smer vyšetrovania. V dnešnej dobe sú používané aj pre oklamanie biometrických systémov. Pod termín falošné odtlačky prstov spadajú umelo vyrobené falzifikáty, ale aj zranené alebo iným spôsobom modifikované živé prsty. [3] [8]

Známym prípadom falošných odtlačkov prstov, figurujúcich vo vyšetrovaní kriminálneho prípadu, je vražda Harryho Oakesa, najbohatšieho muža na Bahamách, v roku 1943. Dvaja skorumpovaní policajti premiestnili odtlačok podozrivého Alfreda de Marigny z pohára, z ktorého pil počas policajného výsluchu, a umiestnili ho na nábytok na mieste činu. Obhajoba bola schopná preukázať nezrovnalosť medzi pozadím na odtlačku prsta vzhľadom k materiálu, z ktorého bol vyrobený nábytok, na ktorom sa odtlačok prsta našiel. [8]

Louis J. van der Meulen vo svojom článku opisuje okolnosti, ktoré ho priviedli k nápadu použiť odtlačky prstov na nohách ako falošné odtlačky prstov. Počas druhej svetovej vojny bol nútený podstúpiť trinásťmesačný útek z Holandska až do Turecka. S jeho spoločníkom si počas prechodu cez Alpy zabezpečili falošné francúzske doklady, avšak čelili pritom problému – doklady bolo potrebné doplniť o odtlačky prstov. Nechceli, aby odtlačky boli v prípade komplikácií spájané s nimi ani s ich priateľmi. Použili preto odtlačky z prstov na nohách. [9]

Na druhej strane, výroba falošných odtlačkov prstov môže mať aj law-enforcement opodstatnenie, čiže použitie za účelom presadzovania práva. Známym prípadom je snaha FBI dostať sa teroristom do telefónu, ktorá vyvolala spor so spoločnosťou Apple. FBI sa podarilo odomknúť telefón Syed Rizwan Farooka, ktorý počas útoku v Kalifornii zabil 14 ľudí. Telefón bol odomknutý bez pomoci spoločnosti Apple, ktorá ho vyrobila. Apple odmietla poskytnutie pomoci pri odomknutí vzhľadom na udržanie statusu privátnosti a bezpečnosti. FBI neprezradila, akým spôsobom sa podarilo do telefónu dostať, presadzuje však názor, že získanie kritických digitálnych informácií má svoj význam, keď ide o všeobecnú bezpečnosť. [10]

Už na základe niekoľkých uvedených prípadov je zrejmé, že použitie falzifikátov odtlačkov prstov sa vyskytuje pomerne dlhú dobu a aktuálne je stále aj dnes. V nasledujúcich podkapitolách sú uvedené metódy výroby falzifikátov odtlačkov prstov aj ich detekcie na základe artefaktov, ktoré sa vo falzifikátoch vyskytujú vzhľadom na použitú metódu výroby. Na konci kapitoly je zhrnutý doterajší vývoj v oblasti detekcie falzifikátov.

3.1 Výroba falzifikátov

Falzifikáty odtlačkov prstov môžu byť vyrobené viacerými metódami, ktoré sú podrobnejšie opísané v nasledujúcom texte.

3.1.1 Výroba pečiatky

Na základe obrázka papilárnych línií alebo odtlačku prsta odobratého z nejakého povrchu (stopy) je možné vyrobiť takzvanú pečiatku (stamp). Pečiatka je zhotovená z gumy alebo polyméru napríklad pomocou laserového gravírovania, ktoré je bežne komerčne dostupné. Takto vyrobený falzifikát síce stráca flexibilitu, ale je možné vytvoriť ním značky na povrchoch. Značka musí pozostávať z masného materiálu, ktorý pripomína sekrét zanechaný papilárnymi líniami pri dotyku s povrchom. Môže byť použitý napríklad prirodzený sekrét vylučovaný na povrchu čela človeka. [8]

V prípade, že odtlačky sú detekované použitím DFO (aminokyselinové činidlo), je odhalený rozdiel medzi distribúciou a množstvom masného sekrétu [8]. V pravom odtlačku prsta sekrét kopíruje štruktúru potných pórov, a tým pádom aj papilárnych línií, ale v prípade falošného odtlačku je distribuovaný odlišným spôsobom. Rozdiel je znázornený na obrázku 3.1, v ľavej časti je zobrazený pravý odtlačok prsta zanechaný na papieri a detegovaný použitím DFO, vpravo je rovnakým spôsobom detekovaný falošný odtlačok prsta. Na obrázku vidieť rozdielny výskyt bodiek reprezentujúcich masný sekrét, zvyrazňuje ich použitie fotoluminescentného režimu.



Obr. 3.1: Rozdiel medzi pravým a falošným odtlačkom prsta zanechaným pečiatkou. Vľavo je pravý odtlačok prsta, vpravo falzifikát. Odtlačky boli detegované použitím DFO. Obrázok bol prebraný a upravený z [8].

3.1.2 Výroba odliatku

Táto metóda výroby falzifikátov odtlačkov prstov vedie k výrobe 3D odliatku, ktorým je následne možné za pomoci masného materiálu zanechávať stopy na povrchu. Klasická technika výroby odliatku vyžaduje pri výrobe použitie reálneho prsta človeka pre prvotný odliatok. Vhodným materiálom pre jeho výrobu je termoplastický materiál, iné materiály

vykazujú buď nízku hĺbku papilárnych línií, alebo vznik vzduchových bublín, ktoré sú potom prítomné aj v stope vytvorenej odliatkom [8]. Keď je vyrobený prvotný odliatok, na jeho základe môže byť použitím rôznych materiálov, ako napríklad silikónové biele lepidlo alebo latex, vyrobený opačný odliatok [8]. Alternatívne je možné vyrobiť odliatok aj bez použitia reálneho prsta, v tomto prípade je potrebný invertovaný obrázok odtlačku prsta, ktorý sa vytlačí na 3D tlačiarňu na acetátový hárok (priesvitná fólia) a opačná forma je potom naplnená želatínou, lepidlom alebo latexom [8].

Odliatky vyrobené touto metódou môžu byť veľmi kvalitné a rozlíšenie pravej stopy odtlačku prsta od falošnej je v tom prípade náročné. Kvalita falzifikátu závisí obzvlášť od použitého materiálu, ktorého výber ovplyvňuje aj rozlíšenie a schopnosť reprodukovat potné póry. Pri vhodne zvolenom materiáli sú znaky falzifikátu pozorovateľné len vo veľmi kvalitných obrázkoch odtlačkov prstov. V menej kvalitných pripomínajú šum, ktorý sa v obrázkoch bežne vyskytuje. [8]

3.1.3 Výroba plošných spojov

Techniky, ktoré sa používajú pri výrobe plošných spojov môžu byť použité aj pre výrobu falzifikátov odtlačkov prstov. Pri tejto technike stačí, ak je k dispozícii obrázok odtlačku prsta, nevyžaduje použitie reálneho prsta. Obrázok odtlačku prsta je potrebné invertovať a následne vytlačiť na priehľadný materiál. Vytlačený invertovaný obrázok sa priloží na medený povrch. Medzery medzi papilárnymi líniami sú na obrázku tmavé (naopak vzhľadom ku klasickému obrázkom odtlačkov prstov) a po osvetlení UV svetlom ochránia medený povrch. Cez priehľadné miesta UV svetlo prejde a procesom chemického leptania vytvorí na medenom povrchu 3D tvar papilárnych línií. [8]

Na stopách odtlačených takto vytvoreným falzifikátom sú v porovnaní s obrázkami pravých odtlačkov prstov porušené okraje papilárnych línií [8]. Rozdiel medzi originálnym odtlačkom prsta a stopou zanechanou 3D napodobeninou odtlačku, vyrobenou metódou výroby plošných spojov, je znázornený na obrázku 3.2. V ľavej časti je originálny odtlačok prsta, v pravej časti je falzifikát rovnakého odtlačku s viditeľne porušenými okrajmi papilárnych línií.



Obr. 3.2: Rozdiel medzi pravým a falošným odtlačkom prsta zanechaným odliatkom vyrobeným metódou výroby plošných spojov. Vľavo je originálny odtlačok prsta, vpravo falzifikát. Odtlačky sú vizualizované optickými technikami. Obrázok bol prebraný a upravený z [8].

3.1.4 Výroba premiestnením odtlačku pomocou adhézneho materiálu

Odtlačok prsta je zodvihnutý z povrchu použitím adhézneho materiálu – lepidla (napríklad lepiacej pásky) a následne prenesený na iný povrch. V podstate sa nejedná o skutočný falzifikát, ale ak bol odtlačok prenesený na iné miesto s úmyslom podvodu, je zaň považovaný. Úspešnosť takejto operácie v praxi je nízka, aj keď metóda pôsobí jednoducho [8]. Aby bolo možné falzifikát vytvoriť, je vyžadované, aby bol odtlačok zdvíhaný z hladkého povrchu, prenesený na čistý povrch, a navyše, aby obsahoval dostatočné množstvo mastného sekrétu na prenos [8].

Na takto vyrobenom falzifikáte odtlačku môžeme pozorovať vzduchové bubliny spôsobené pri prenose, zvláštny tvar okrajov odtlačku spôsobený zdvíhaním pásky a taktiež zvyšky lepidla. Obrázok 3.3 zobrazuje falzifikát odtlačku vyrobený prenesením pravého odtlačku prsta. V znázornenom falzifikáte sú prítomné vzduchové bubliny aj stopy po zdvíhaní pásky v ľavom okraji odtlačku.



Obr. 3.3: Falzifikát odtlačku prsta vyrobený prenesením stopy odtlačku prsta pomocou lepidla a detegovaný hliníkovým práškom. Obrázok bol prebraný z [8].

3.2 Artefakty falzifikátov

Na falzifikátoch odtlačkov prstov sú prítomné určité záchytné body, inak nazývané aj artefakty, vďaka ktorým je možné falzifikát rozlíšiť od pravého odtlačku prsta. Vo všeobecnosti sa rozlišujú vnútorné a vonkajšie znaky falzifikátov. Vnútorné znaky je možné pozorovať priamo na odtlačku prsta, pričom vonkajšie znaky sú badateľné z kontextu, v ktorom sa odtlačok prsta nachádza [8]. V tomto texte budeme bližšie predstavovať len vnútorné znaky falošných odtlačkov prstov. Medzi ne patrí:

- *Šum v pozadí* (druh haló efektu) okolo odtlačku alebo vo vnútri odtlačku v oblastiach bez papilárnych línií. Vzniká pri dotyku odliatku s povrchom, v miestach, kde na odliatku už nie sú papilárne línie, len hladký povrch. [8]
- *Celkový tvar* falzifikátu je odlišný od tvaru, ktorý vznikne pri odtlačaní skutočného prsta [8]. Tento artefakt vo falzifikátoch je na obrázku 3.4 znázornený v druhom stĺpci zľava.
- *Externé obrisy* odtlačku prsta sú veľmi jasné. Na konci odliatku papilárne línie náhle končia, čo sa prejaví okamžitým ukončením papilárnej línie v odtlačku falzifikátu, zatiaľ čo v pravom odtlačku papilárne línie na okajoch miznú postupne/plynulejšie. Náhle ukončenie papilárnych línií je znázornené na obrázku 3.4 v druhom stĺpci zľava. [8]
- *Chýbajúce oblasti* papilárnych línií alebo oblasti papilárnych línií, ktoré sú v porovnaní s ich okolím menej jasné [8]. Chýbajúce regióny v odtlačkoch falzifikátov sú na obrázku 3.4 znázornené v štvrtom stĺpci zľava.
- *Rozmazané alebo skreslené papilárne línie* v oblastiach, v ktorých sa to neočakáva vzhľadom na prirodzené odtlačenie prsta na povrchu [8].
- *Neočakávaný výskyt papilárnych línií* vzhľadom na použitú techniku detekcie odtlačku prsta [8]. Ako bolo uvedené v kapitole 3.1, pri detekcii použitím aminokyselínového činidla sú odhalené postupnosti bodiek, ktoré reprezentujú potné póry na papilárnych líniách. Očakáva sa preto, že papilárne línie na obrázku kopírujú štruktúru bodiek. Pri použití pečiatky alebo odliatku na vytvorenie falzifikátu sa tieto natrú masným sekretom, jeho rozloženie po odliatku samozrejme nekopíruje tvar papilárnych línií, preto na falzifikátoch papilárne línie nesledujú tvar postupnosti bodiek.

Konkrétne znaky falzifikátov odtlačkov prstov, ktoré sú pozorovateľné pri kvalitných obrázkoch odtlačkov prstov:

- *Absencia potných pórov* môže byť pozorovaná v kvalitných obrázkoch odtlačkov prstov, avšak pri vhodnom výbere materiálu je možné potné póry pozorovať aj vo falzifikáte [8]. Na obrázku 3.4 je vo všetkých odtlačkoch prítomná absencia potných pórov.
- *Vzduchové bubliny*, ktoré sú v prípade použitia odliatku taktiež prítomné len v prípade nevhodne vybraného materiálu. Okrem toho sa vzduchové bubliny vyskytujú vo falzifikátoch, ktoré boli vytvorené premiestnením pravého odtlačku pomocou adhézneho materiálu. Vzduchové bubliny v odtlačkoch falzifikátov sú na obrázku 3.4 zobrazené v prvom stĺpci zľava. [8]

- *Veľmi úzke medzery medzi papilárnymi líniami* v porovnaní so šírkou papilárných líní alebo nerovnomerné šírky papilárných líní a medzier medzi nimi [8]. Tento artefakt je prítomný v odtlačkoch falzifikátov v treťom stĺpci zľava na obrázku 3.4.
- *Prítomnosť rovnakých artefaktov* v rôznych odtlačkoch zobrazujúcich rovnakú oblasť papilárných líní [8].



Obr. 3.4: Rôzne artefakty falzifikátov. V prvom stĺpci zľava sú obrázky falzifikátov s prítomnými vzduchovými bublinami. V druhom stĺpci zľava sa nachádzajú falzifikáty s celkovým tvarom odlišným od prírodného tvaru odtlačku, ďalším artefaktom v týchto odtlačkoch je náhle ukončenie papilárných líní. V treťom stĺpci zľava sú v odtlačkoch falzifikátov veľmi úzke medzery medzi papilárnymi líniami v porovnaní so šírkou papilárných líní. V štvrtom stĺpci zľava sú znázornené odtlačky falzifikátov s chýbajúcimi regiónmi. Zároveň je na všetkých odtlačkoch možné pozorovať absenciu potných pórov.

3.3 Detekcia živosti

Zabezpečenie automatizovaného systému rozoznávania odtlačkov prstov, používaného pre kontrolu prístupu, je jednou z najkritickejších a najnáročnejších úloh. Detekcia živosti je schopnosť biometrického systému odlišiť neživý prst (napríklad vyrobený zo syntetického materiálu) od živého prsta, pričom jej hlavným účelom je odhaliť falzifikát. Zistovanie pravosti detekciou živosti je relevantné len pri získavaní odtlačku prsta live-scan metódou. Rozlišovanie môže byť vykonávané na základe rôznych metrík. [2] [3] [11]

Metódy detekcie založené na *teplote* prsta vychádzajú z toho, že v prostredí s určitou teplotou má ľudský prst vyššiu teplotu ako syntetický materiál. Na teplotu ľudského a aj syntetického prsta však vplyva mnoho iných faktorov, ako napríklad vykurovanie miestností a prúdenie vzduchu v miestnosti. Teplotu ľudského prsta navyše ovplyvňuje aj psychický a fyzický stav jedinca a môže sa pohybovať v rozmedzí od 25°C do 37°C. Všetky spomínané faktory môžu mať vplyv na výslednú teplotu, a preto tieto metódy nie sú veľmi spoľahlivé. [1] [2]

Koža a syntetický materiál majú rozdielne *optické vlastnosti*, to znamená, že sa v nich inak prejavuje napríklad odraz, absorpcia, rozptyl a lom svetla. Optické senzory odtlačkov

prstov dokážu testovať tieto vlastnosti. Existujú však materiály, ktorých spomínané optické vlastnosti sú podobné s optickými vlastnosťami kože. [2]

Ďalšou možnosťou pre zistenie živosti je *ultrazvuková metóda*, ktorá je založená na fakte, že ultrazvukové vlny prenikajú pod povrch prsta. Táto metóda dokáže odhaliť falzifikát nalepený na živom prste, pretože ultrazvukové vlny sa od neho odrazia iným spôsobom, ako by sa odrazili od živého prsta bez ďalších vrstiev. [1]

Medzi spoľahlivé metódy, čo sa detekcie živosti týka, patrí *detekcia potu*. Táto metóda vyžaduje dlhšie pridrżanie prsta na senzore (pribliţne 5 sekúnd). Potné póry počas tejto doby vylúčia nejaké množstvo potu. Ak je priloţený skutočný prst, v obrázkoch urobených v rôznych časoch počas priloţenia potné póry postupne tmavnú. Falzifikát je detegovaný v prípade, že sa obrázok počas danej doby nemení. Okrem toho môžu byť navyše detegované aj potné póry, to však dovoľujú len obrázky vo vysokom rozlíšení. [1] [11]

Skupín metód na detekciu živosti je omnoho viac vzhľadom na to, že výrobcovia senzorov sa neustále snažia vyrobiť senzor s lepšou technológiou [1]. K takým patrí napríklad *detekcia srdcového pulzu*. Pumpovanie krvi spôsobuje objemové zmeny v ţilách a tepnách, v dôsledku čoho aj koţa na končekoch prstov pulzuje. Ľudským okom je toto pulzovanie nepostrehnuteľné. Sensory však pri dostatočnom zväčšení (minimálne desaťnásobnom) dokážu detegovať vzájomný pohyb papilárnych línií smerom k sebe a od seba a tak potvrdí pulzovanie koţe a živosť prsta [1]. Alternatívne je možné na živom prste pozorovať zmeny vo farbe, ktoré sú spôsobené rozdielnym podielom kyslíka v krvi [11].

