



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**GENEROVÁNÍ SYNTETICKÉHO OTISKU PRSTU
Z BIOMETRICKÉ ŠABLONY**

SYNTHETIC FINGERPRINT GENERATION FROM BIOMETRIC TEMPLATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ADAM ŠUBA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce



Student: **Šuba Adam, Bc.**
Program: Informační technologie
Obor: Bezpečnost informačních technologií
Název: **Generování syntetického otisku prstu z biometrické šablony**
Synthetic Fingerprint Generation from Biometric Template
Kategorie: Zpracování obrazu
Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se rozpoznávání podle otisků prstů a generování syntetických otisků. Seznamte se s normami šablon otisků prstů.
2. Navrhněte metodu, která vygeneruje syntetický otisk prstu z dané biometrické šablony a nepovinných dalších vstupních údajů (např. třída otisku prstu). Metoda umožní také samostatné vygenerování šablony (a dalších vstupních údajů) pro plně automatizované generování syntetických otisků.
3. Implementujte navržený algoritmus z předchozího bodu.
4. Proveďte otestování Vašeho řešení vygenerováním datasetu syntetických otisků a jejich porovnáním se zdrojovou šablonou (nebo otiskem) ve vhodném softwaru na porovnání otisků prstů (např. IDkit nebo VeriFinger). Vyhodnoťte nakolik jsou otisky realisticky vypadající a porovnejte s existujícími řešeními.
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, p. 512. ISBN 978-1-8488-2254-2.
- Kanich, O.: *Research in Fingerprint Damage Simulations*, Doctoral thesis, FIT BUT in Brno, Brno, 2018, p. 148.
- ISO/IEC 19794-2:2011: *Information technology - Biometric data interchange formats - Part 2: Finger minutiae data*, 2012, p. 93.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 a 2.

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

Vedoucí práce: **Kanich Ondřej, Ing., Ph.D.**

Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2020

Datum odevzdání: 19. května 2021

Datum schválení: 11. listopadu 2020

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je návrh a implementace postupu pro generování syntetických otisků prstů z biometrických šablon. Řešení bylo založeno na již existujícím generátoru otisků prstů SyFDaS vyvíjeném na Fakultě informačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Jednotlivé části generátoru musely být přizpůsobeny a automatizovány aby lépe vyhovovaly generování ze šablony. Výsledný produkt umožňuje uživateli vložím šablony vytvořit otisk prstu zcela bez dalších zásahů. Vyhodnocení probíhalo porovnáním syntetických otisků s původními pomocí algoritmu VeriFinger. Otisky vytvořené zcela automaticky dosáhly smíšených výsledků, nicméně manuální úpravy parametrů přinesly výrazné zlepšení. Až 72 % syntetických otisků shledal VeriFinger za shodné. Výsledky vyhodnocení pomohly identifikovat slabá místa současného řešení. Na jejich základě byla navržena další možná rozšíření s cílem zvýšit úspěšnost plně automatizovaného generování a zlepšit kvalitu ostatních součástí generátoru.

Abstract

The goal of this master thesis is to design and implement an approach for synthetic fingerprint generation from a biometric template. The thesis bases the solution on an existing fingerprint generator called SyFDaS developed at the Brno University of Technology, Faculty of Information Technology. Individual components of the generator had to be modified and automatized to suit better the task of generating from a template. The end product enables the user to create a fingerprint without any intervention just by importing a template. The evaluation in this thesis presents results obtained by comparing the synthetic and original fingerprints using the VeriFinger algorithm. Entirely automatically created fingerprints achieved mixed results; however, manual adjustments of the parameters brought substantial improvements. Up to 72% of synthetic fingerprints reached the match by the VeriFinger. The results of the evaluation helped to identify weak points of the current solution. Based on these, the thesis proposes further steps to improve the success rate of automatic generation and the quality of other components.

Klíčová slova

otisk prstu, biometrická šablona, syntetický otisk prstu, rekonstrukce otisku prstu

Keywords

fingerprint, biometric template, synthetic fingerprint, fingerprint reconstruction

Citace

ŠUBA, Adam. *Generování syntetického otisku prstu z biometrické šablony*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich, Ph.D.

Generování syntetického otisku prstu z biometrické šablony

Prohlášení

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

.....

Adam Šuba
17. května 2021

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Ondřeji Kanichovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky v průběhu vypracování této práce a poskytnutí nástroje SyFDaS a potřebných dat.

Obsah

1	Úvod	3
2	Biometrie otisků prstů	4
2.1	Úvod do biometrie	4
2.2	Otisky prstů	5
2.3	Získání otisku prstu	9
3	Rozpoznávání podle otisků prstů	13
3.1	Extrakce markantů	13
3.2	Porovnávání markantů	17
3.3	Biometrické šablony	17
4	Syntetické otisky prstů	25
4.1	Základní princip generování syntetických otisků prstů	25
4.2	Poškození otisků prstu	26
4.3	SFinGe	27
4.4	SyFDaS	28
4.5	Další metody generování syntetických otisků prstů	29
5	Návrh	33
5.1	Analýza použití SyFDaS pro generování z šablony	33
5.2	Načtení šablony	35
5.3	Automatizace jednotlivých kroků generátoru	35
5.4	Simulace poškození	36
5.5	Uživatelské rozhraní	36
6	Implementace úprav generátoru	38
6.1	Práce se šablonou	38
6.2	Tvar otisku prstu	39
6.3	Odhad směrového pole	41
7	Vyhodnocení vygenerovaných otisků	47
7.1	Použité nástroje a data	47
7.2	Plně automatické generování	48
7.3	Generování s manuální korekcí	51
7.4	Manuální porovnání markantů	54
7.5	Shrnutí výsledků a možné úpravy	55
8	Závěr	58

Literatura	60
A Obsah přiloženého paměťového média	63

Kapitola 1

Úvod

V současné době je biometrie otisků prstů snad nejrozšířenější typem biometrie. Čtečky otisků prstů se nacházejí téměř v každém chytrém mobilním zařízení jako primární způsob ověření přístupu.

Biometrické systémy je však důležité neustále vylepšovat a testovat. K testování většiny systémů (nejen biometrických) je však potřeba dostupnost dat, a to ve velkém množství. Získání testovacích dat se v biometrii ovšem jeví jako problém. Důvodem bývá časová a finanční náročnost sběru, ale i neochota lidí poskytnout svou biometrickou vlastnost pro účely testovací databáze. V takových případech panuje u osob strach o jejich soukromí. Legislativa spojená se sběrem a nakládáním s osobními daty navíc situaci komplikuje. Například General Data Protection Regulation (GDPR) považuje biometrická data za osobní a je vyžadován explicitní souhlas [8]. Kromě těchto problémů se v případě otisků prstů naráží i na skutečnost, že ne všechny třídy otisků prstů jsou v populaci zastoupeny rovnoměrně. Pro získání rozumného počtu vzorků méně frekventované třídy otisků je potřeba vyvinout značně vyšší úsilí. [21][18]

V těchto případech je skvělé dokázat testovací databázi vybudovat bez nutnosti žádat o svolení a vynakládání spousty času a úsilí. Řešením tohoto problému v případě otisků prstů je jejich generování. Problémem takto vygenerovaných otisků prstů ovšem bývá jejich nevěrohodnost. Při snímání skutečných otisků prstů často dochází k různým jejich poškozením, která se na syntetických otiscích nenacházejí. Je proto důležité vygenerované otisky vylepšit o simulaci těchto poškození. [21][18]

Kromě generování otisků prstů od nuly, je také možné a výhodné umět zrekonstruovat původní otisk prstu, například pouze ze znalosti pozice, typu a směru markantů. Ty mohou být získány například z biometrických šablon. Kriminálníisté pak mohou z neúplného latentního otisku prstu extrahovat dostupné markanty a generováním doplnit chybějící část otisku. Jiné použití může být v rámci boje proti terorismu, kdy se lze rekonstrukcí otisku prstu a následným vytvořením falzifikátu dostat do zařízení osoby podezřelé z plánování teroristických útoků. Případně, za účelem snižování času potřebného ke sběru databáze skutečných otisků prstů, je možné získat od uživatelů jen jeden či dva otisky a zbývající vygenerovat ze šablony. A využití by se dalo najít více.

V následující kapitole 2 jsou popsány základní informace o biometrii, otiscích prstů a jejich použití v biometrických systémech. Kapitola 3 se zabývá rozpoznáváním podle otisků prstů a kapitola 4 zkoumá existující generátory syntetických otisků prstů. V kapitole 5 je na základě znalostí z předchozích kapitol navržen generátor, který má za cíl přiblížit se systému popsanému v předchozích odstavcích. Kapitoly 6 a 7 se pak věnují postupu implementace zmíněného generátoru a vyhodnocení jeho kvality.