3.4 Detekcia falzifikátov na základe posúdenia kvality obrázka

V predchádzajúcej kapitole boli opísané rôzne metódy používané pre detekciu živosti. Iným prístupom je detekcia falzifikátov na základe posúdenia kvality obrázka odtlačku prsta. Motiváciou pre vznik tejto metódy je predpoklad, že obrázok odtlačku zachytený so zámerom napodobniť pravý odtlačok, má inú kvalitu ako obrázok pravého odtlačku prsta zachytený počas klasického scenára. [8]

Použitie metódy predpokladá existenciu množiny kritérií, ktoré tvoria klasifikátor. Po vyhodnotení daných kritérií z obrázka odtlačku prsta je určená pravdepodobnosť živosti a následne je obrázok priradený do jednej z dvoch tried – falzifikát alebo pravý odtlačok prsta. Medzi spomínané kritériá môže patriť napríklad porucha štruktúry, výskyt artefaktov objavujúcich sa vo falzifikátoch, stupeň ostrosti obrázka, úroveň farieb a svetla, množstvo informácií získaných z obrázka a podobné [8]. Existujú dva prístupy, v prvom sú kritériá na posúdenie kvality obrázka prispôbené priamo odtlačkom prstov – metóda FQA (Fingerprint-Specific Quality Assessment), v druhom sa jedná o celkové posúdenie kvality obrázka bez zamerania na odtlačky – metóda IQA (General Image Quality Assessment).

V metóde FQA je kvalita obrázka odtlačku prsta posúdená napríklad na základe sily a smerovania papilárnych línií, ich spojitosti, jasnosti či integrity štruktúry papilárnych línií a medzier medzi nimi. Na zmeranie týchto vlastností je k dispozícii niekoľko informačných zdrojov – informácie o smerovaní a sile papilárnych línií môžu byť extrahované z poľa orientácií, alternatívne pomocou filtrov, ďalej z intenzity pixelov v odtieňoch sivej, zo silového spektra alebo pomocou neurónových sietí. Kvalita obrázka pritom môže byť vyhodnotená holistickým spôsobom (z celého obrázka) alebo v jednotlivých častiach obrázka osobitne a nakoniec sa pre posúdenie pravosti odtlačku výsledky zjednotia. Je potreba poznamenať, že táto metóda využíva pre detekciu falzifikátu len jeden vstupný obrázok. [8]

V metóde IQA existujú dva spôsoby posúdenia kvality. V prvom z nich je dostupný aj obrázok pravého odtlačku prsta, v druhom sa vychádza len z jedného obrázka. Metóda pracuje s celým obrázkom, nesleduje žiadne znaky špecifické pre odtlačky prstov. Pre posúdenie kvality používa štatistické modely. [8]

3.5 Zhrnutie uplynulého vývoja detekcie falzifikátov

Falzifikáty odtlačkov prstov sa začali používať zrejme čoskoro potom, ako boli odtlačky uznané za dôveryhodný dôkazový materiál. Z vedeckého hľadiska bola obava, či je odtlačky prstov možné sfalšovať, potvrdená v roku 1924 [12]. Už vtedy vznikla vo forenznej vede nutnosť overovať pravosť odtlačkov prstov, pričom táto kontrola prebiehala vizuálne a bola vykonávaná vyškoleným špecialistom [8]. V niektorých prípadoch je takáto kontrola náročná a rozlíšenie pravého odtlačku od falzifikátu nie je jednoduché ani jednoznačné [8].

V dnešnej dobe sa stretávame aj s falzifikátmi vhodnými pre oklamanie digitálnych senzorov odtlačkov prstov. Rôzne metódy výroby falzifikátov boli opísané v kapitole 3.1. S rozmachom digitálnych senzorov sa zväčšila taktiež aj potreba algoritmov, ktoré umožnia softwarovo (popríklad v spojení s hardware) rozlíšiť pravý odtlačok prsta od falošného. Jednou z prvých snáh pri detekcii falzifikátu bola detekcia živosti na základe vzoru potu pokožky na bruškách prstov [8]. Neskôr vzniklo mnoho skupín metód, ktoré slúžia na detekciu živosti prsta. Každá skupina metód sa opiera o niektorú fyzikálnu vlastnosť, ktorá je pre detekciu vhodná, pričom sa jedná napríklad o detekciu pomocou teploty, optických vlastností, ultrazvukovou metódou alebo napríklad aj pomocou detekcie srdcového pulzu. Niektoré z metód detekcie živosti boli opísané v kapitole 3.3.

Rozdielnym prístupom pre detekciu falzifikátu odtlačku prsta je posudzovanie kvality obrázka odtlačku prsta. V tomto prípade nie je zisťovaná živosť prsta pomocou fyzikálnych vlastností, ale na základe rôznych metrík je zhodnotená kvalita obrázka odtlačku a živosť je z nej percentuálne vyčíslená. Metóda bola bližšie predstavená v kapitole 3.4.

Kapitola 4

Generátor SFinGe

V súčasnosti je okrem návrhu algoritmov pre detekciu falzifikátov vyvíjaná aj veľká snaha na vynájdenie stále lepších algoritmov pre rozpoznávanie odtlačkov prstov. Presnosť algoritmov je pritom potrebné overovať na databázach odtlačkov prstov. Tento fakt spôsobuje mnohé problémy, nakoľko databázy sú častokrát malé a súkromné, algoritmus potom nie je otestovaný objektívne, naopak, je takzvané vysoko dátovo závislý. Znamená to, že algoritmus nie je otestovaný pre odtlačky pochádzajúce z rôznych aplikácií a prostredí. [2]

Aby bol algoritmus otestovaný objektívne, je potrebná databáza s tisícami až desiatimi odtlačkov prstov [13]. Zhromažďovanie obrázkov odtlačkov prstov do takýchto obrovských databáz je [13]:

- Drahé po finančnej aj časovej stránke,
- nezáživné pre ľudí, ktorí odtlačky zbierajú, aj pre dobrovoľníkov, ktorí sa väčšinou musia odobrať odtlačkov zúčastniť viackrát,
- chúlостivé z dôvodov ochrany osobných údajov.

Generátor SFinGe (Synthetic Fingerprint Generator), ktorý vznikol pred viac ako 15 rokmi, dovoľuje vytvárať rozsiahle databázy odtlačkov prstov bez problémov s ochranou osobných údajov a so zanedbateľnými nákladmi [11]. Generátor produkuje syntetické odtlačky prstov, ktoré sú vytvorené na základe niekoľkých vstupných parametrov [13].

Aj keď v súčasnosti existuje viacero prístupov pre generovanie syntetických odtlačkov prstov, metóda SFinGe je najpoužívanejšou vo výskume aj v aplikáciách [11]. Generátor SFinGe je použitý aj v tejto práci, preto bude v nasledujúcich kapitolách bližšie predstavená metóda SFinGe, na základe ktorej pracuje. Okrem toho bude detailnejšie opísaný aj význam a použitie syntetických odtlačkov prstov.

4.1 Syntetické odtlačky prstov

Syntetické odtlačky prstov napodobňujú obrázky odtlačkov prstov získané z digitálnych skenerov, pretože väčšina komerčných aplikácií využíva online získavanie digitálnej reprezentácie odtlačkov. Samozrejme, je možné vytvárať aj také, ktoré napodobňujú odtlačky získané offline metódou. Pri vytváraní generácie syntetických odtlačkov prstov sa vyžaduje, aby odtlačky v nej obsahovali vnútrotriedne aj medzitriedne variácie, tak, ako je to prirodzené. Mala by obsahovať viac realistických odtlačkov rovnakého „virtuálneho prsta“ simulovaním:

- Rozličných plôch dotyku,
- nelineárnych deformácií vzniknutých nepravouhlým priložením prsta k ploche senzoru,
- variácií v šírke papilárnych línií kvôli intenzite pritlačenia prsta alebo vlhkosti pokožky,
- malých porezaní na prste alebo iných druhov šumu/porušení. [2]

Možnosť generovania databáz syntetických odtlačkov prstov je okrem riešenia už spomínaných problémov vhodná aj preto, že po použití databázy na vyhodnotenie testov algoritmu sa už nepoužíva viackrát, ale pre budúce vyhodnotenia sa použijú nové databázy. Algoritmy pre rozpoznávanie a porovnávanie odtlačkov prstov môžu byť s použitím databáz syntetických odtlačkov týmto spôsobom efektívne tréňované, testované, optimalizované a porovnávané. [2]

Syntetické odtlačky prstov sú vhodné aj pre vývoj, optimalizáciu a vyhodnocovanie algoritmov pre získavanie znakov z odtlačkov prstov (ako napríklad detekcia markantov), najmä pri strojovom učení, keď je potrebné veľké množstvo označených obrázkov. Počas generovania syntetického odtlačku prsta je možné získať napríklad pole orientácií, frekvenciu papilárnych línií alebo umiestnenie markantov. Tieto informácie sú využité pri otestovaní správnosti algoritmu. Napríklad na vstup algoritmu pre extrakciu markantov sa vloží syntetický odtlačok prsta a výstup algoritmu sa porovnáva so skutočným umiestnením markantov, ktoré bolo získané počas generovania syntetického odtlačku. [13]

4.2 Generovanie hlavného odtlačku (master fingerprint)

Typickým postupom pri extrahovaní znakov z obrázkov odtlačkov prstov je prvotná segmentácia odtlačku z pozadia, následne sú približne určené mapy orientácie a frekvencie papilárnych línií. Na základe týchto informácií je vytvorený vzor papilárnych línií a nakoniec sú detekované markanty [11]. Tieto operácie boli podrobnejšie vysvetlené v časti 2.3.

Metóda SFinGe využíva pri generovaní syntetických odtlačkov prstov niektoré inverzované kroky z vyššie uvedených [11]. Najskôr je potrebné vygenerovať hlavný odtlačok (master fingerprint – perfektný odtlačok [14], v procese digitálneho spracovania odtlačkov je ekvivalentný k fáze, v ktorej sú extrahované papilárne línie, v obrázku 2.6 znázornenej v prostriedku). Postup generovania hlavného odtlačku sa delí do štyroch krokov [2]:

1. generovanie tvaru odtlačku
2. generovanie mapy orientácií
3. generovanie mapy frekvencie papilárnych línií
4. generovanie vzoru papilárnych línií.

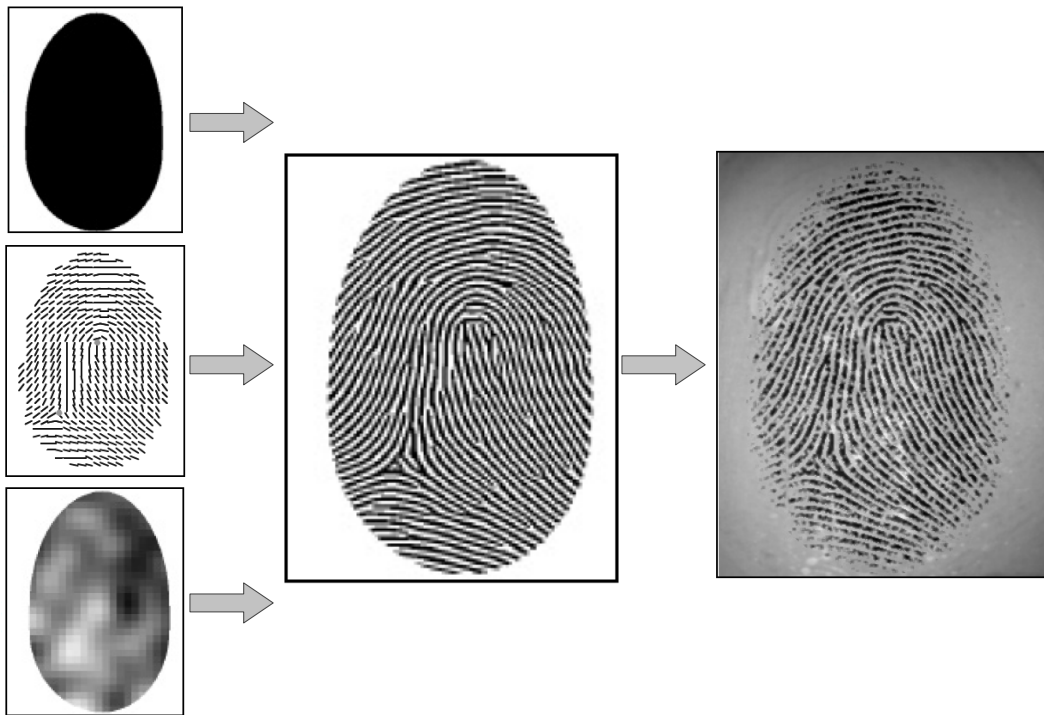
V prvom kroku je generovaná plocha odtlačku, ktorá je v základnom tvare oválna, jej eliptické segmenty sa však dajú upravovať [14], vďaka čomu môžu mať syntetické odtlačky rozličné tvary.

V druhom kroku sa určuje trieda odtlačku, podľa ktorej je vygenerované umiestnenie singulárnych bodov [14]. Ich pozíciu je taktiež možné meniť. Výstupom druhého kroku je pole orientácií.

V treťom kroku je na základe heuristických kritérií, vytvorených vzhľadom na vizuálnu inšpekciu veľkého množstva odtlačkov prstov, vygenerovaná frekvencia papilárnych línií [2].

Vstupom pre proces generovania papilárnych línií sú výstupy prvých troch krokov, ktoré boli generované samostatne. V štvrtom kroku sa generuje vzor papilárnych línií. V metóde SFinGe je to zabezpečené jednoduchým a pritom mocným spôsobom. Z viacerých počiatočných bodov (initial seeds) sa s využitím Gáborových filtrov a znalosti polí orientácie a frekvencie generujú papilárne línie a na náhodné miesta markanty rôznych typov (ukončenie, vidlička, ostrov, atď.). Úplne na záver je do tejto reprezentácie pridaný šum, ktorý sa typicky vyskytuje v obrázkoch odtlačkov prstov získaných z digitálneho skenera. [2]

Proces generovania hlavného odtlačku je znázornený na obrázku 4.1. V prvom stĺpci sú výstupy prvých troch krokov – zhora plocha odtlačku, pole orientácií a frekvencia papilárnych línií. V strede obrázka je znázornený vzor papilárnych línií a markantov vytvorený v štvrtom kroku. Úplne vpravo je zobrazený obrázok syntetického odtlačku prsta po pridaní typického šumu.



Obr. 4.1: Schematicky znázornený proces generovania hlavného odtlačku. V prvom stĺpci sú znázornené vstupné informácie, potrebné pre generovanie – plocha odtlačku, pole orientácií a mapa frekvencie papilárnych línií. V druhom stĺpci je vzor papilárnych línií a markanty, ktoré vznikli na základe vstupných informácií. Nakoniec je pridaním šumu, ktorý sa typicky vyskytuje v obrázkoch odtlačkov prstov, vytvorený syntetický odtlačok prsta. Obrázok bol prebraný a upravený z [15].

4.3 Generovanie odvodených odtlačkov

Pre generovanie viacerých odtlačkov rovnakého „virtuálneho prsta“ je potrebný komplexnejší prístup [11]. Z hlavného odtlačku, ktorý predstavuje unikátny a nemeniteľný vzor, môžu byť odvodené viaceré syntetické odtlačky, napríklad prostredníctvom posunu, rotácie, zmeny stavu kože, pridania šumu [2].

V metóde SFinGe sú pre získanie odvodených odtlačkov na hlavný odtlačok postupne aplikované nasledujúce štyri úpravy [13]:

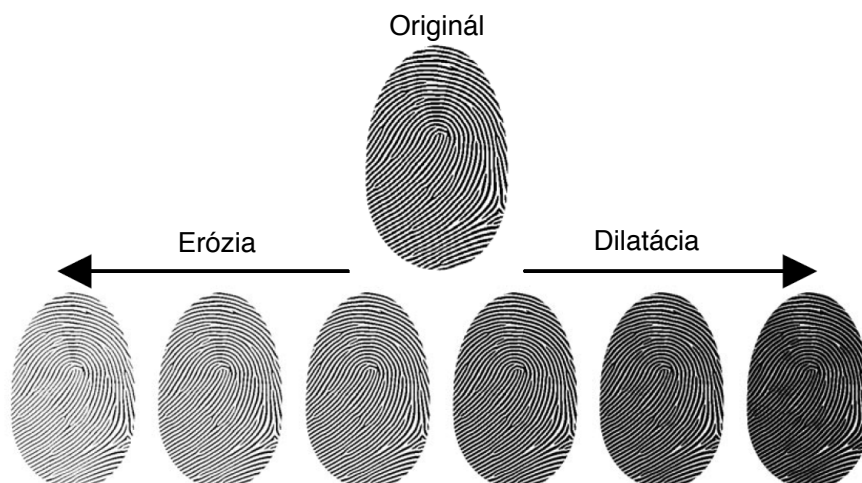
1. zmeny priemernej hrúbky papilárnych línií
2. skreslenie
3. pridanie šumu
4. globálne otočenie/posun.