Kapitola 2

Biometrie otisků prstů

Cílem této kapitoly je čtenáře seznámit se základními principy a termíny v biometrii, zejména těmi týkajícími se otisků prstů, kterým se tato práce výhradně věnuje. Popsán bude také způsob získávání otisků prstů a informací z nich. Na závěr se kapitola věnuje metodám uložení otisků prstů jako biometrických šablon, které slouží pro následnou verifikaci či identifikaci.

2.1 Úvod do biometrie

Podle [21], lze biometrické rozpoznávání neboli biometrii, definovat jako použití odlišujících anatomických (otisk prstu, tvář, duhovka) či behaviorálních (řeč, pohyb těla) vlastností, nazývaných biometrické identifikátory, rysy nebo charakteristiky, a to pro účely automatického rozpoznání jednotlivců.

Rozpoznání jednotlivce lze chápat jako přiřazení a ověření jeho či její fyzické identity k jeho či její identitě elektronické. Kromě biometrie jsou k tomuto účelu využívány hesla či PIN (ověření na základě znalosti nějaké informace), případně čipové karty (ověření na základě vlastnictví). Obě tyto metody však mají své nevýhody. Znalost může být zapomenuta nebo vyzrazena, vlastněný předmět může být propůjčen nebo odcizen. Biometrie řeší tyto nevýhody, neboť si člověk nemusí nic pamatovat, ani s sebou nic nosit, pouze mu postačí být sám sebou. Avšak i biometrie má své nevýhody – pokud dojde k vyzrazení některého rysu (vznikl by například kvalitní falzifikát otisku prstu), nelze jej z jeho podstaty změnit. Lidé také nemusí být ochotni nechat si daný biometrický rys snímat, ze strachu o své soukromí.

Existuje celá řada biometrických rysů. Podle [3] existují vlastnosti, které by měl mít každý biometrický rys, ty jsou:

- univerzalita – rys by měla mít každá osoba
- jedinečnost – žádné dvě osoby nemají tento rys stejný
- konstantnost – rys zůstává v čase neměnný
- získatelnost – rys by měl být kvantitativně měřitelný

Jsou však uváděny i další požadavky, které jsou v praxi důležité:

- výkonnost – určuje dosažitelnou přesnost rozpoznání, požadavky pro akceptovatelnou přesnost rozpoznání a faktory tuto přesnost ovlivňující

- akceptace – míra ochoty osob přijmout daný biometrický systém, tj. jsou ochotní si použitý biometrický rys nechat nasnímat
- bezpečnost – míra náchylnosti systému na vytvoření falzifikátů
- cena – finanční náročnost na pořízení a zprovoznění systému používající tento rys

Poslední uvedená vlastnost a české překlady vlastností z [3] jsou převzaty z [10].

Ve skutečnosti ovšem nesplňuje žádný biometrický rys všechny tyto vlastnosti perfektně a jeho využití je podmíněno vhodností pro daný systém. V některých případech lze pro rozpoznání použít více různých biometrických rysů, v takovém případě mluvíme o multimodálních systémech [10][3].

2.2 Otisky prstů

Otisky prstů se v jisté míře používaly již od starověku. Existují archeologické nálezy z území dnešní Číny a Blízkého východu, obsahující značky připomínající otisky prstů. Zejména nálezy z Blízkého východu nasvědčují podle archeologů využití jako jakýsi podpis autora. Zároveň ale převládá názor, že v těchto společnostech mohla ke stejnému účelu sloužit jakákoliv jiná značka a žádný speciální význam nebyl otiskům prstů přikládán. [9][3]

Až od poloviny 19. století se začaly objevovat další studie na téma otisků prstů, které ustanovily obecně uznávané zákonitosti: žádné dvě osoby nemají stejný otisk prstů, tento otisk prstů je v průběhu života neměnný a je neodstranitelný [9] [27]. Tyto objevy a potřeba snadné identifikace osob v rozrůstající se populaci vedly k zavedení použití otisků prstů v kriminalistice. Platnost těchto zákonitostí je ovšem stále předmětem diskuze, neboť nebyly nikdy vědecky potvrzeny. [14][21]