Na obrázky odtlačkov prstov má vlhkosť prsta a tlak, akým je prst pritlačený k senzoru, podobný vplyv. Keď je pokožka prsta suchá alebo tlak malý, papilárne línie sú na obrázku tenšie. Naopak, vlhké prsty alebo väčší tlak prsta na senzor spôsobia, že papilárne línie sa na obrázku javia hrubšie. Simulácia rôznej miery vlhkosti a tlaku prsta pri vytváraní odvodených odtlačkov je v generátore SFinGe realizovaná pomocou morfológických operátorov. Matematická morfológia sa využíva v spracovaní obrazu, je nástrojom pre skúmanie geometrických štruktúr v čierno-bielych obrazoch, takisto ako aj v obrazoch v odtieňoch sivej. V spracovaní binárnych obrazov sa používa dilatácia, ktorá kombinuje dve množiny s využitím vektorového sčítania prvkov množín. Dilatácia je definovaná ako $A \oplus B = \{r \mid r = a + b; \quad a \in A, \quad b \in B\}$ [16]. Erózia je morfológickou dvojicou dilatácie. Je definovaná ako $A \ominus B = \{r \mid r + b \in A, \quad \forall b \in B\}$ [16]. Erózia sa používa pri stenčovaní papilárnych línií, dilatácia sa používa pri rozširovaní papilárnych línií. Variabilita hrúbky papilárnych línií vzhľadom na použitie morfológických operátorov je znázornená na obrázku 4.2. [2] [14] [16]

V druhom kroku sa na hlavný odtlačok aplikuje nelineárne skreslenie, ktoré v obrázkoch odtlačkov prstov vzniká kvôli deformáciám pokožky pri rôznom priložení prsta na plochu skenera. Nelineárne skreslenie je na hlavný odtlačok aplikované s využitím Lagrangeovej interpolácie [2]. Interpolácia je prostriedkom pre aproximáciu funkcií. Na základe znalosti ľubovoľnej množiny bodov umožňuje vytvoriť polynóm, ktorý približne odpovedá funkcii popisujúcej študovaný jav. Lagrangeov tvar interpolačného polynómu je spôsob, akým je interpolačný polynóm možné skonštruovať. [2] [17]

Počas online získavania odtlačku prsta vplývajú na rušenie originálneho signálu viaceré faktory. Kvôli tomu je na výstupe nedokonalý obrázok v odtieňoch sivej s rôznymi porušeniami ako napríklad nepravidelnosť papilárnych línií, rozdielny kontakt papilárnych línií so senzorom, prítomnosť malých pórov vo vnútri papilárnych línií a iné. Zanášanie týchto nedokonalostí do obrázka je v generátore SFinGe realizované nasledovne – do osbitnej vrstvy sa izolujú biele pixely reprezentujúce medzery medzi papilárnymi líniami, pridá sa rušivý šum vo forme malých bielych škvŕn (výstup tejto operácie je znázorený na obrázku 4.3 vľavo), obrázok sa vyhladí oknom veľkosti 3×3 , získaný obrázok sa prekryje vrstvou uloženou v prvom kroku (finálny vzhľad odtlačku po aplikovaní všetkých operácií je znázorený na obrázku 4.3 vpravo). [2] [13]

V poslednom kroku sa na odtlačok aplikuje globálne otočenie a/alebo posun, ktoré má simulovať neperfektné umiestnenie prsta na plochu senzora [14].



Obr. 4.2: Rôzna hrúbka papilárnych línií jedného hlavného odtlačku, dosiahnutá použitím morfológických operátorov erózie alebo dilatácie. Čím sú papilárne línie tenšie, tým suchšia je pokožka prsta alebo menší tlak prsta na senzor. Naopak, so vzrastajúcou vlhkosťou alebo tlakom rastie aj šírka papilárnych línií. Obrázok bol prebraný a upravený z [13].



Obr. 4.3: Pridanie šumu do obrázka odtlačku prsta. Vľavo je znázornený stav po pridaní bielych škvŕniiek do obrázka odtlačku. Vpravo je finálny obrázok odtlačku so šumom po vyhladení a prekrytí uloženou vrstvou bielych pixelov, reprezentujúcich medzery medzi papilárnymi líniami. Obrázok bol prebraný z [13].

Po aplikovaní uvedených štyroch úprav je k dispozícii realistický obrázok odtlačku prsta s čistým bielym pozadím. Poslednou operáciou v obrázku je preto generovanie pozadia. Aby vygenerované pozadie čo najviac odpovedalo pozadiu, ktoré sa vyskytuje v obrázkoch pochádzajúcich z príslušného skenera, používa sa množina obrázkov pozadí (trénovacia množina) a matematická metóda založená na KL transformácii (Karhunen-Loève transformácii) [2]. KL transformácia je aplikácia stochastického integrálu, ktorá je veľmi užitočným teoretickým nástrojom v rôznorodých oblastiach teórie detekcie, rozoznávania vzorov alebo spracovania obrazu. [2] [14] [18]

Kapitola 5

Návrh metód pre generovanie prejavov falzifikátov

Obsahom tejto kapitoly je predstavenie návrhu metód pre generovanie špecifických prejavov falzifikátov do syntetického odtlačku prsta.

Odtlačok prsta z generátora SFinGe v sebe už obsahuje rôzne porušenia a šum, ktoré zapríčiňujú menšiu názornosť prejavov falzifikátov, generovaných v tejto práci. Z tohto dôvodu sú prejavy falzifikátov generované do neporušenej reprezentácie hlavného odtlačku (master fingerprint).

V hlavnom odtlačku je nutné najskôr prahovaním detegovať polohu papilárnych línií, na základe ktorej môže byť určená plocha odtlačku prsta. Prejavy falzifikátov sú potom generované podľa pozície voči hraniciam odtlačku.

Vo vnútri odtlačku môžu byť generované vzduchové bubliny, na hraniciach náhle ukončenie papilárnych línií a v okolí hraníc môže byť aplikovaný netradičný tvar falzifikátu vzhľadom na prirodzený tvar odtlačku prsta. Tri spomínané prejavy boli vybrané spomedzi artefaktov falzifikátov opísaných v kapitole 3.2. Prejavy môžu byť do odtlačku generované samostatne, ako aj v rôznych kombináciách s určitými obmedzeniami, ktoré zaručujú realistický vzhľad vytvoreného falzifikátu.

Je nutné poznamenať, že nakoľko hlavný odtlačok z generátora SFinGe neobsahuje postupne miznúce okraje papilárnych línií (ako to býva v pravých odtlačkoch prstov), ale náhle ukončené (ako to môže byť práve vo falzifikátoch), je potrebné implementovať postupné miznutie papilárnych línií namiesto náhleho ukončenia, aby bolo možné generovať odtlačky, ktoré obsahujú aj neobsahujú tento prejav falzifikátov.

5.1 Vzduchové bubliny

Prvým z vybraných prejavov falzifikátov sú vzduchové bubliny. V tejto kapitole je uvedený algoritmus generovania vzduchových bublín do obrázka syntetického odtlačku prsta. Vytvoreniu algoritmu predchádzala analýza tvaru, umiestnenia a veľkosti vzduchových bublín podľa obrázkov falzifikátov odtlačkov prstov. Výsledky analýzy sú zosumarizované v nasledujúcej podkapitole.

5.1.1 Analýza vzduchových bublín vyskytujúcich sa vo falzifikátoch

Ako už bolo uvedené v kapitolách 3.1 a 3.2, vo falzifikátoch odtlačkov prstov je pri určitých metódach výroby možné pozorovať vzduchové bubliny. Bubliny sú viditeľné v samotnom

falzifikáte, ako aj po nasnímaní falzifikátu skenerom. V obrázkoch takýchto falzifikátov sa potom javia ako prázdne miesta, ktoré majú odtieň približne rovnaký, ako je odtieň medzi papilárnymi líniami.

Z pozorovania obrázkov falzifikátov vzduchových bublín, z ktorých niektoré sú uvedené aj na obrázku 5.1, vyplýva, že bubliny sa vo falzifikátoch nachádzajú v rôznom počte, rozličných tvaroch a na rôznych miestach v rámci plochy odtlačku. Veľkosť bublín sa líši od úplne malých, ktoré môžu byť zameniteľné s medzerami medzi papilárnymi líniami, až po relatívne veľké bubliny, ktoré prekrývajú viac paralelných papilárnych línii v oblasti, kde sa bublina nachádza. Tvar bubliny väčšinou pripomína kruh alebo elipsu s rôznou mierou porušenia okraja. Závažnejšie porušenie tvaru bublín je častejšie viditeľné v menších bublinách, väčšie bubliny majú častokrát len mierne porušený okraj. Nie je jednoduché vymedziť interval s minimálnym a maximálnym počtom bublín, ktoré sa nachádzajú na odtlačkoch. Na základe obmedzenej databázy obrázkov falzifikátov sa dá len približne určiť, že najčastejšie sa v týchto falzifikátoch vyskytuje 9 - 15 bublín, z ktorých približne 12 % je veľkých, 33 % stredne veľkých a 55 % malých. Bubliny sú rozdelené na veľké, stredné a malé na základe vizuálneho porovnávania veľkostí bublín v rámci jedného odtlačku, pričom bublina je považovaná za veľkú, keď je jej priemer väčší ako približná šestina šírky odtlačku.

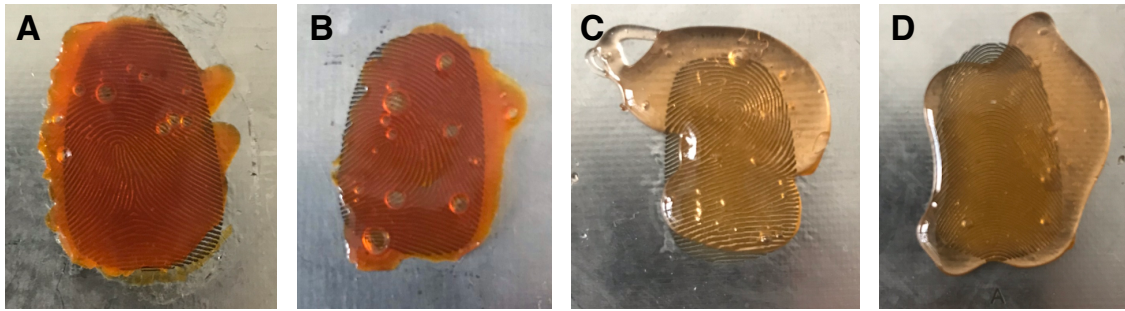


Obr. 5.1: Obrázky falzifikátov s prítomnými vzduchovými bublinami z databázy výskumnej skupiny STRaDe (Security Technology Research and Development), ktorá pôsobí na Vysokém učení technickém, Fakultě informačních technologií v Brne.

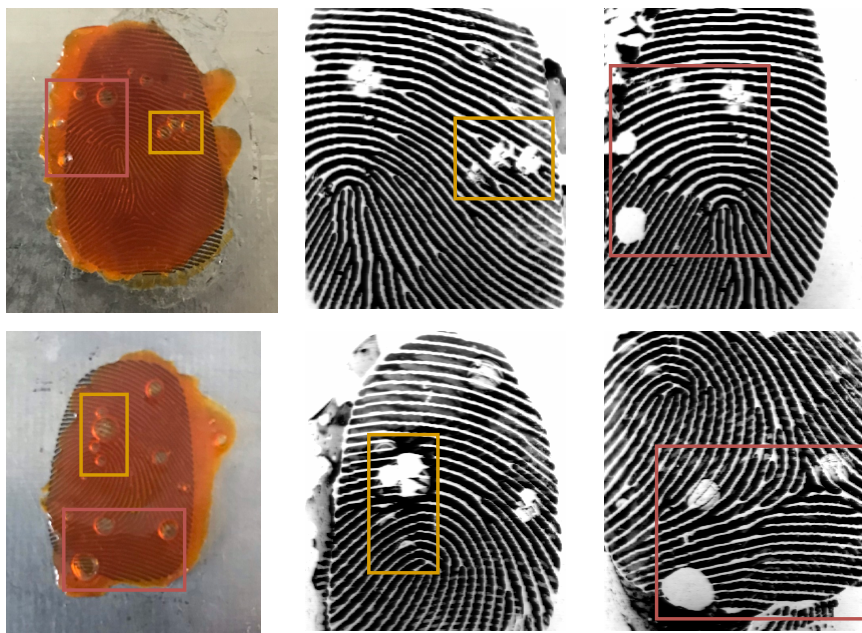
Pre potreby podrobnejšieho pozorovania boli počas analýzy vyrobené falzifikáty z materiálov, ktoré vykazujú vysoký výskyt vzduchových bublín. Jedná sa o farbu na sklo a gél na výrobu sviečok. Cieľom bolo vyrobiť falzifikáty s bublinami a následne pozorovať súvislosti medzi tvarom bublín vo falzifikáte a na obrázku vzniknutom po nasnímaní falzifikátu skenerom. Ďalším cieľom bolo vytvorenie falzifikátu, na ktorom sa bubliny tesne dotýkajú, a pozorovanie tohto javu po nasnímaní, či bubliny vytvoria jeden útvar, alebo budú naďalej od seba odlíšiteľné.

Niektoré z vyrobených falzifikátov sú zobrazené na obrázku 5.2. Na prvom a druhom obrázku zľava môžeme vo falzifikátoch vyrobených pomocou farby na sklo pozorovať aj bubliny, ktoré sú tesne vedľa seba. Na treťom a štvrtom obrázku zľava sú ukážky falzifikátov vyrobených z gélu na výrobu sviečok.

Nakoľko vo falzifikátoch vyrobených z gélu na výrobu sviečok po nasnímaní skenerom nie sú dobre viditeľné papilárne línie, na obrázku 5.3 je uvedené porovnanie vzhľadu vzduchových bublín na falzifikátoch z farby na sklo pred a po nasnímaní skenerom. Z týchto experimentov vyplynulo, že aj vzduchové bubliny, ktoré sú vo falzifikátoch blízko pri sebe, ostávajú po nasnímaní skenerom oddelené a nevytvoria jeden útvar. Tento jav je na obrázku 5.3 možné pozorovať porovnaním obrázkov v prvom a druhom stĺpci. Je ním ovplyvnený aj algoritmus, nie je v ňom možné vytvoriť bubliny, ktoré sa vo falzifikáte prekrývajú.



Obr. 5.2: Na obrázkoch A a B sa nachádzajú falzifikáty vyrobené pomocou farby na sklo, na obrázkoch C a D sú to falzifikáty vytvorené z gélu na výrobu sviečok.



Obr. 5.3: Porovnanie vzduchových bublín nachádzajúcich sa vo falzifikátoch a v obrázkoch po nasnímaní skenerom. Oblasti vyznačené štvoruholníkmi vo falzifikátoch na fotografiách (1. stĺpec) odpovedajú vyznačeným oblastiam na obrázkoch falzifikátov po nasnímaní skenerom (2. a 3. stĺpec).

5.1.2 Algoritmus pre generovanie vzduchových bublín do syntetických odtlačkov prstov

Vzhľadom na rozličnosť falzifikátov so vzduchovými bublinami je žiadúce prispôbiť algoritmus generovania tak, aby počet, umiestnenie a veľkosť bublín boli generované náhodne, v rozumne ohraničených intervaloch. Na druhej strane v určitých situáciách, napríklad pre potreby testovania, je potrebné prispôbovať vzhľad falzifikátu, a preto je metóda náhodného generovania bublín doplnená aj o možnosť zadania pozície, približnej veľkosti a počtu vzduchových bublín užívateľom.

Algoritmus pre náhodné generovanie vzduchových bublín:

1. Nájdi v obrázku papilárne línie,
2. vytvor pole `coordinates`, obsahujúce súradnice bodov, ktoré ležia na papilárnych líniách,
3. náhodne vygeneruj číslo z intervalu 9 - 15, reprezentujúce počet bublín,
4. podľa počtu bublín pre každú bublinu:
 - (a) vygeneruj index do poľa `coordinates`, bod uložený na tomto indexe bude stred bubliny,
 - (b) podľa pravdepodobnosti určenej percentuálnym výskytom rôznych veľkostí bublín vygeneruj polomer bubliny,
 - (c) skontroluj, či sa na základe pozície a veľkosti polomeru bublina neprekrýva s inou, ak nie, pokračuj, ak áno, vráť sa do bodu 4a
 - (d) doplň informácie potrebné pre definovanie tvaru bubliny a zapíš ich do poľa `render`,
5. pre všetky položky v poli `render`:
 - (a) vytvor čierny obrázok, podľa parametrov do neho vykresli bielu bublinu,
 - (b) ak je bublina malá alebo stredne veľká, poškod' jej okraje generovaním malých bielych kruhov na náhodné miesta na jej okrajoch,
 - (c) skopíruj bublinu do zdrojového obrázka,
 - (d) odstráň informácie o bubline z poľa `render`.

Algoritmus pre vykreslenie bublín zadaných užívateľom obsahuje len pár odlišností. Pri zadávaní polohy a polomeru bublín je potrebné kontrolovať veľkosť polomeru, umiestnenie stredu bubliny vo vnútri plochy odtlačku a potenciálne prekrytie s inou bublinou. Do vektora `render` sa uložia len pozície a veľkosti tých bublín, ktoré spĺňajú požiadavky. Následne je nutné podľa veľkosti polomeru zaradiť bublinu medzi malé, stredné alebo veľké a na základe toho doplniť informácie nutné pre vykreslenie. Posledný bod algoritmu, týkajúci sa vykreslenia bublín, je zhodný.

Výsledok požadovaný po aplikovaní algoritmu je názorne zobrazený na obrázku 5.4, kde sú okraje vzduchových bublín na prvom odtlačku zvýraznené modrou farbou pre lepšie odlíšenie ich rôznych veľkostí a tvarov.



Obr. 5.4: Názorná ukážka požadovaného výsledku po generovaní vzduchových bublín. Na prvom odtlačku majú bubliny pre lepšie znázornenie okraj zvýraznený modrou farbou.

5.2 Postupné miznutie papilárnych línií

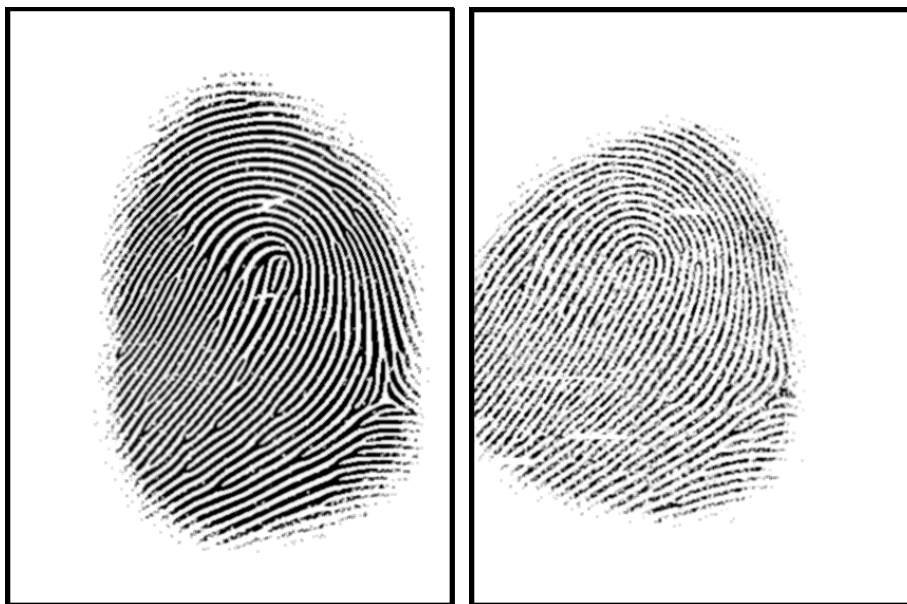
Ďalším z vybraných znakov falzifikátov je náhle ukončenie papilárnych línií. V reálnych odtlačkoch prstov miznú papilárne línie na okrajoch odtlačku postupne. V hlavnom odtlačku z generátora SFinGe (do ktorého sú prejavy falzifikátov generované), nie sú prítomné postupne miznúce okraje, čo naznačuje falzifikát. Z tohto dôvodu je namiesto náhleho ukončenia papilárnych línií potrebné navrhnuť algoritmus pre implementáciu postupného miznutia papilárnych línií, aby mohli byť generované odtlačky, ktoré obsahujú aj neobsahujú spomínaný prejav falzifikátov.

5.2.1 Analýza postupne miznúcich okrajov

Postupne miznúce okraje v odtlačkoch prstov boli pozorované na obrázkoch syntetických odtlačkov z generátora SFinGe. Dva príklady sú zobrazené na obrázku 5.5. Je na nich možné vidieť, že okraje papilárnych línií sa postupne vytrácajú na rôzne dlhých úsekoch a s rôznou intenzitou. Na prvom odtlačku zľava miznú okraje na dlhšom úseku a pozvoľnejšie ako na druhom odtlačku, kde možno pozorovať len veľmi krátky úsek, na ktorom sú okraje svetlejšie a oveľa viac porušené. V tomto prípade sa okraje strácajú takmer okamžite.

Prvý odtlačok na obrázku 5.5 sa nachádza v strede obrázka, miznúce okraje preto možno vidieť po celom jeho obvode. Druhý odtlačok by mal logicky pokračovať až za naznačeným ľavým okrajom obrázka, miznúce okraje preto v tejto oblasti nie sú viditeľné. Túto skutočnosť je potrebné zohľadniť aj pri návrhu algoritmu.

Analýzu postupne miznúcich okrajov je možné zhrnúť nasledovne – v oblasti v okolí hraníc plochy odtlačku prsta postupne smerom od stredu odtlačku bledne odtieň papilárnych línií, zužujú sa a zväčšuje sa ich porušenie. Táto oblasť má v rôznych odtlačkoch inú veľkosť a mení sa aj celková intenzita miznutia papilárnych línií.



Obr. 5.5: Syntetické odtlačky prstov z generátora SFinGe s rôznou veľkosťou oblasti, v ktorej sa postupne vytrácajú papilárne línie, a s odlišnou intenzitou miznutia papilárnych línií.

5.2.2 Návrh algoritmu pre aplikovanie postupne miznúcich okrajov

Pred aplikovaním algoritmu na odtlačok prsta užívateľ zadá intenzitu porušenia papilárnych línií (nízku, strednú alebo vysokú) a šírku oblasti od okraja odtlačku, v ktorej majú papilárne línie postupne miznúť (5 rôznych širok, najužšia – 15 pixelov, najširšia – 35 pixelov).

Algoritmus pre pridanie postupne miznúcich okrajov do syntetického odtlačku je nasledovný:

1. Aplikuj blednutie odtieňa na oblasť v okolí hraníc odtlačku so šírkou o polovicu menšou, ako je zvolená šírka oblasti s miznúcimi okrajmi,
2. poškod papilárne línie v oblasti v okolí hraníc nasledovným spôsobom:
 - (a) 3-krát:
 - i. zúž plochu odtlačku (maximálne o veľkosť zadanú užívateľom),
 - ii. v oblasti, o ktorú sa plocha odtlačku zúžila, nájdi okraje papilárnych línií (hrany medzi papilárnymi líniami a pozadím) a ulož body ležiace na nich do vektora `coordinates`,
 - iii. prejdi vektor `coordinates` a v každom jeho prvku s určitou pravdepodobnosťou vygeneruj malý biely útvar, čím sa postupne zúži papilárna línia,
 - iv. odstráň všetky prvky z vektora `coordinates`,
 - (b) v poslednej zúženej ploche nájdi všetky body ležiace na papilárnych líniách v tejto oblasti a ulož ich do vektora `coordinates`,
 - (c) prejdi vektor `coordinates` a v každom jeho prvku s určitou pravdepodobnosťou (na základe zvolenej intenzity miznutia) vygeneruj malý biely útvar, čím sa aplikuje ešte väčšie porušenie papilárnych línií,
 - (d) vyhlad' obrázok,
 - (e) prekry obrázok bielymi pixelmi z pôvodného obrázka,
3. ak odtlačok pretína okraje obrázka (logicky by mal pokračovať aj za hranicou obrázka), orež obrázok na príslušných stranách pre odstránenie efektu miznutia papilárnych línií.

V algoritme v bodoch 2a a 2c sú do obrázka odtlačku generované malé biele útvary. Rozhodnutie, o aké útvary sa jedná, závisí na výbere intenzity miznutia papilárnych línií. V prípade výberu nízkej intenzity miznutia sú so vzrastajúcimi pravdepodobnosťami pri každom zúžení plochy odtlačku generované biele pixely. Pri výbere strednej alebo vysokej intenzity miznutia sú pravdepodobnosti opäť rastúce s každým zúžením, celkovo sú nižšie ako v prípade nízkej intenzity a rovnaké pre strednú aj vysokú intenzitu. Menia sa len generované útvary, pri strednej intenzite sú to malé kruhy, pri vysokej o niečo väčšie elipsy. Požadovaný výsledok poškodenia okrajov papilárnych línií so vzrastajúcou intenzitou smerom zľava doprava je zobrazený na obrázku 5.6. Útvary generované pre vytvorenie porušenia sú pre lepšiu názornosť zobrazené modrou farbou.

Blednutie odtieňa na okrajoch odtlačku (z prvého kroku algoritmu) je dosiahnuté opakovaním váhovaného súčtu dvoch matíc so zvyšujúcim sa koeficientom. Váhovaný súčet je vyjadrený ako

$$dst = src.\alpha + mask.\beta, \quad (5.1)$$

kde dst je matica reprezentujúca obrázok vzniknutý po váhovanom súčte, src je matica obsahujúca obrázok syntetického odtlačku prsta, $mask$ je matica s maskou oblasti, o ktorú bola zúžená plocha odtlačku, α a β sú konštanty.

Pre dosiahnutie blednutia odtieňa je päťkrát zúžená plocha odtlačku, po každom zúžení je vytvorená čierno-biela reprezentácia, maska oblasti, o ktorú bola plocha zúžená. Biela farba v tejto maske reprezentuje zúženie plochy, čierna farba tvorí pozadie a aktuálnu plochu odtlačku. Okrem toho je zvýšený koeficient β , ktorého základ tvorí pri nízkej intenzite miznutia konštanta 0,02, pri strednej 0,03 a pri vysokej 0,05. Tento základ sa násobí hodnotou riadiacej premennej cyklu (1 - 5). Koeficient $\alpha = 1$ je nemenný.

Aplikovaním váhovaného súčtu matíc po každom zúžení plochy sa v obrázku dosiahne lineárne blednutie odtieňa papilárnych línií v oblasti pri okrajoch odtlačku. Požadovaný výsledok tejto operácie je zobrazený na obrázku 5.7, kde sú zväčšené výrezy odtlačkov prstov. Úplne vľavo je výrez z odtlačku bez aplikovania blednutia odtieňa, smerom doprava sú zobrazené výrezy odtlačkov s blednutím pri nízkej, strednej a vysokej intenzite miznutia papilárnych línií, čím sa zvyšuje aj intenzita blednutia odtieňa.



Obr. 5.6: Poškodenie okrajov papilárnych línií požadované ako výsledok navrhnutého algoritmu. Úplne vľavo je výrez z odtlačku bez poškodenia okrajov papilárnych línií. Nasledujú výrezy z rovnakého odtlačku po aplikovaní poškodenia okrajov s rôznou intenzitou, narastajúcou smerom doprava. Útvary generované pre dosiahnutie poškodenia sú na obrázku kvôli lepšej názornosti zobrazené modrou farbou.



Obr. 5.7: Blednutie odtieňa na okrajoch odtlačkov prstov požadované ako výsledok navrhnutého algoritmu. Úplne vľavo je výrez z odtlačku prsta bez blednutia odtieňa na okraji, smerom doprava sú výrezy z rovnakého odtlačku po aplikovaní blednutia so zvyšujúcou sa intenzitou.

5.3 Celkový tvar odtlačku

Posledným z vybraných prejavov falzifikátov je neprirodzený celkový tvar odtlačku prsta. V nasledujúcich podkapitolách je opísaná analýza tvarov falzifikátov a na jej základe vytvorený algoritmus pre aplikovanie tohto znaku falzifikátov do syntetického odtlačku prsta.

5.3.1 Analýza falzifikátov s neprirodzeným celkovým tvarom

Pri použití niektorých materiálov a metód na výrobu falzifikátov je náročné zachovať prirodzený tvar odtlačku. Na obrázku 5.2, na ktorom sa nachádzajú fotografie falzifikátov vytvorených počas analýzy vzduchových bublín, možno tiež pozorovať neprirodzený tvar falzifikátov. Aj keď na podložke bol znázornený prirodzený tvar odtlačku prsta, liatie roztopeného gélu na výrobu sviečok alebo aplikovanie farby na sklo neumožnili tento tvar zachovať. Vznikol falzifikát s rôznymi bočnými výčnelkami a celkovo iným tvarom. Keď je pre výrobu falzifikátu dostupný len latentný odtlačok, prirodzený tvar odtlačku, ktorý by sa dal napodobniť, ani len nie je k dispozícii. Ďalším dôvodom vzniku takéhoto tvaru môže byť aj orezanie alebo odstrihnutie častí falzifikátu, aby ho bolo možné umiestniť na plochu skenera. Počas výroby sa tvar môže deformovať aj inými činnosťami. Napríklad vytvorenie príliš tenkého falzifikátu z farby na sklo viedlo pri odlepovaní zaschnutej farby k pozdĺžnemu natiahnutiu falzifikátu a vytvoril sa tak tvar veľmi predĺženej elipsy, aj keď pôvodný falzifikát mal približne zachovaný prirodzený tvar.

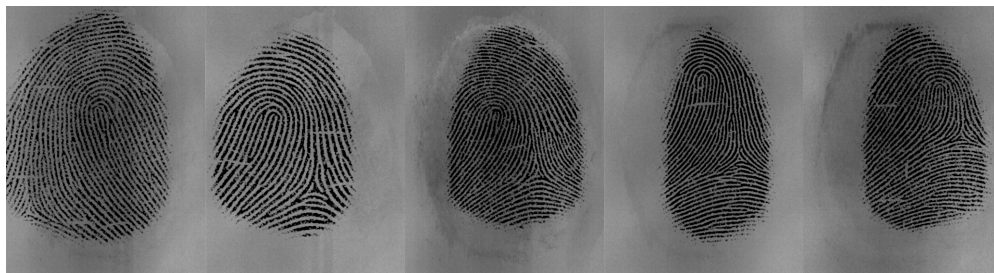
Z uvedeného vyplýva, že počas výroby falzifikátov na celkový tvar odtlačku vplyvajú viaceré faktory. Okrem vytvorenia vlastných falzifikátov bol ich tvar pozorovaný aj v databáze výskumnej skupiny STRaDe. Niekoľko falzifikátov s neprirodzeným tvarom z nej je uvedených na obrázku 5.8.



Obr. 5.8: Rôzne tvary falzifikátov z databázy výskumnej skupiny STRaDe. Na obrázkoch sú prítomné príliš rovné okraje, konkávny tvar falzifikátov, falzifikáty pripomínajúce obdĺžnikové alebo lichobežníkové útvary.

Na falzifikáte A, zobrazenom na obrázku 5.8, môžeme pozorovať príliš rovné okraje, ako aj vrchnú časť falzifikátu pripomínajúcu trojuholník. Tieto okraje mohli vzniknúť napríklad orezaním falzifikátu. Tvar falzifikátu B je konkávny, pričom tri jeho strany pripomínajú tri strany obdĺžnika a štvrtá strana je preličená dovnútra, čo pri prirodzenom odtlačení prsta nenastáva. Falzifikát C má tvar predĺženej ohnutej elipsy. Vďaka viditeľným papilárnym líniam sa dá usúdiť, že ide len o výrez z pôvodného odtlačku. Tvar falzifikátu D pripomína skôr porušený obdĺžnik ako elipsovitý tvar reálnych odtlačkov prstov. Falzifikát E má tvar lichobežníka s príliš rovnými hranami.

Na obrázku 5.9 sú pre porovnanie uvedené tvary syntetických odtlačkov prstov z generátora SFinGe, ktoré simulujú tvary reálnych odtlačkov. Tieto tvary by sa dali prirovnať k elipse alebo k oválu. Ako bolo uvedené v kapitole 4.2, generátor SFinGe ich vytvára zložením štyroch eliptických segmentov. Žiaden z tvarov neobsahuje rovné hrany, všetky majú na rozdiel od falzifikátov konvexný tvar.



Obr. 5.9: Tvary syntetických odtlačkov prstov z generátora SFinGe, simulujúce tvary reálnych odtlačkov.

5.3.2 Algoritmus pre aplikovanie neprirodzeného tvaru na syntetický odtlačok prsta

Pred aplikovaním algoritmu je nutné z obrázkov falzifikátov extrahovať ich tvar do formy čierno-bielej masky, ktorá môže slúžiť na orezanie odtlačku prsta. Z databázy falzifikátov bolo vybraných 40 obrázkov obsahujúcich falzifikáty s rôznymi tvarmi. Na obrázku 5.10 je schematicky znázornený postup vytvorenia masky. Najskôr je pomocou prahovania vytvorená čierno-biela reprezentácia papilárnych línií, kde biela farba reprezentuje papilárne línie a čierna farba pozadie. Následne je riadkovým alebo stĺpcovým vyplňaním (pre zachovanie potenciálne konkávneho tvaru) vytvorená maska tvaru falzifikátu. Maska je po vyhladení hrán pripravená na orezanie odtlačku prsta, čím sa jeho tvar zmení na neprirodzený.

Na obrázku 5.10 je maska po vyhladení zobrazená s cieľom znázornenia celého procesu transformácie obrázku falzifikátu na tvar vhodný pre orezávanie. Vyhladenie je v algoritme použité až po vybraní masky, ktorou sa bude orezávať, z dôvodu presnejšej detekcie ohraňovania masky pri použití jej nevyhladenej podoby.