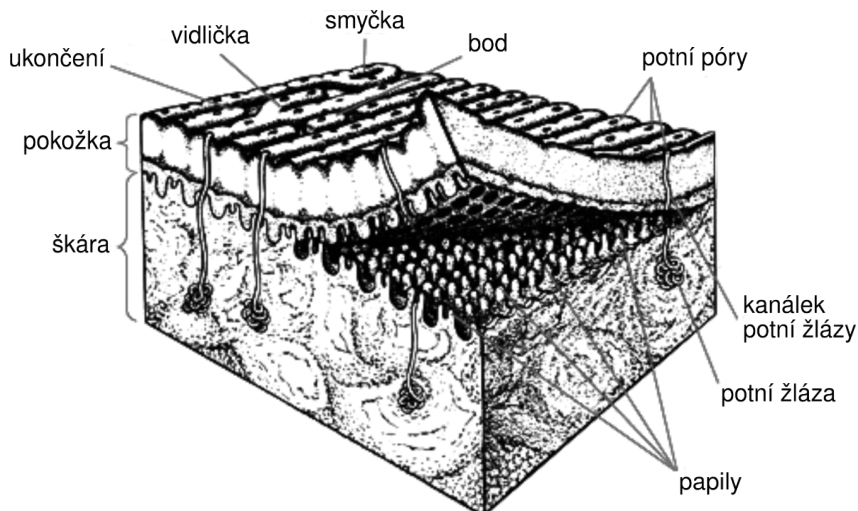
Od 60. let minulého století, díky rozvoji počítačů, začaly vznikat systémy pro automatické rozpoznávání otisků prstů AFIS (*Automated fingerprint identification system*) v kriminalistice a od 80. let se díky technologickým pokrokům mohly začít otisky prstů používat v osobní elektronice [3]. Tento trend pokračuje i v dnešní době, kdy se otisky prstů používají ve velké míře v mobilních telefonech a počítačích.

Ve srovnání s ostatními biometrickými rysy podle kritérií uvedených v sekci 2.1, [3] a [10] uvádějí velmi dobrou *jedinečnost*, *konstantnost*, *výkonnost*, *bezpečnost* a *cenu* otisků prstů. Ani zbývající dvě „povinné“ vlastnosti, *univerzalita* a *získatelnost*, nejsou špatné. V tomto ohledu ovšem otisky prstů překonává například DNA, která na druhou stranu ztrácí z pohledu *akceptace* nebo *bezpečnosti*. Ačkoliv zdroje [9] a [10] uvádějí *akceptaci* otisků prstů jako průměrnou, lze předpokládat, že v široké populaci dochází ke zlepšení ochoty nechat si snímat otisky prstů. Důvodem pro tento předpoklad je použití čteček otisků prstů ve většině moderních mobilních telefonů.

2.2.1 Papilární linie

Následující sekce krátce popisují anatomii otisků prstů a jednotlivé jejich vlastnosti, které jsou pro účely rozpoznávání zajímavé. Na obrázku 2.1 je zobrazen průřez kůží, obsahující její dvě vrstvy: škáru (*dermis*) a pokožku (*epidermis*). Ve škáře se nacházejí nervy, nervová zakončení, cévy a potní žlázy. Svrchnější vrstva, pokožka, potom poskytuje ochranu kůže a obsahuje kanálky potních žláz, které na povrchu vyúsťují v pórech. Jednotlivé vrstvy pokožky se v průběhu života odlupují a jsou neustále nahrazovány novými vrstvami, které

vznikají z postupně odumírajících buněk. Při poranění pokožky tedy dojde k úplnému zahojení, nezanechávající žádné jizvy.



Obrázek 2.1: Průřez kůže, převzato a upraveno z [12].

Mezi škárou a pokožkou se nacházejí tzv. papily. Jedná se o výběžky ze škáry, které jsou zakotveny do pokožky a tím tyto dvě části kůže spojují. Papily obsahující nervová a cévní zakončení. Na vnitřních stranách prstů, dlaní a chodidel jsou tyto papily uspořádány ve velmi husté struktuře vytvářející zakřivené linie. Tyto útvary se při tvorbě pokožky promítají až na její povrch, čímž tvoří útvary, které nazýváme papilární linie (*papillary lines, ridges*). Otisk prstu je poté obrazem těchto papilárních linií. [12]

Tvar papilárních linií je vytvořen již během vývoje plodu a zůstává neměnný v průběhu života. Tento tvar je částečně dán geneticky, což způsobuje, že otisky prstů sourozenců mohou být podobné, ovšem další náhodné faktory způsobují rozdíly a tím i unikátnost otisků prstů pro každého jedince [12]. Vzhledem k průběžnému obnovování pokožky jsou tyto útvary neměnné i při drobných poraněních, které nepoškozují škáru. Zranění ovlivňující i škáru zůstávají na otiscích prstů viditelné i po jejich zahojení, otisky prstů ovšem zůstávají stále rozeznatelné, navíc obsahují další unikátní znaky. Ty mohou být také použity pro rozlišení otisků prstů [9][14].

V anglické literatuře se v souvislosti s papilárními liniemi často používají slova *ridge* a *valley* k popisu výstupků papilárních linií (tedy linií samotných) a mezer mezi těmito výstupky [18][21][22]. Tato práce bude používat pojmy *vrchol* papilární linie (*ridge*) a *údolí* mezi liniemi (*valley*). Výška vrcholů papilárních linií bývá v rozmezí 0,1 až 0,4 milimetrů s šířkou přibližně 0,2 až 0,6 milimetrů [18][10]. Avšak například [27] uvádí výšku 0,1–0,3 mm a šířku 0,3–0,6 mm.

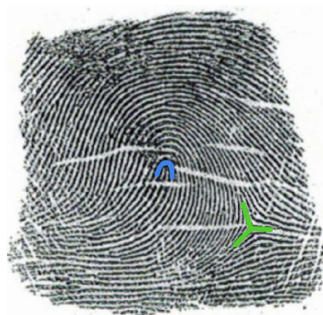
V biometrii je potřeba zkoumat směr a frekvenci papilárních linií. Směr papilární linie je dán takovým úhlem, který papilární linie v nějakém bodě snímku otisku prstu svírá s horizontální osou. Určení tohoto úhlu pro každý (nebo většinu) bodů obrázku umožňuje získat představu o orientaci papilárních linií v celém otisku. Tato informace se pak používá při rozpoznávání otisků či jejich rekonstrukci. Frekvence nebo také hustota papilárních linií je definována jako počet linií, které se nacházejí ve vymezené oblasti okolo nějakého bodu obrázku. Studium několika otisků prstů lze zjistit, že tato frekvence není v každém místě otisku prstu, ale bývá nižší v oblastech nad jádrem a pod deltou. [21]

Popsané vlastnosti dělají z otisků prstů velmi dobré biometrické rysy. V následujících sekcích jsou popsány další konkrétní vlastnosti otisků prstů, které se pro rozpoznávání používají. Mimo ně lze pro přesnější rozpoznávání použít také póry, které se na otisku prstu projevují jako bílé tečky na papilárních liniích. Avšak vzhledem k jejich velmi malé velikosti, nebývají často v otiscích prstů viditelné [12].

2.2.2 Třídy otisků prstů

Při studiu několika otisků prstů si lze na první pohled povšimnout jistých specifik. Podle směřování papilárních linií můžeme ve většině otisků prstů identifikovat dva typy zajímavých míst: jádro a deltu [9]. Souhrnně je označujeme jako singularity.

Jádro je místo přibližně uprostřed otisku prstu, kolem kterého obíhají papilární linie a vracejí se zpět v opačném směru [9][3][15]. Na obrázku 2.2 je vyznačeno modře. *Deltou* označujeme takové místo, které v otisku prstu tvoří trojúhelníkový útvar, neboť se od něj papilární linie rozbíhají do tří různých směrů [9][3][15]. Na obrázku 2.2 je delta vyznačena zeleně.

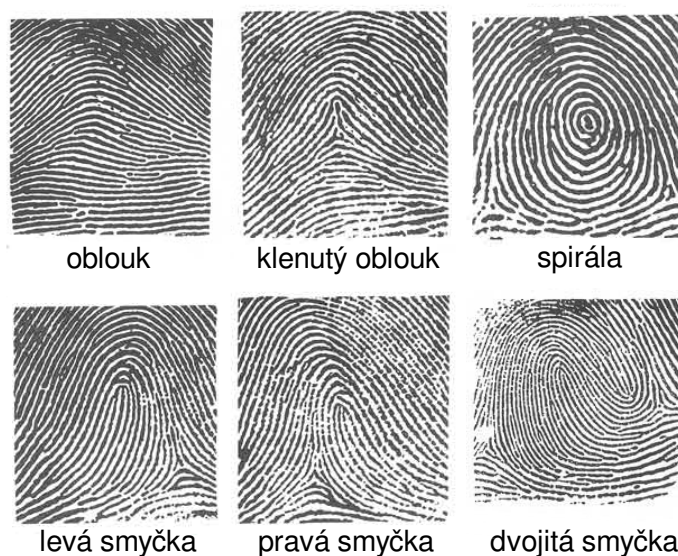


Obrázek 2.2: Jádro a delta, převzato a upraveno z [9].