Obr. 5.10: Postup získania masky tvaru falzifikátu, vhodnej pre orezanie syntetického odtlačku prsta. Najskôr sú prahovaním detegované papilárne línie. Následne je riadkovým vyplňaním vytvorená čierno-biela reprezentácia tvaru falzifikátu. Nakoniec je maska vyhladená pre zjemnenie okrajov, aby mohla byť použitá pri orezaní.

Samotný algoritmus pre aplikovanie neprirodzeného tvaru falzifikátu je nasledovný:

1. Nastav index vybranej masky na -1,
2. načítaj masky z predpripravených obrázkov,
3. pre každú načítanú masku:
 - (a) nájdi štvoruholník, ktorý ju ohraničuje z každej strany (opísaný štvoruholník),
 - (b) nájdi stred opísaného štvoruholníka,

- (c) vypočítaj obsah opísaného štvoruholníka,
4. vypočítaj priemerný obsah masiek a podľa jeho hodnoty rozdeľ masky na masky s menším obsahom, ako je priemerný obsah, a masky s väčším obsahom, ako je priemerný obsah,
 5. nájdi ohraničujúci štvoruholník pre odtlačok na orezanie, urč jeho stred a vypočítaj obsah,
 6. podľa módu spustenia vyber index masky, ktorou sa bude orezávať,
 7. posuň masku tak, aby sa jej stred prekrýval so stredom odtlačku na orezanie,
 8. vyhlad masku,
 9. vypočítaj priemerný odtieň pixelov v maske po vyhladení,
 10. vytvor obrázok, do ktorého skopíruj hodnoty pixelov zo zdrojového obrázka v miestach, kde je hodnota pixelov masky svetlejšia ako priemerná hodnota pixelov masky, do ostatných pixelov priraď bielu farbu.

V algoritme v bodoch 3 a 5 sa počíta obsah štvoruholníkov ohraničujúcich masku tvaru falzifikátu a odtlačok prsta na orezanie. Tvar odtlačku prsta by mohol byť aproximovaný elipsou a jeho obsah počítaný ako obsah elipsy. Rôzne tvary falzifikátov nie je možné aproximovať jedným útvarom. Kvôli zachovaniu jednotnosti je preto v algoritme v obidvoch prípadoch počítaný obsah ohraničujúceho štvoruholníka a pri porovnávaní veľkosti tvarov je použitá veľkosť obsahov týchto opísaných štvoruholníkov.

V bode 6 sa vyberá index masky na orezanie podľa módu spustenia. Ak je vybraný mód orezania náhodnou maskou, vygenerovaním náhodného čísla sa vyberie maska, ktorej obsah je menší ako obsah orezávaného odtlačku. Ak je obsah orezávaného odtlačku väčší ako priemerný obsah masiek, prioritne sa vyberá z masiek, ktorých obsah bol v bode 4 označený ako väčší, ako je priemerný obsah masiek. V móde výberu masky užívateľom sa maska na orezanie vyberie inkrementovaním indexu naposledy použitej masky. Po orezaní a zobrazení výsledku užívateľ môže potvrdiť výber, potom algoritmus končí. Ak užívateľ výber nepotvrdí, algoritmus sa vráti do bodu 6.

Výsledok požadovaný po aplikovaní algoritmu je zobrazený na obrázku 5.11. Vľavo je pôvodný obrázok odtlačku prsta, na nasledujúcich dvoch obrázkoch je rovnaký odtlačok po orezaní dvoma rôznymi maskami.



Obr. 5.11: Ukážka výsledkov požadovaných po použití algoritmu pre aplikovanie neprirodzeného tvaru odtlačku. Vľavo je pôvodný odtlačok, nasledujú dva obrázky rovnakého odtlačku, ktoré boli orezané rôznymi maskami.

Kapitola 6

Implementácia navrhnutých metód a dosiahnuté výsledky

V tejto kapitole je opísaná implementácia metód navrhnutých v kapitole 5. V nasledujúcej podkapitole 6.1 je uvedený výber prostredia a jazyka pre implementáciu, v ďalších podkapitolách sú podrobnejšie opísané metódy implementované pre generovanie prejavov falzifikátov.

Pri implementácii aplikácie bol využitý objektovo orientovaný prístup. Navrhnutá a následne implementovaná bola trieda `SpoofGenerator`, ktorá pozostáva z metód využívaných pri spracovaní odtlačku nezávisle na generovanom prejave falzifikátu. Viac informácií o tejto triede je uvedených v kapitole 6.2. Z tejto hlavnej triedy dedia ostatné triedy, obsahujúce navyše metódy pre generovanie konkrétnych prejavov falzifikátov. Prvou z nich je trieda `AirBubbles`, zahŕňajúca špeciálne metódy pre generovanie vzduchových bublín, ktoré sú opísané v kapitole 6.3. Ďalšou triedou je `DisappearingEdges`, využívaná pre pridanie miznúcich okrajov do odtlačku, podrobnejšie je opísaná v kapitole 6.4. Poslednou z týchto tried je `FingerprintShape`, ktorá obsahuje metódy potrebné pri orezaní odtlačku do nepravidelného tvaru. Opis jej metód sa nachádza v kapitole 6.5. Diagram tried je zobrazený na obrázku 6.1.

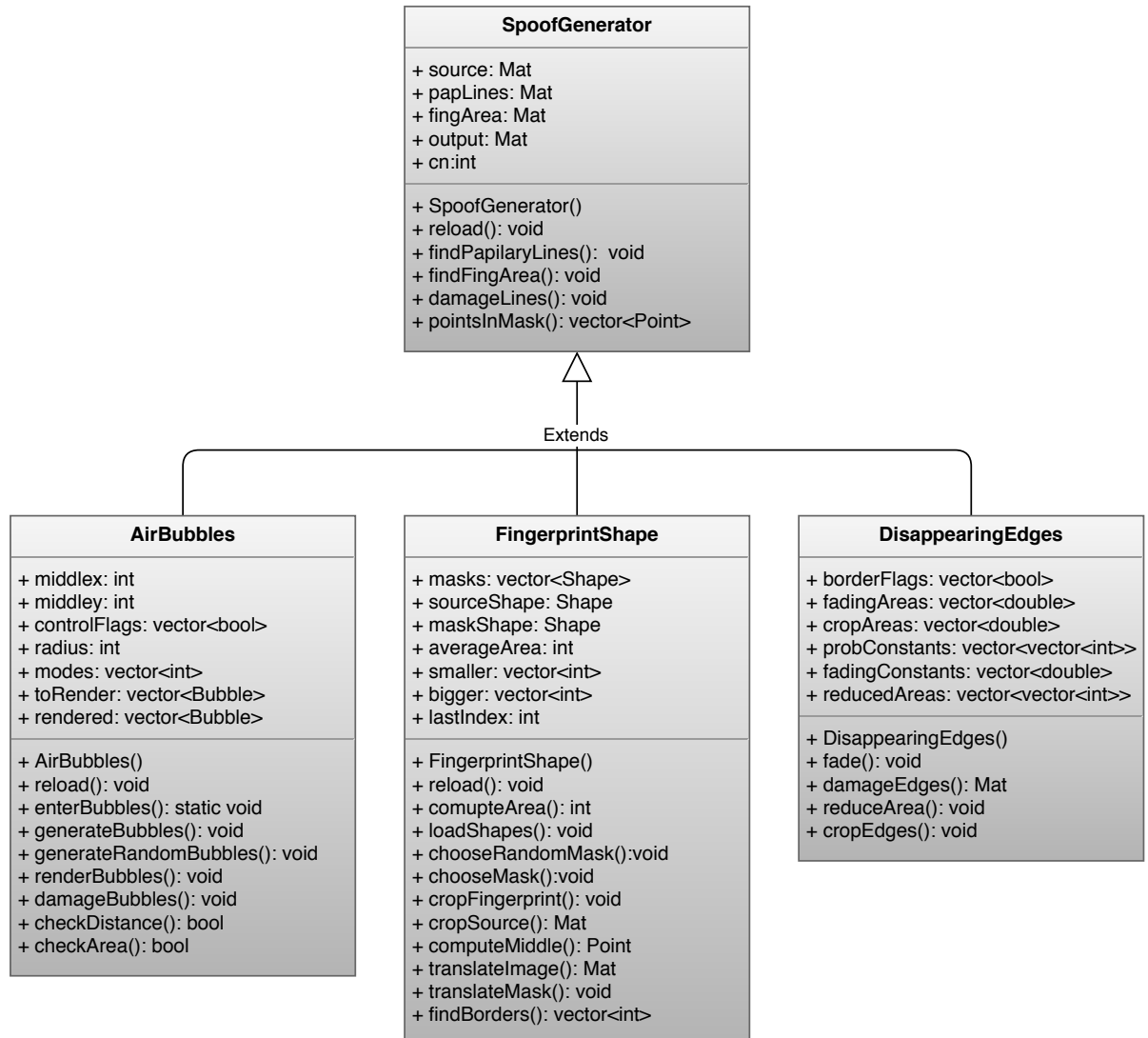
Vstupným bodom programu je súbor `main.cpp`, v ktorom sú po spustení vytvorené instance všetkých tried používaných v programe, aby bolo možné generovať ktorýkoľvek prejav falzifikátov. Následne sa v nekonečnom cykle čaká na stlačenie klávesu. Na základe stlačeného klávesu začne generovanie príslušného prejavu falzifikátu do obrázka syntetického odtlačku. Generovanie všetkých implementovaných prejavov môže byť v istej miere parametrizované užívateľom, okrem toho generovanie bublín a neprirodzeného tvaru funguje aj v móde náhodného generovania. Keď je užívateľ s vizualizáciou prejavu spokojný, uloží zmeny a prípadné ďalšie generované prejavy sú už aplikované do zmeneného odtlačku. Každý prejav môže byť generovaný len raz, čiže po aplikovaní všetkých troch prejavov sa program automaticky ukončí a vytvorený falzifikát je uložený do súboru, ktorý je zadaný užívateľom ako druhý argument pri spustení programu. Informácie o možnom kombinovaní implementovaných prejavov falzifikátov sú uvedené v kapitole 6.6.

6.1 Výber implementačných prostriedkov

Simulácia prejavov falzifikátov je implementovaná ako konzolová aplikácia, ktorá spracováva vstupný obrázok (syntetický odtlačok prsta z generátora SFinGe) a produkuje výsledný ob-

rázok, do ktorého môžu byť vygenerované rôzne kombinácie troch implementovaných prejavov falzifikátov. V prípade, že generovanie znakov falzifikátov nie je náhodné, ale ovplyvnené užívateľom, užívateľ zadáva parametre pomocou špeciálne vybraných klávesov a myši.

Aplikácia je implementovaná v jazyku C++ s využitím knižnice OpenCV vo verzii 3.4.3. Knižnica je využívaná pri grafických operáciách spracovania obrazu, ako napríklad vyhladenie, orezanie, vykresľovanie dvojrozmerných útvarov. Aplikácia bola vyvíjaná vo frameworku VisualStudio17 na platforme Windows10.



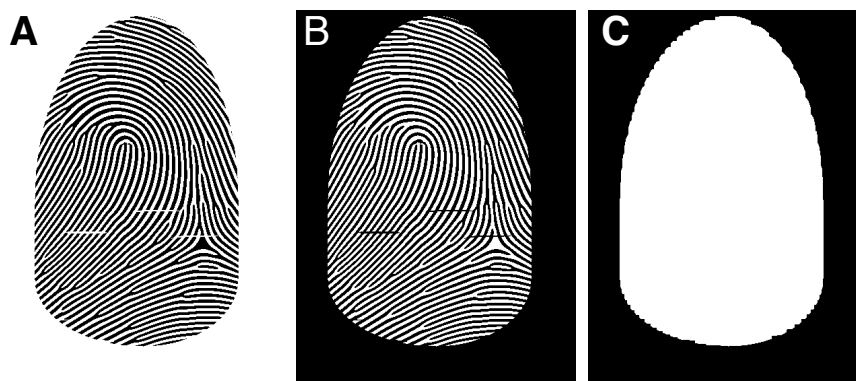
Obr. 6.1: Diagram tried aplikácie.

6.2 SpoofGenerator

Trieda `SpoofGenerator` obsahuje metódy, ktoré sa používajú pri generovaní všetkých troch implementovaných prejavov falzifikátov. Slúžia všeobecne pre spracovanie obrázka odtlačku prsta.

V konštruktoze tejto triedy sa načíta obrázok syntetického odtlačku zo súboru, ktorý je zadaný ako prvý parameter pri spustení programu. Ihneď po načítaní obrázka sa deteguje, kde sa na ňom nachádzajú papilárne línie. Slúži na to metóda `findPapillaryLines()`, ktorá dostane obrázok syntetického odtlačku a priemernú hodnotu pixelov v obrázku (táto hodnota je zistená metódou `mean()` z knižnice OpenCV). Pomocou prahovania, v ktorom je hodnota prahu rovná polovici priemernej hodnoty pixelov vo vstupnom obrázku, je vytvorená čierno-biela maska, reprezentujúca papilárne línie. Pixely ležiace v zdrojovom obrázku na papilárnych líniach sú v maske biele, ostatné pixely sú čierne.

Na základe vytvorenej reprezentácie papilárnych línií je zostrojená maska plochy, na ktorej leží odtlačok. V metóde `findFingArea()` sa pomocou riadkového a stĺpcového vyplňania prefarbia pixely medzi papilárnymi líniami nabiele. Pozadie opäť reprezentujú čierne pixely. Výsledky jednotlivých medzikrokov spracovania vstupného obrázka sú znázornené na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Výsledky medzikrokov počas spracovania zdrojového obrázka:

A – Hlavný odtlačok z generátora SFinGe,

B – reprezentácia papilárnych línií získaná z hlavného odtlačku pomocou prahovania,

C – reprezentácia plochy odtlačku získaná riadkovým a stĺpcovým vyplňaním masky papilárnych línií.

Do triedy `SpoofGenerator` patrí aj metóda `damageLines()`, ktorá do hlavného odtlačku vygeneruje na náhodné miesta ležiace na hraniciach papilárnych línií malé biele elipsy. Tým sú porušené okraje papilárnych línií, ktoré sú v hlavnom odtlačku plynulé. Porušenie papilárnych línií nie je veľké, aby v dôsledku neho nezaniikli generované prejavy falzifikátov. Výsledok po aplikovaní tejto metódy a porovnanie s poškodením papilárnych línií v syntetickom odtlačku z generátora SFinGe je zobrazené na obrázku 6.3.

Okrem spomínaných metód do tejto triedy patrí aj pomocná metóda `pointsInMask()`, ktorej úlohou je naplniť vektor súradnicami bielych bodov na maske. Poslednou metódou je `reload()`, ktorá slúži pre opätovné načítanie zdrojového obrázka a informácií o ňom počas behu programu.



Obr. 6.3: Porovnanie pridania mierneho poškodenia papilárnych línií do hlavného odtlačku:
 D – Hlavný odtlačok z generátora SFinGe s plynulými papilárnymi líniami,
 E – výsledok metódy `damageLines()`,
 F – syntetický odtlačok prsta z generátora SFinGe.

6.3 AirBubbles

Trieda `AirBubbles` obsahuje špeciálne metódy pre generovanie grafickej reprezentácie vzduchových bublín do syntetického odtlačku. V aplikácii je možné vygenerovať bubliny v dvoch módoch – cielene, keď sú veľkosť a umiestnenie bublín zadané užívateľom, alebo náhodne, keď sú tieto údaje určené pomocou generátora náhodných čísel. Užívateľský vstup je realizovaný pomocou myši a spracovaný v metóde `enterBubbles()`, ktorá pomocou metódy `checkArea()` kontroluje, či je stred vzduchovej bubliny umiestnený v ploche odtlačku.

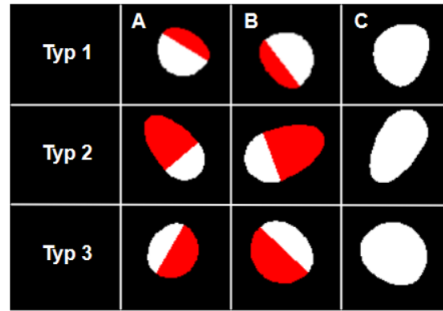
Metóda `checkDistance()` je pri spracovaní užívateľského vstupu aj pri generovaní súradníc stredov bublín využívaná pre kontrolu prípadného prekrytia. Vzďialenosť stredov bublín musí byť väčšia ako súčet ich polomerov, inak užívateľovi nie je umožnené bublinu zadať alebo sú vygenerované nové súradnice stredu. Vzďialenosť stredov je počítaná pomocou rovnice

$$|S_1S_2| = \sqrt{(x_{S_2} - x_{S_1})^2 + (y_{S_2} - y_{S_1})^2}, \quad (6.1)$$

kde S_1 a S_2 sú stredy dvoch kontrolovaných bublín. Posledný údaj, kontrolovaný pri zadávaní užívateľského vstupu, je veľkosť polomeru bublín, maximálny povolený polomer je 30 pixelov.