Podle množství nebo směru těchto singularit můžeme otisky prstů rozdělit do několika tříd. [15] rozeznává tři základní třídy otisků prstů a jejich podkategorie (zaužívané jsou jejich anglické názvy):

- *arch* (oblouk)
 - *plain arch* (obyčejný oblouk)
 - *tented arch* (klenutý oblouk)
- smyčka (*loop*)
 - *right loop* (pravá smyčka)
 - *left loop* (levá smyčka)
- spirála (*whorl*)
 - *plain whorl* (obyčejná spirála)
 - *central pocket loop* (smyčka s centrální kapsou)
 - *double loop* (dvojitá smyčka)
 - *accidental loop* (náhodná smyčka)

Některé z uvedených tříd jsou zobrazeny na obrázku 2.3. Otisky prstů třídy *arch* nemají žádné jádro ani deltu. U *tented arch* se vyskytuje právě jedno jádro a jedna delta, kdy jádro směřuje přímo k deltě. Smyčky (*left a right*) jsou charakterizovány jednou deltou a jádrem, dostatečným zahnutím papilárních linií a počtem papilárních linií mezi jádrem a deltou (*ridge count*). Některé podtypy třídy *tented arch* jsou totiž velmi podobné smyčkám, ale chybí jim některé z uvedených potřebných vlastností. U otisků prstů ze třídy *whorl* se vyskytují dvě delty a jedno nebo dvě jádra. [18][15][9]



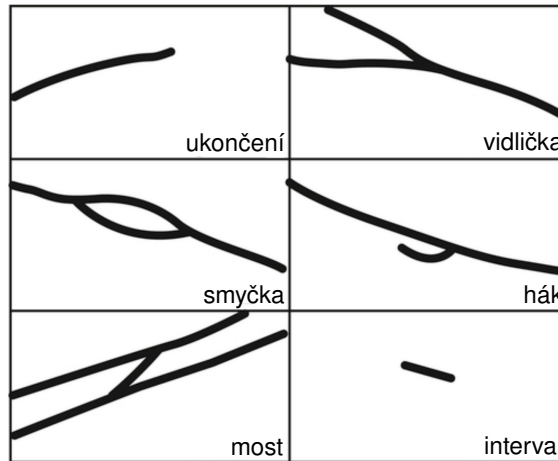
Obrázek 2.3: Třídy otisků prstů, převzato a upraveno z [15].

Třídy otisků prstů nejsou v populaci zastoupeny rovnoměrně, například smyčka se nachází u 65 % a *whorl* u 30 % populace [15]. Tato skutečnost způsobuje problémy při získání dostatečného množství vzorků otisků prstů jednotlivých tříd.

2.2.3 Markanty

Určení třídy otisků prstů by nebylo při porovnávání dvou otisků prstů dostatečné na učení jejich shodnosti. V síti papilárních linií existují význačná místa, která nazýváme markanty (*minutiae*). Jedná se o místa, kde papilární linie náhle končí nebo se rozdělují do dvou a více odlišných linií.

V daktyloskopii existuje mnoho druhů markantů, patří mezi ně například: ukončení (*ridge ending*), vidlička (*bifurcation*), smyčka (*enclosure, lake*), hák (*spur*), most (*crossover, bridge*), bod (*dot*) nebo interval (*island, independent*) [14][10]. Zmíněné markanty lze nalézt na obrázcích 2.1 a 2.4.



Obrázek 2.4: Příklady markantů, převzato z [14].