Vzduchové bubliny sú graficky reprezentované ako biele kruhy alebo elipsy, pričom elipsy môžu byť jednoduché alebo zložené z dvoch eliptických segmentov. Celkovo je naimplementované generovanie piatich typov bublín, ktoré ešte môžu byť rôzne otočené a porušené. Pre lepšiu ilustráciu sú na obrázku 6.4 zobrazené tri rôzne typy bublín, ktoré sú zložené z dvoch eliptických segmentov s rôznymi polermi. V stĺpcoch A a B sú eliptické segmenty rozlíšené bielou a červenou farbou. V stĺpci C je tvar v takom formáte, v akom je dosadený do syntetického odtlačku. Okrem týchto typov môže byť bublina zobrazená ako kruh alebo klasická elipsa.

Typ je každej bubline priradený v metódach `generateRandomBubbles()` alebo `generateBubbles()`. Okrem toho sú v týchto metódach vypočítané alebo vygenerované ostatné informácie potrebné pre vykreslenie konkrétneho typu bubliny a uložené do vektora `toRender`. Vykreslenie všetkých bublín prebieha naraz v metóde `renderBubbles()`, v ktorej sa vy-



Obr. 6.4: Typy generovaných bublín zložené z dvoch eliptických segmentov. V stĺpcoch A a B sú jednotlivé segmenty vo vygenerovaných tvaroch farebne odlišené. V stĺpci C sú obidva segmenty biele, je tak vytvorený tvar vzduchovej bubliny, aký je doplnený do syntetického odtlačku.

kreslia všetky bubliny uložené vo vektore `toRender`. Keď je bublina vykreslená, informácie o nej sa presunú do vektora `rendered`. Ak vektor `rendered` nie je prázdny, vykreslia sa aj bubliny uložené v ňom. Ukladaním už vygenerovaných bublín je umožnené kombinovať náhodné generovanie a generovanie podmienené užívateľom.

V prípade, že je vykresľovaná stredná alebo veľká bublina, metóda `damageBubble()` vygeneruje na náhodné miesta v obrysoch bubliny malé čierne kruhy, čím poškodí jej plynulý okraj (podobne ako pri porušovaní papilárnych línií v hlavnom odtlačku).

Výsledky aplikovania opísaných metód sú zobrazené na obrázku 6.5. V hornej časti sú znázornené obrázky falzifikátov z databázy výskumnej skupiny STRaDe a obrázky získané počas výroby falzifikátov za účelom návrhu metód. V spodnej časti sú obrázky vytvorené v programe.



Obr. 6.5: Obrázky falzifikátov so vzduchovými bublinami v hornej časti obrázka a syntetické odtlačky s vygenerovanými vzduchovými bublinami v spodnej časti.

6.4 DisappearingEdges

Trieda `DisappearingEdges` obsahuje metódy implementujúce postupné miznutie papilárnych línií. V aplikácii je možné vybrať si z piatich možných širok, na ktoré sa postupné miznutie papilárnych línií aplikuje. Taktiež je možné zvoliť intenzitu miznutia - nízku, strednú alebo vysokú.

Po výbere šírky a intenzity je do určenej oblasti v okolí hraníc odtlačku aplikované lineárne blednutie odtieňa. V metóde `fade()` sa s využitím metódy `reduceArea()` päťkrát zúži oblasť plochy odtlačku. Pri každom zúžení je vytvorená maska oblasti, o ktorú sa zúžila (táto oblasť je biela, zvyšok obrázka je čierny). Pomocou váhovaného súčtu matíc, ktoré reprezentujú túto masku a zdrojový obrázok, sa odtieň v danej oblasti o niečo zosvetlí. Výsledkom je lineárne sa zosilňujúce blednutie odtieňa smerom zo stredu odtlačku k jeho okrajom. Blednutie odtieňa je ovplyvnené zvolenou intenzitou miznutia papilárnych línií, pri najvyššej zvolenej intenzite je váha masky vo váhovanom súčte matíc najvyššia, pri najnižšej zvolenej intenzite je najnižšia.

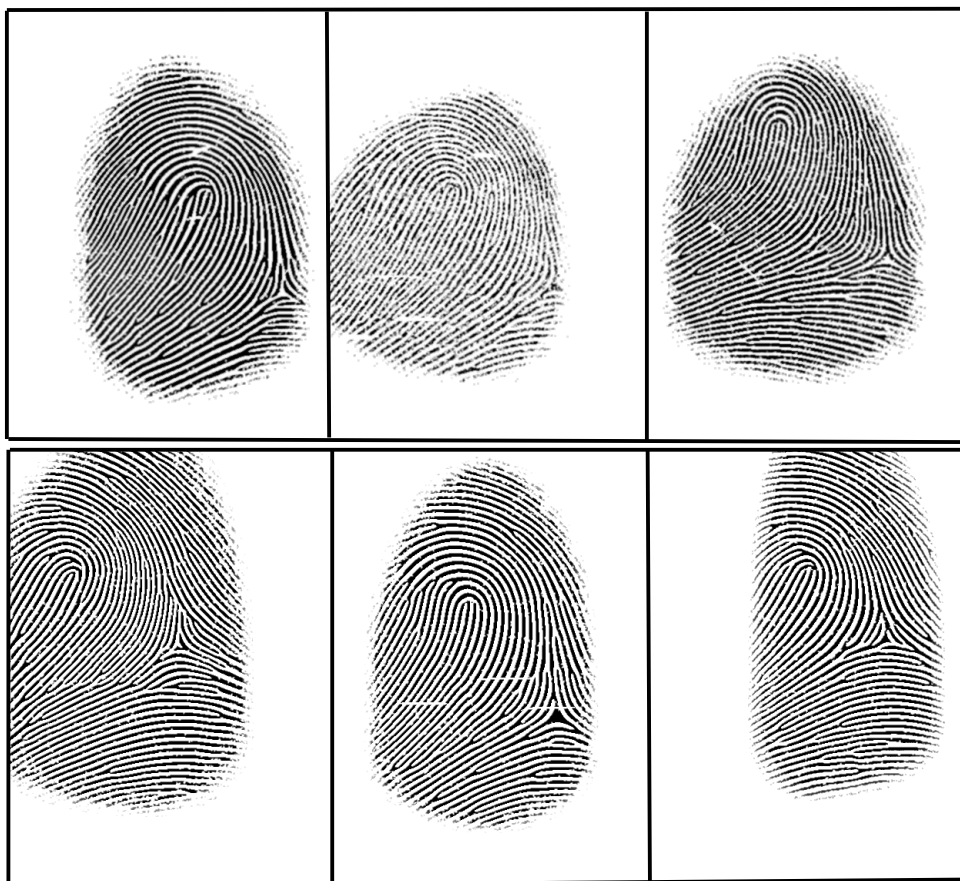
Následne je v metóde `damageEdges()` do určenej oblasti vygenerované porušenie papilárnych línií. Podľa zvolenej intenzity miznutia sa s určitou pravdepodobnosťou do bodov ležiacich na obrysoch papilárnych línií generujú biele pixely, malé biele kruhy alebo elipsy. Okrem toho sa pri úplných okrajoch odtlačku tieto útvary generujú aj do bodov ležiacich na papilárnych líniách, nielen na ich okrajoch. Postupné blednutie odtieňa skombinované s poškodením papilárnych línií na okrajoch odtlačku, je zobrazené na obrázku 6.6.



Obr. 6.6: Výrezy odtlačku prsta po aplikovaní blednutia odtieňa a poškodenia papilárnych línií v okolí okrajov odtlačku. Úplne vľavo je syntetický odtlačok bez postupne miznúcich papilárnych línií. Nasledujú výrezy z rovnakého odtlačku s vygenerovanými miznúcimi okrajmi s rôznou intenzitou, ktorá sa zvyšuje smerom doprava.

V prípade, že odtlačok na vstupnom obrázku pretína okraje obrázka (logicky by mal pokračovať za hranicami obrázka), v oblasti prieniku nemôže byť aplikované postupné miznutie papilárnych línií. V metóde `cropEdges()` sa odtlačok posunie o zvolenú šírku miznutia okrajov do strán, na ktorých pretína okraje. Tým sa docieli rovné ukončenie papilárnych línií v oblastiach, kde odtlačok pretína okraje, a zároveň realisticky vyzerajúce miznutie papilárnych línií na miestach, kde prienik odtlačku s hranicou obrázka končí.

Výsledky aplikovania metód pre generovanie postupne miznúcich okrajov sú zobrazené na obrázku 6.7 v spodnom riadku. V jednotlivých odtlačkoch je generované postupné miznutie s rôznymi intenzitami a na rôznej šírke. Vo vrchnom riadku sú pre porovnanie uvedené syntetické odtlačky z generátora `SFinGe`, v ktorých je možné taktiež pozorovať rôznu intenzitu a šírku miznutia papilárnych línií. Hranice obrázkov sú naznačené čiernou čiarou pre lepšiu názornosť situácií, keď odtlačky pretínajú hranice obrázka.



Obr. 6.7: Horný riadok – obrázky syntetických odtlačkov prstov z generátora SFinGe s postupne miznúcimi okrajmi. Spodný riadok – postupne miznúce okraje pridané aplikovaním metód z triedy `DisappearingEdges` do hlavného odtlačku z generátora SFinGe.

6.5 FingerprintShape

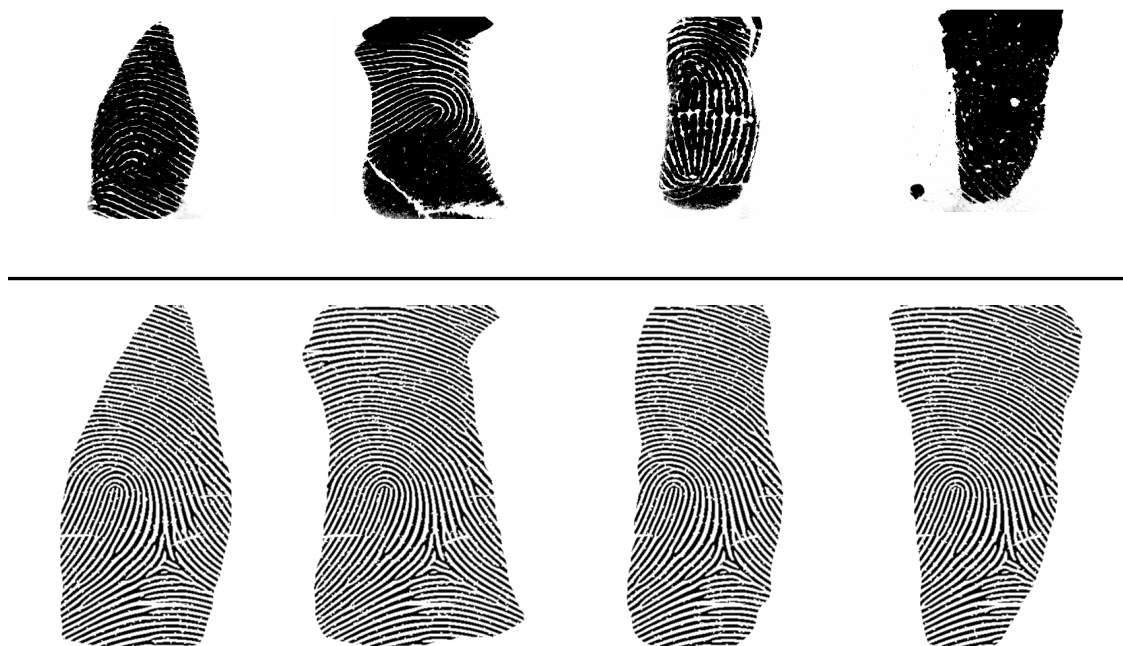
Trieda `FingerprintShape` obsahuje metódy, ktorými sa aplikuje neprirodzený celkový tvar na syntetický odtlačok. Jednou z najdôležitejších metód je `loadShapes()`, v ktorej sú načítané masky neprirodzených tvarov falzifikátov. Masky musia byť dopredu vytvorené z obrázkov skutočných falzifikátov podobným spôsobom, akým je spracovaný odtlačok pred aplikovaním prejavov falzifikátov. Tento spôsob je opísaný v kapitole 6.2. Jediný rozdiel je vo vyplňaní medzier medzi papilárnymi líniami pre vytvorenie masky plochy odtlačku, kde je použité len samostatné riadkové alebo stĺpcové vyplňanie, pokiaľ je tvar odtlačku konkávny. Po tomto spracovaní je maska ešte vyhladená (pomocou metódy `blur()` z knižnice `OpenCV`) oknom s veľkosťou 12×12 pixelov kvôli rozmazaniu jej ostrých hrán.

Okrem načítania tvarov sú v metóde `loadShapes()` doplnené informácie o daných tvaroch, potrebné pre ďalšie spracovanie. Pomocou metódy `findBorders()` sa nájdu štyri priamky, ktoré pre masku tvaru vytvárajú ohraničujúci štvoruholník. Následne je v metóde `computeMiddle()` nájdený jeho stred, ktorý je považovaný aj za stred tvaru, a v metóde `computeArea()` je vypočítaný obsah nájdeného opísaného štvoruholníka. Po načítaní všetkých masiek sa vypočíta priemerný obsah opísaných štvoruholníkov a masky sa roztriedia

na tie, v ktorých je obsah opísaného štvoruholníka menší ako priemerný obsah, a na tie, v ktorých je obsah väčší ako priemerný.

Ak má byť tvar, ktorým sa oreže syntetický odtlačok, vybraný náhodne, vyberie sa v metóde `chooseRandomMask()`. Nájde sa ohraničujúci štvoruholník odtlačku na orezanie, taktiež sa vypočíta jeho stred a obsah. Ak je obsah väčší ako priemerný obsah tvarov falzifikátov, s väčšou pravdepodobnosťou sa tvar vyberie z tvarov, v ktorých je obsah tiež väčší ako priemerný. Tvar na orezanie môže zvoliť aj užívateľ, v tom prípade je zavolaná metóda `chooseMask()`, kde sú postupne zobrazené orezania všetkými tvarmi, v ktorých je obsah opísaného štvoruholníka menší ako obsah orezávaného odtlačku.

Po výbere tvaru sa jeho maska posunie tak, aby sa jej stred prekryval so stredom odtlačku na orezanie, čo zabezpečí metóda `translateMask()`. Orežanie odtlačku prebieha v metóde `cropFingerprint()`.



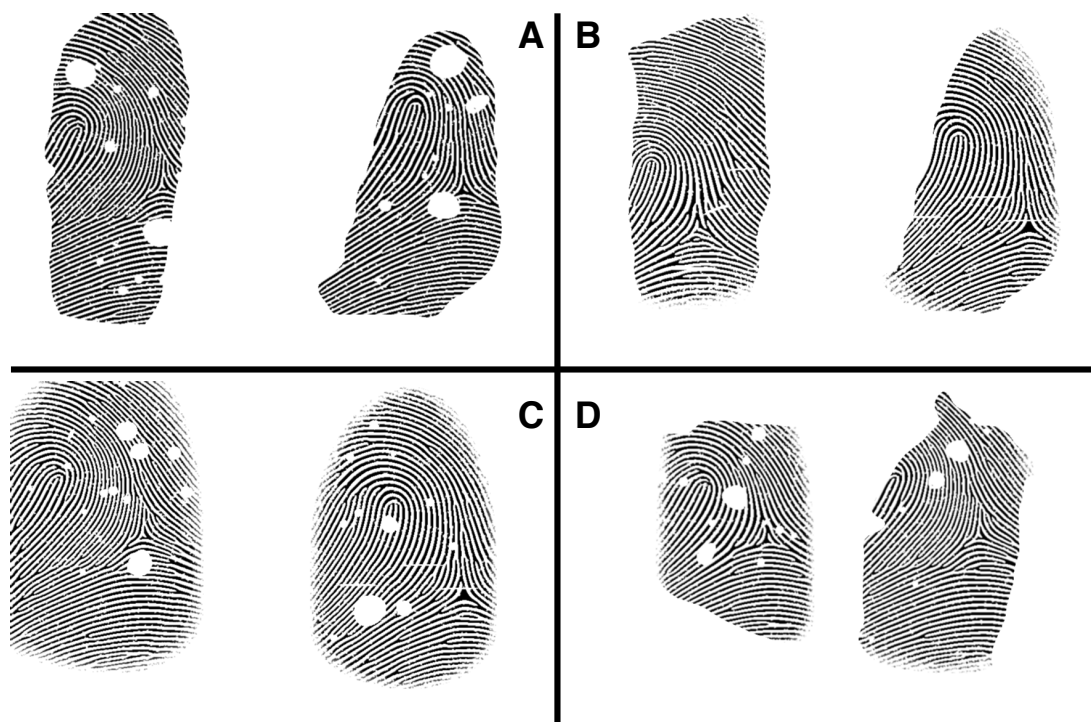
Obr. 6.8: Horný riadok – obrázky falzifikátov s neprirodzenými tvarmi z databázy výskumnej skupiny STRaDe. Spodný riadok – neprirodzený tvar aplikovaný na hlavný odtlačok z generátora SFinGe s využitím metód z triedy `FingerprintShape`.

6.6 Kombinácie prejavov falzifikátov

Jednotlivé implementované prejavy je možné navzájom kombinovať a vytvárať tak odtlačky obsahujúce viac znakov falzifikátov. Jediným obmedzením pri kombinovaní prejavov je, že ak majú byť v odtlačku postupne miznúce papilárne línie, musia byť aplikované úplne na začiatku, pred inými prejavmi. Je to z dôvodu realistického zhľadu falzifikátu – po aplikovaní orezania odtlačku do neprirodzeného tvaru by už miznúce okraje aplikované na tento tvar nemali význam. Avšak pri aplikovaní miznúcich okrajov pred orezaním vznikne falzifikát s časťami, v ktorých papilárne línie miznú postupne, aj s časťami, v ktorých náhle končia

(čo presne simuluje napríklad odstrihnutie okrajov falzifikátu, aby ho bolo možné umiestniť na plochu skeneru).

Na obrázku 6.9 sú zobrazené falzifikáty s viacerými vygenerovanými artefaktmi. V sekcii A sa nachádzajú falzifikáty s vygenerovanými vzduchovými bublinami a následným orezaním pre dosiahnutie neprirodeného tvaru falzifikátu. Tieto falzifikáty obsahujú navyše aj náhle ukončenie papilárnych línií, keďže nebolo generované postupné miznutie papilárnych línií. V sekcii B bolo do syntetických odtlačkov najskôr pridané postupné miznutie papilárnych línií a neskôr boli orezané do neprirodeného tvaru. V sekcii C je do syntetických odtlačkov pridané postupné miznutie papilárnych línií, čiže neobsahujú náhle ukončenie papilárnych línií, naznačujúce falzifikát, potom sú vygenerované vzduchové bubliny, ako prejav falzifikátov. V sekcii D sú do odtlačku pridané miznúce okraje, vzduchové bubliny aj neprirodený tvar.



Obr. 6.9: Syntetické odtlačky prstov s rôznymi kombináciami prejavov falzifikátov, implementované prejavy boli aplikované v nasledujúcom poradí:

A – Vzduchové bubliny a neprirodený tvar (odtlačky obsahujú aj náhle ukončenie papilárnych línií),

B – postupne miznúce okraje a neprirodený tvar (vznikli odtlačky s neprirodeným tvarom a oblasťami s náhle ukončenými papilárnymi líniami),

C – postupne miznúce papilárne línie a vzduchové bubliny (odtlačky obsahujú len jeden znak falzifikátov, postupne miznúce okraje naznačujú reálne odtlačky),

D – postupne miznúce okraje, vzduchové bubliny, neprirodený tvar (kombináciou postupne miznúcich papilárnych línií a následného orezania opäť vznikli falzifikáty, ktoré obsahujú aj náhle ukončenie papilárnych línií).

Kapitola 7

Testovanie dosiahnutých výsledkov

Odtlačky s prejavmi falzifikátov vygenerované vo vytvorenej aplikácii boli verifikované s využitím nástroja VeriFinger a pomocou metódy určenia kvality odtlačku, ktorú navrhol v rámci svojej diplomovej práce Ing. Oravec.

VeriFinger je technológia pre identifikáciu odtlačkov prstov. S jej využitím je možné zistiť skóre vyjadrujúce mieru zhody medzi dvomi odtlačkami. Najskôr je nutné zistiť skóre medzi rovnakými obrázkami originálneho syntetického odtlačku, ktoré vyjadruje úplnú zhodu, keďže toto skóre je iné pre každý odtlačok. Následne je možné zistiť hodnotu skóre medzi odtlačkom s vygenerovaným znakom falzifikátu a originálnym odtlačkom. Očakáva sa, že vplyvom vygenerovaných zmien skóre klesne. Keďže je známa hodnota skóre pri úplnej zhode, je možné vyčísliť normované skóre po aplikovaní implementovaných prejavov. Z väčšieho množstva odtlačkov s rovnakým vygenerovaným prejavom je potom možné určiť priemernú hodnotu skóre po aplikovaní daného prejavu alebo kombinácií prejavov.

Ďalšou metrikou zvolenou pre vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov je metóda, ktorú navrhol Ing. Oravec. Táto metóda bude v texte ďalej nazývaná Oravcova metóda, nakoľko zatiaľ nemá iný názov. V Oravcovej metóde je obrázok odtlačku rozdelený na menšie oblasti, v ktorých je kvalita vyhodnocovaná samostatne a posudzuje sa na základe viacerých kritérií, ako napríklad pomocou pomeru veľkostí papilárnych línií a medzier medzi nimi, kontinuality papilárnych línií, rozdielu orientácií medzi zvolenou oblasťou a okolitými časťami odtlačku, výraznosti papilárnych línií voči pozadiu a inými. Kvalita je v každej oblasti vyhodnotená samostatne a následne je z čiastkových kvalít v percentách určená celková kvalita odtlačku.

V ďalších podkapitolách sú uvedené informácie o dátových setoch vytvorených pre účely testovania (kapitola 7.1) a vyhodnotenie testovania (kapitola 7.2).

7.1 Vytvorené dátové sety

V rámci testovania dosiahnutých výsledkov bolo vytvorených osem dátových setov, z ktorých každý obsahuje 250 obrázkov odtlačkov. Prvý dátový set obsahuje neupravené syntetické odtlačky prstov z generátora SFinGe. Odtlačky boli generované automatizovaným skriptom vytvoreným v aplikácii SikuliX. Generátor SFinGe vytvára odtlačky piatich rôznych prstov a na výber je päť tried, do ktorých odtlačok môže patriť – ľavá slučka, pravá slučka, oblúk, klenutý oblúk alebo špirála. Vo vytvorených 250 odtlačkoch sú rovnomerne zastúpené všetky druhy prstov aj triedy odtlačkov.

Z vygenerovaných syntetických odtlačkov boli následne vytvorené tri ďalšie dátové sety, do ktorých bol generovaný vždy len jeden z implementovaných prejavov. Opäť bol pre

generovanie použitý automatizovaný skript. Možnosť náhodného generovania vzduchových bublín a nepravidelného tvaru uľahčila vytváranie modifikovaných odtlačkov.

Dátový set č. 2 obsahuje 250 odtlačkov, do ktorých sú v móde náhodného generovania vykreslené vzduchové bubliny. To znamená, že do každého odtlačku je vygenerovaných 7 – 13 vzduchových bublín na náhodné miesta, s rôznymi veľkosťami aj tvarom.

Dátový set č. 3 obsahuje odtlačky s neprirodzeným celkovým tvarom. Maska na orezanie bola opäť vybraná v náhodnom móde.

Dátový set č. 4 pozostáva z odtlačkov obsahujúcich postupne miznúce papilárne línie, ktoré nie sú prejavom falzifikátov, ale po ich aplikovaní sa taktiež mení kvalita odtlačku, takže aj tento prejav bol otestovaný. V dátovom sete sú rôzne šírky a intenzity miznutia papilárnych línií zastúpené viac-menej rovnomerne.

Dátové sety č. 5 – 7 boli vytvorené z obrázkov odtlačkov, do ktorých boli vygenerované vždy kombinácie dvoch implementovaných prejavov.

Posledný dátový set obsahuje odtlačky so všetkými tromi prejavmi vygenerovanými súčasne. Najskôr boli do odtlačkov vygenerované postupne miznúce papilárne línie, následne boli orezané do neprirodzeného tvaru a nakoniec boli do nich vygenerované vzduchové bubliny.

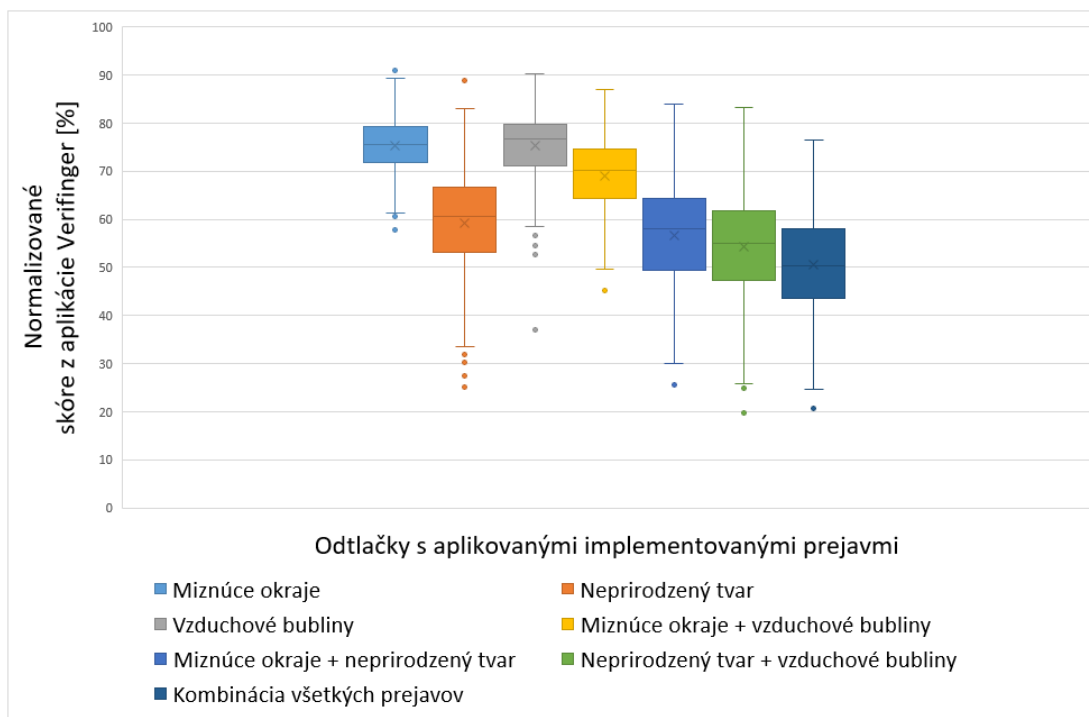
7.2 Vyhodnotenie testovania

Variácie v normovanom skóre (získanom technológiou VeriFinger) medzi jednotlivými množinami odtlačkov sú uvedené na grafe na obrázku 7.1. Graf bol vytvorený z hodnôt normovaného skóre vo všetkých odtlačkoch, do ktorých bol generovaný nejaký prejav falzifikátov. Štvoruholníkmi je vyznačený najčastejší rozsah hodnôt v jednotlivých dátových setoch. Okrem toho je možné vidieť grafickú reprezentáciu priemerných, maximálnych a minimálnych hodnôt normovaného skóre, ktoré sú uvedené aj v tabuľke 7.1.

Tabuľka 7.1: Štatistické spracovanie dosiahnutého skóre v technológii VeriFinger.

Set	Generovaný prejav	Priemer	Norm. priemer	Maximum	Minimum
1	–	1119,00	100,00 %	100,00 %	100,00 %
2	vzduchové bubliny	841,87	75,19 %	90,15 %	36,92 %
3	neprirodzený tvar	660,83	59,18 %	88,83 %	25,04 %
4	miznúce okraje	841,28	75,18 %	91,03 %	57,89 %
5	okraje + bubliny	771,43	68,89 %	87,04 %	45,13 %
6	okraje + tvar	632,16	56,53 %	83,94 %	25,59 %
7	tvar + bubliny	606,46	54,27 %	83,12 %	19,75 %
8	kombinácia všetkých	566,79	50,64 %	76,36 %	20,73 %

Výsledky štatistického spracovania údajov z testovania sú zobrazené v tabuľke 7.1. V tabuľke je uvedené priemerné skóre z vyhodnotenia každého dátového setu aplikáciou VeriFinger. Pre úplnosť je v prvom riadku uvedené aj priemerné skóre, získané pri porovnávaní dvoch zhodných odtlačkov, ktoré je v každom odtlačku odlišné a považované za 100 % zhodu pri výpočte normovaného skóre. Ďalšími informáciami, uvedenými v tabuľke, je priemerné normované skóre medzi dvomi rovnakými obrázkami a obrázkami odtlačku pred a po vygenerovaní zmien, ako aj maximálne a minimálne normované skóre zaznamenané v každom dátovom sete.

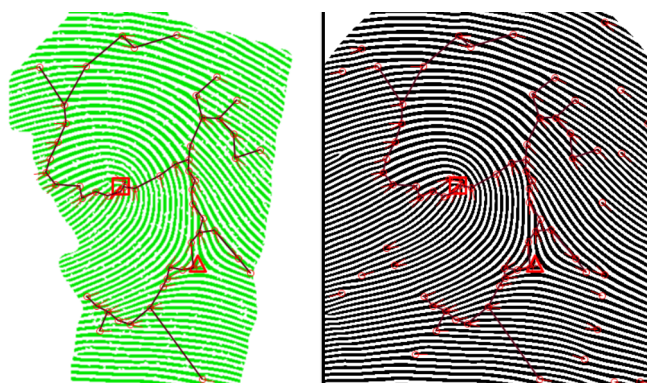


Obr. 7.1: Grafické znázornenie hodnôt normovaného skóre pre odtlačky v siedmich rôznych dátových setoch s rôznymi aplikovanými implementovanými prejavmi.

Z tabuľky 7.1 vyplýva, že najväčší priemerný rozdiel v skóre bol zaznamenaný v dátovom sete 8, v ktorom sa nachádzajú odtlačky s kombináciou všetkých implementovaných prejavov, čo je v súlade s očakávaniami. Najnižší pokles v zhode spôsobili prejavy vzduchové bubliny a postupne miznúce papilárne línie, pri ktorých sa spriemerované hodnoty takmer rovnajú. Aplikovanie samostatného neprirodzeného tvaru zapríčinilo približne o 16 % väčší rozdiel v skóre ako ostatné dva prejavy, aplikované na odtlačok samostatne.

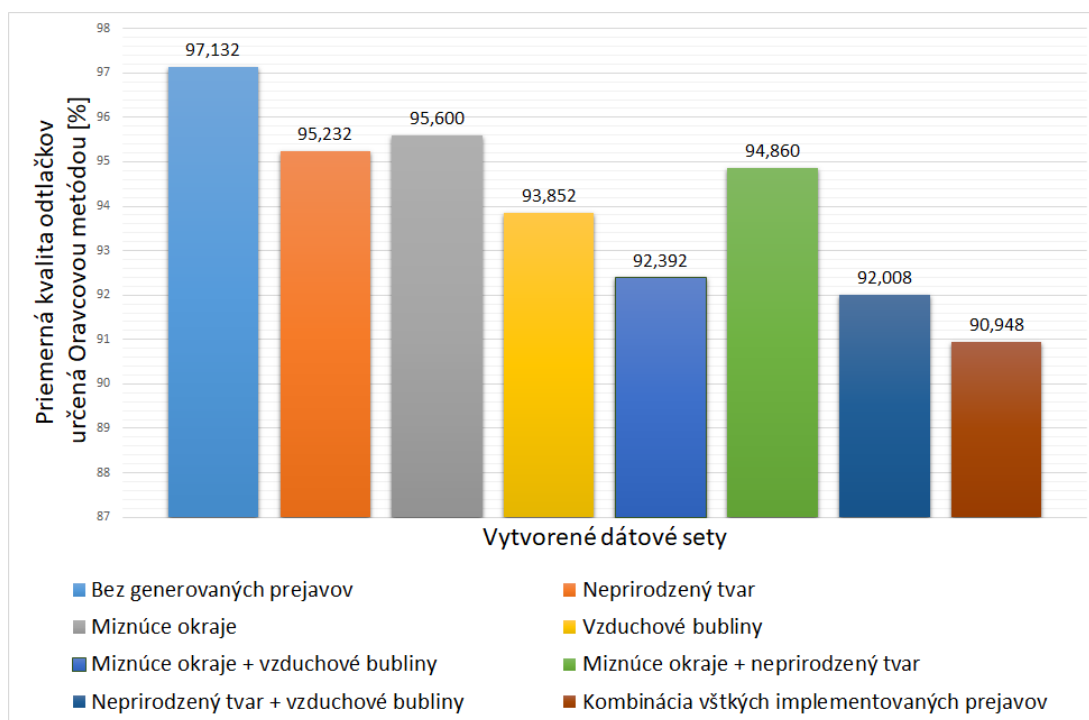
Podobná situácia nastáva aj v dátových setoch, ktoré obsahujú kombinácie dvoch implementovaných prejavov. Pokiaľ sa v kombinácii generovaných prejavov nachádza aj neprirodzený tvar odtlačku, skóre klesá rapídnejšie. V dátovom sete č. 5, ktorý obsahuje odtlačky s kombináciou postupne miznúcich okrajov a vzduchových bublín, skóre priemerne kleslo o 31,11 %, čo je menej ako pri samostatne aplikovanom neprirodzenom tvare, keď skóre priemerne kleslo o 40,82 %.

Aj keď je vyčíslený rozdiel v skóre po vygenerovaní neprirodzeného tvaru dosť vysoký, pri vizuálnom pozorovaní detegovaných markantov pred a po zmene odtlačku je viditeľné, že väčšina z nich ostala nepoškodená. Je to spôsobené posúvaním masky do stredu odtlačku pred orezaním, keďže vo väčšine odtlačkov sa najviac markantov nachádza práve v tejto oblasti, a tým pádom v odtlačku ostávajú aj po orezaní do neprirodzeného tvaru. Takáto situácia je znázornená na obrázku 7.2. Obrázok bol vytvorený zo screenshotu aplikácie VeriFinger. Vľavo je odtlačok s neprirodzeným tvarom, v ktorom sú znázornené detegované riadiace body a markanty, ktorých reprezentácia je použitá pri porovnávaní s databázou uložených odtlačkov. Vpravo je zobrazený odtlačok, s ktorým majú najvyššie skóre zhody spomedzi všetkých odtlačkov z databázy.