Z pohledu biometrie se ovšem v praxi používají pouze dva základní typy markantů: ukončení a vidlička. Ve skutečnosti jsou totiž všechny markanty pouze kombinací těchto dvou základních typů [14]. Například most (*crossover*) na obrázku 2.4 jsou dvě protichůdné vidličky, jejichž jedna větev se spojuje. Strojové zpracování složitějších markantů je možné, avšak výkonnostně náročnější. Jedinou výhodou je menší počet výsledných markantů, to ovšem není ve světě počítačů problémem. [18]

Kromě typu markantu existují dvě další nezbytné informace o něm. Jedná se o jeho pozici a směr. Pozici lze chápat jako dvourozměrný vektor, kde první prvek určuje jeho horizontální polohu v rámci otisku prstu a druhý prvek polohu vertikální. Směr markantu určuje jeho orientaci v rámci otisku prstu a je vyjádřen jako úhel ve stupních nebo radiánech. K určení přesné pozice markantu je potřeba specifikovat, který bod (pixel) markantu se má použít. V případě směru je potřeba stanovit kudy v rámci markantu vede vektor, jehož úhel udává právě tento směr. Příkladem specifikace bodu určujícího pozici vidličky je například nejvnitřnější bod na okraji papilární linie v místě rozdělení vidličky. Definicí směru vidličky může být úhel vektoru, který směřuje od pozice dané vidličky do údolí papilární linie, které je tvořeno jejími dvěma větvemi. Tento úhel vektor svírá s pravou horizontální poloosou. Tato specifikace je ovšem pouze příklad a různé standardy a algoritmy pro detekci markantů je mohou mít rozdílné. [21][31][30]

2.3 Získání otisku prstu

Prvním a zřejmě i nejdéle používaným způsobem získávání otisků prstů je metoda založená na inkoustu. U této metody se osobě, které jsou otisky snímány, nanese tenká vrstva inkoustu na konečky prstů a ty jsou následně přiloženy na papír. Vrcholy papilárních linií se tímto procesem obtisknou na papír, zatímco údolí mezi nimi nikoliv. [21]

U této metody můžeme mluvit o píchaném (prst byl pouze přiložen a následně zvednut) a váleném (prst byl po papíře rolován ze strany na stranu) otisku prstu. Je zřejmé, že válený otisk zachytí mnohem větší plochu prstu než ten píchaný. V obou případech může různými vlivy dojít ke zkreslení papilárních linií nebo jiným poškozením. Inkoustový způsob snímání otisků prstů je již však poněkud zastaralý. V dnešní době probíhá většina zpracování otisků prstů na počítači a takto získané otisky je tedy potřeba následně naskenovat. Prsty snímání osoby navíc zůstávají ušpiněné od inkoustu, což je zřejmě nežádoucí. Metoda ovšem stále

nachází v některých případech uplatnění v kriminalistice. Tam se lze setkat ještě se třetím typem otisku prstu – latentním. Takový otisk je získán z různých předmětů, kde je zanechán po dotyku znečištěnými nebo zpocenými prsty. Tyto otisky nemusí být na první pohled viditelné, je ovšem možné je z dotyčných předmětů získat. [21][10]

Dnes již několik desítek let existují čtečky otisků prstů. Čtečka je zařízení, které dokáže snímat papilární linie na prstu pomocí specializovaného senzoru. Výstupem takového senzoru je potom analogový nebo digitální signál, který reprezentuje daný otisk prstu. V případě analogového signálu je následně použit analogově digitální převodník a obraz otisku prstu může být přenesen do počítače. [21]

Existují tři hlavní kategorie senzorů. První kategorií jsou senzory **dotykové** (*touch*), u kterých je při snímání potřeba prst přiložit na vymezenou plochu senzoru. Tato plocha musí být samozřejmě dostatečně velká, aby pokryla, jakkoliv velký prst. Senzory z této kategorie se musejí potýkat s latentními otisky prstů, které zůstávají na ploše senzoru a mohou ovlivňovat snímání dalších otisků, a se špínou, která se může na snímací plochu dostat. [18]

Další kategorií jsou **průtahové** (*swipe, sweep*) senzory. Jejich šířka je podobná dotykovým senzorům, ale jejich výška je podstatně menší – jen několik milimetrů. Snímání probíhá tak, že uživatel posouvá svůj prst přes plochu senzoru, čímž postupně vzniká nasnímaný otisk. Tyto senzory bývají levnější a nejsou náchylné na latentní otisky nebo špínu na senzoru, neboť vlastní proces snímání sensor zbavuje nečistot. Nicméně z uživatelského hlediska je tento proces o něco složitější, jelikož musí být dodržena konstantní a správná rychlost pohybu pro vytvoření dobrého výsledného otisku prstu. Tento výsledný otisk navíc musí být poskládán z více částečných, čímž se do procesu zanáší další zpracování a možné chyby. [18]