Obr. 7.2: Odtlačky s markantmi a riadiacimi bodmi detegovanými v aplikácii VeriFinger. Vpravo je syntetický odtlačok prsta priradený ako najlepšia zhoda k odtlačku vľavo, na ktorý je aplikovaný neprirodzený celkový tvar.

Na grafe zobrazenom na obrázku 7.3 sú v percentách uvedené priemerné kvality, určené Oravcovou metódou, v jednotlivých dátových setoch. Odtlačky bez vygenerovaných prejavov dosiahli najvyššiu priemernú kvalitu, a to 97,132 %. V každom dátovom sete, v ktorom bol vygenerovaný nejaký prejav falzifikátov, priemerná kvalita klesla v porovnaní s kvalitou odtlačkov bez vygenerovaných prejavov, čím sa naplnili očakávania.



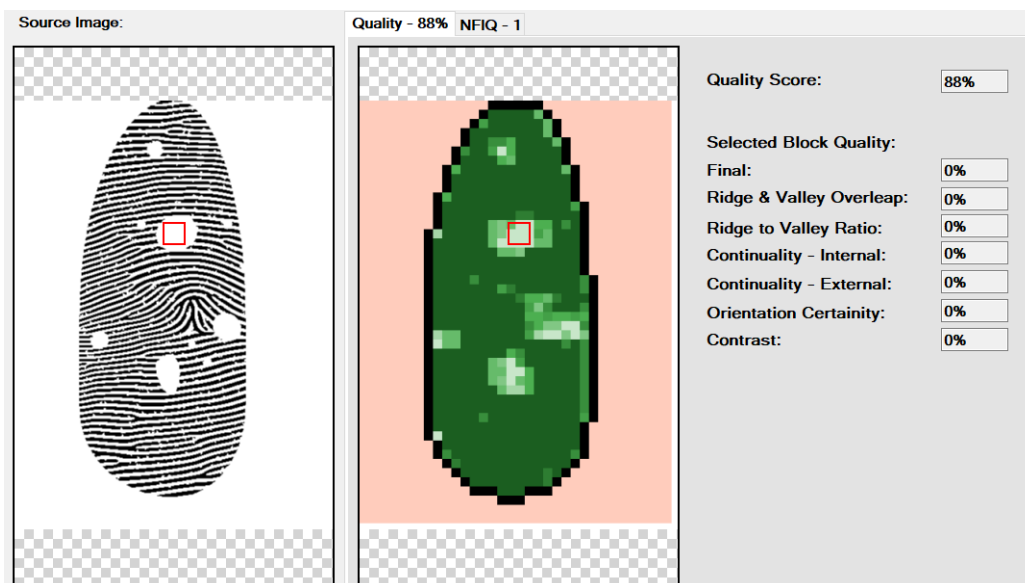
Obr. 7.3: Grafické znázornenie priemerných kvalít odtlačkov vo vytvorených dátových setoch. Kvalita odtlačkov je určená Oravcovou metódou.

Priemerné hodnoty kvality v jednotlivých dátových setoch sú pre prehľadnosť uvedené aj v tabuľke 7.2 spolu s maximálnymi a minimálnymi dosiahnutými kvalitami v každom dátovom sete.

Tabuľka 7.2: Štatistické spracovanie výsledkov testovania Oravcovou metódou.

Set	Generovaný prejav	Priemer	Maximum	Minimum
1	–	97,13 %	99,00 %	92,00 %
2	vzduchové bubliny	93,85 %	98,00 %	84,00 %
3	neprirodzený tvar	95,23 %	98,00 %	79,00 %
4	miznúce okraje	95,60 %	98,00 %	89,00 %
5	okraje + bubliny	92,39 %	97,00 %	81,00 %
6	okraje + tvar	94,86 %	97,00 %	79,00 %
7	tvar + bubliny	92,01 %	97,00 %	66,00 %
8	kombinácia všetkých	90,95 %	97,00 %	73,00 %

V rámci samostatne generovaných prejavov kvalita klesla najviac pri generovaní vzduchových bublín. Je to spôsobené tým, že v oblastiach s bublinami je čiastková kvalita daných oblastí nízka, až nulová. Takáto situácia je názorne predvedená na obrázku 7.4, na ktorom je screenshot Oravcovho programu. V programe sú zobrazené hodnoty jednotlivých kritérií posudzovania kvality v oblasti, v ktorej sa nachádza veľká vzduchová bublina. Najmenej spomedzi samostatne generovaných prejavov kvalita klesla aplikovaním neprirodzeného tvaru. Orezaním odtlačku sa síce zmenšila jeho plocha, ale okrem toho neboli generované porušenia vo vnútri plochy odtlačku, preto ostala celková kvalita odtlačku relatívne vysoká.



Obr. 7.4: Screenshot z Oravcovej aplikácie, na ktorom sú zobrazené percentuálne hodnoty jednotlivých kritérií posudzovania kvality v oblasti označenej červeným štvoruholníkom. Celú zisťovanú oblasť pokrýva vzduchová bublina, preto je celková kvalita oblasti 0 %.

Pri kombináciách s dvomi vygenerovanými prejavmi opäť kvalita viac klesla v prípade, keď sa v generovanej kombinácii prejavov nachádzali vzduchové bubliny. Najnižšiu priemernú kvalitu dosiahli odtlačky, na ktoré boli aplikované všetky implementované prejavy, a to 90,948 %, čo je o 6,184 % menej ako priemerná kvalita v odtlačkoch bez vygenerovaných prejavov.

Odtlačky v dátovom sete č. 6, do ktorých boli najskôr pridané postupne miznúce papilárne línie a následne na ne bol aplikovaný neprirodzený celkový tvar, boli kontrolované aj vizuálne. Na základe tejto kontroly bolo zistené, že 76,80 % z nich obsahuje oblasti s náhle ukončenými papilárnymi líniami aj oblasti so zreteľne viditeľnými postupne miznúcimi papilárnymi líniami, a to bez zásahu užívateľa. Zvyšných 23,20 % odtlačkov z 250 v tomto dátovom sete má v dôsledku aplikovania neprirodzeného tvaru na celom obvode náhle ukončené papilárne línie. V dátovom sete č. 8, ktorý obsahuje obrázky s odtlačkami s kombináciou všetkých 3 implementovaných prejavov, 75,20 % odtlačkov obsahuje oblasti s postupne miznúcimi aj s náhle ukončenými papilárnymi líniami, čo je podobný výsledok, ako v dátovom sete č. 6.

Kapitola 8

Záver

Cieľom práce bolo vytvoriť aplikáciu, v ktorej je možné modifikovať syntetické odtlačky prstov z generátora SFinGe tak, aby obsahovali špecifické znaky falzifikátov odtlačkov prstov. Vytvorené výsledky bolo potrebné vhodným spôsobom verifikovať a spolu s teoretickým základom a postupom práce zhrnúť v texte práce.

Formálne zadanie práce obsahuje päť bodov. Tieto body zahŕňajú preštudovanie literatúry týkajúcej sa falzifikátov odtlačkov prstov a biometrického rozpoznávania podľa odtlačkov prstov, zoznámenie sa s generátorom SFinGe, návrh algoritmu pre generovanie vybraných prejavov falzifikátov, jeho implementáciu, otestovanie a overenie výstupu s využitím vhodného algoritmu na porovnávanie odtlačkov prstov.

Výsledkom štúdia literatúry je vytvorenie teoretickej časti práce. Počas tvorby jej obsahu boli niektoré vysvetľujúce obrázky vytvorené v rámci zoznamovania sa s generátorom SFinGe, čím bol úplne splnený prvý bod zadania.

Po nastudovaní literatúry na základe novonadobudnutých vedomostí nasledoval výber prejavov falzifikátov, ktoré mali byť podrobnejšie preskúmané a neskôr implementované. Vybrané boli tri prejavy – vzduchové bubliny, náhle ukončenie papilárnych línií a neprirodzený celkový tvar odtlačku. Prvé dva z týchto prejavov sú určené aj v zadaní práce, posledný prejav bol vybraný v rámci rozšírenia zadania, aby bolo možné kombinovaním generovaných prejavov vytvárať ešte zaujímavejšie falzifikáty. Zároveň s výberom znakov falzifikátov padlo rozhodnutie o použití hlavného odtlačku z generátora SFinGe, pretože odtlačok, ktorý generátor generuje ako výsledný, obsahuje rôzne porušenia, ktoré by mohli byť zameniteľné s generovanými prejavmi. Keďže tento odtlačok už obsahuje náhle ukončené papilárne línie, ktoré naznačujú falzifikát, bolo rozhodnuté, že implementovaný bude ich opak – postupne miznúce papilárne línie. Z toho dôvodu je v aplikácii možné generovať odtlačky, ktoré obsahujú aj neobsahujú daný znak falzifikátov, prípadne aj odtlačky, na okrajoch ktorých sú v určitých oblastiach papilárne línie náhle ukončené a v iných miznú postupne (v kombinácii s neprirodzeným celkovým tvarom odtlačku).

Počas vytvárania návrhov algoritmov pre implementáciu museli byť vybrané prejavy falzifikátov vizuálne podrobne preskúmané, nakoľko neexistuje dostatočné množstvo literatúry pre podrobné štúdium ich vzhľadu. Na analýzu prejavov falzifikátov boli využité obrázky z databázy výskumnej skupiny STRaDe. Okrem toho boli nad rámec zadania vlastnoručne vyrobené falzifikáty, pôvodne pre analýzu vzduchových bublín, ale poslúžili aj pri návrhu metód iných prejavov. Na základe záverov, získaných počas analýzy grafickej podoby znakov falzifikátov, boli navrhnuté algoritmy pre implementáciu metód na ich generovanie, čím sa splnil ďalší bod zadania.

Navrhnuté algoritmy boli implementované v jazyku C++ s využitím metód knižnice OpenCV pre grafické operácie spracovania obrazu. Po dokončení implementácie bolo vytvorených 8 dátových setov, z ktorých jeden obsahuje nepoškodené syntetické odtlačky, 3 sú zložené zo syntetických odtlačkov vždy len s jedným vygenerovaným implementovaným prejavom, ďalšie 3 sú zložené z odtlačkov s kombináciou dvoch vygenerovaných prejavov a 1 dátový set obsahuje odtlačky s kombináciou všetkých troch implementovaných prejavov. Každý dátový set pozostáva z 250 obrázkov.

Vytvorené odtlačky boli otestované pomocou nástroja VeriFinger, ktorý udáva skóre ako mieru zhody medzi dvomi odtlačkami. Najskôr bolo zistené skóre pri úplnej zhode odtlačkov, na základe ktorého bolo možné vypočítať normované skóre zhody pôvodného odtlačku a odtlačku po vygenerovaní implementovaných prejavov. Priemerné skóre najviac kleslo v odtlačkoch, ktoré obsahovali kombinácie všetkých prejavov, o niečo menej v odtlačkoch, na ktoré bol aplikovaný neprirodený celkový tvar, či už v kombinácii s iným prejavom, alebo samostatne. Najmenej skóre kleslo po vygenerovaní samostatných vzduchových bublín a samostatných postupne miznúcich okrajov. V týchto dvoch prejavoch sa priemerované hodnoty takmer rovnali.

Odtlačky boli v rámci rozšírenia zadania, s cieľom lepšie preveriť dosiahnuté výsledky, otestované aj pomocou Oravcovej metódy, v ktorej je kvalita odtlačku určená na základe čiastkových kvalít v menších oblastiach odtlačku. Percentuálne vyčíslenie kvality pritom ovplyvňuje viacero kritérií zahŕňajúcich napríklad veľkosť, kontinualitu a kontrast papilárnych línií s pozadím. Kvalitu odtlačku najviac ovplyvnilo generovanie vzduchových bublín, keďže vzduchové bubliny radikálne ovplyvnili čiastkové kvality v oblastiach, ktoré pokrývali. Aj s použitím tejto metriky bola najnižšia priemerná kvalita dosiahnutá v dátovom sete, v ktorom boli generované všetky implementované prejavy. Implementáciou metód a otestovaním dosiahnutých výsledkov boli splnené ďalšie dva rozšírené body zadania.

Prácu by bolo možné potenciálne doplniť o implementáciu ďalších prejavov falzifikátov, napríklad nerovnomernej šírky papilárnych línií a medzier medzi nimi. Kombináciou tohto prejavu so vzduchovými bublinami by sa totiž prítomnosť vzduchových bublín ešte viac zvýraznila, ako je to možné pozorovať aj na obrázkoch z výskumnej skupiny STRaDe. Ďalším prejavom by mohli byť rozmazané oblasti papilárnych línií, pri ktorých by sa mohol na vygenerovanie rôznych tvarov daných oblastí využiť spôsob, akým je generovaný tvar vzduchových bublín. Samozrejme, doplnené by mohli byť implementácie akýchkoľvek iných znakov falzifikátov. Pri väčšom množstve implementovaných prejavov by potom bolo možné vytvoriť skupiny prejavov, ktoré sa vyskytujú spolu vo falzifikátoch vytvorených určitou metódou, a ponúknuť užívateľovi možnosť vygenerovať znaky na základe zadanej metódy výroby.

Posledným bodom zadania bolo zhrnutie dosiahnutých výsledkov a návrh budúceho rozšírenia práce. Za splnenie tohto bodu môže byť považované vytvorenie praktickej časti textu práce, ako aj obsah tejto kapitoly. Splnené boli teda všetky body zadania v súlade s hlavným cieľom práce, stanoveným na počiatku jej tvorby. Bakalárska práca bola rozšírená o pridanie tretieho prejavu falzifikátov, výrobu falzifikátov na dôkladnejšiu analýzu vybraných prejavov a testovanie bolo okrem použitia komerčného nástroja (určeného v zadaní) rozšírené o ďalšiu metriku, a to Oravcovu metódu.

Literatúra

- [1] Drahanský, M.; Orság, F.; Doležel, M.; aj.: *Biometrie*. Brno: Computer Press a. s., 2011, ISBN 978-80-254-8979-6.
- [2] Maltoni, D.; Maio, D.; Jain, A. K.; aj.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York: Springer, 2003, ISBN 0-387-95431-7.
- [3] Drahanský, M.: *Fingerprint Recognition Technology – Related Topics: Skin Diseases, Image Quality and Liveness Detection*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, ISBN 978-3-844-33007-6.
- [4] Hawthorne, M. R.: *Fingerprints : Analysis and Understanding*. USA: CRC Press, 2009, ISBN 978-1-4200-6864-1.
- [5] Jain, A. K.; Ross, A. A.; ; aj.: *Introduction to Biometrics*. New York: Springer, 2011, ISBN 978-0-387-77325-4.
- [6] Drahanský, M.; Kanich, O.: *Rozpoznávání podle otisků prstů*. FIT VUT v Brně, 2018, [Online; navštívené 24.01.2019].
URL https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/BIO/private/04_BIO_Prednaska_OK_2018.pdf
- [7] Feng, J.; Jain, A. K.: *Latent Fingerprint Matching*. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, ročník 33, 2011: s. 88–100.
- [8] Marcel, S.; Nixon, M. S.; Li, S. Z.: *Handbook of Biometric Anti-Spoofing: Trusted Biometrics under Spoofing Attacks*. London: Springer, 2014, ISBN 978-1-4471-6523-1.
- [9] van Der Meulen, L. J.: *False Fingerprints – A New Aspect*. 1955, [Online; navštívené 24.01.2019].
URL <https://scholarlycommons.law.northwestern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4355&context=jcllc>
- [10] Benner, K.; Lichtblau, E.: *U. S. Says It Has Unlocked iPhone Without Apple*. 2016, [Online; navštívené 24.01.2019].
URL <https://www.nytimes.com/2016/03/29/technology/apple-iphone-fbi-justice-department-case.html?hpw=&rref=technology&action=click&pgtype=Homepage&module=inline®ion=bottom-well&WT.nav=bottom-well>
- [11] Drahanský, M.: *Hand-based biometrics: methods and technology*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2018, ISBN 978-1-78561-224-4.

- [12] Lee, C. D.: *Finger-Prints Can Be Forged*. 1935, [Online; navštívené 25.01.2019]. URL <https://scholarlycommons.law.northwestern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2507&context=jclc>
- [13] Capelli, R.; Maio, D.; Maltoni, D.: *Synthetic Fingerprint-Database Generation*. Quebec City: IEEE, 2002, ISBN 0-7695-1695-X.
- [14] Kanich, O.: *Fingerprint Damage Simulation: A simulation of fingerprint distortion, damaged sensor, pressure and moisture*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, ISBN 978-3-659-63942-5.
- [15] Cappelli, R.: *SFinGe: an Approach to Synthetic Fingerprint Generation*. International Workshop on Biometric Technologies, Canada, 2004.
- [16] Ledda, A.: *Mathematical Morphology in Image Processing*. Universiteit Gent, 2007, ISBN 978-90-8578-127-1.
- [17] Fajmon, B.; Hlavičková, I.; Novák, M.; aj.: *Numerická matematika a pravděpodobnost*. Ústav matematiky FEKT VUT v Brně, 2014.
- [18] Stark, H.; Woods, J. W.: *Probability and Random Processes with Applications to Signal Processing*. USA: Pearson Education International, 2002, ISBN 0-13-178457-9.