Poslední kategorií jsou **bezkontaktní** (*contactless*) senzory, u kterých není potřeba přikládat prst na žádné místo. Stačí, pokud je prst ve správné pozici relativně k senzoru. Díky tomu se na senzor nedostanou latentní otisky prstů nebo špína. Na druhou stranu bývají čtečky s bezkontaktním senzorem větší a nákladnější a nehodí se tedy pro každé použití. Uživatelům navíc může dělat potíže umístit prst na správné místo. [18]

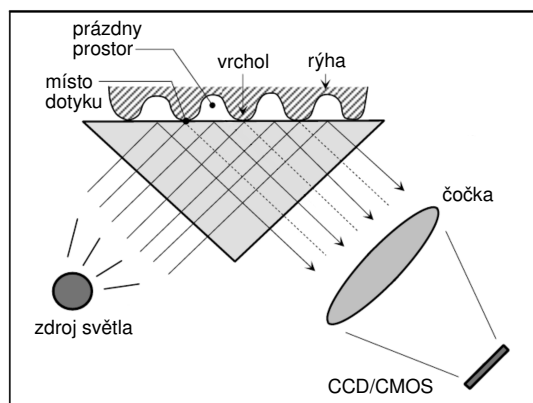
Dále můžeme senzory otisků prstů rozdělit podle technologie, kterou používají, některé z těchto používaných technologií jsou popsány v následujících sekcích.

2.3.1 Optická technologie

Jedná se o jednu z nejstarších technologií používaných pro snímání otisků prstů. Postaveny jsou na principu *Frustrated Total Internal Reflection (FTIR)*. [21][18]

Proces je naznačen na obrázku 2.5. Snímaný prst je přiložen na skleněný hranol, který je z jedné strany prosvícen zdrojem světla (například LED diodami). Výstupky papilárních linií, které jsou přiložené na skleněný povrch hranolu, dopadající světlo rozptýlí, zatímco místa mezi nimi, kde údolí papilárních linií nejsou v přímém kontaktu, světlo odrazí. Paprsky světla vycházející na druhé straně hranolu jsou zaměřeny čočkou na *CCD (charge-coupled device)* nebo *CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor)* kameru. Na výsledném snímku jsou potom jednotlivé linie tmavé, zatímco prostor mezi nimi světlý. [21][22]

Existují i bezkontaktní varianty, kdy se nemusí prst dotýkat skleněného hranolu [18][10]. V jiných variantách se místo jednoho velkého hranolu může použít i vrstva skládající se z několika menších hranolů nebo optická vlákna, princip ovšem zůstává podobný [21][22].

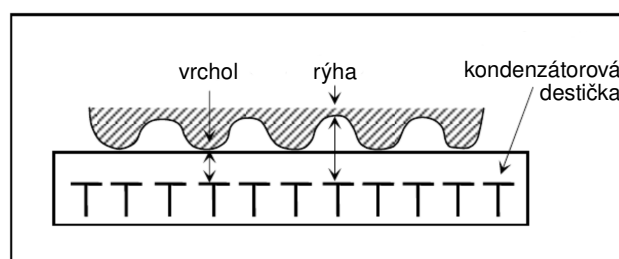


Obrázek 2.5: Optický senzor otisků prstů, převzato a upraveno z [21].

Vzhledem k tomu, že senzor snímá prst ve 3D, nelze jej snadno ošálit 2D snímkem otisku prstu [21]. Na druhou stranu je tato technologie ze své podstaty velmi náchylná na ušpiněné prsty. Na skleněném povrchu mohou také zůstat latentní otisky prstů, které následně kontaminují nasnímaný otisk prstu (v případě kontaktního senzoru). [18]

2.3.2 Kapacitní technologie

Kapacitní senzor je tvořen dvourozměrnou sítí malých kondenzátorových destiček. Po přiložení prstu se jeho kůže stává druhou stranou kondenzátoru, čímž vzniká drobný náboj mezi prstem a senzorem, který může být změřen. Rozdílná vzdálenost mezi vrcholy a údolími papilárních linií k ploše senzoru poté vytváří rozdílný potenciál, který udává výsledný nasnímaný signál. Schéma takového senzoru je možno vidět na obrázku 2.6. [21][18][22]

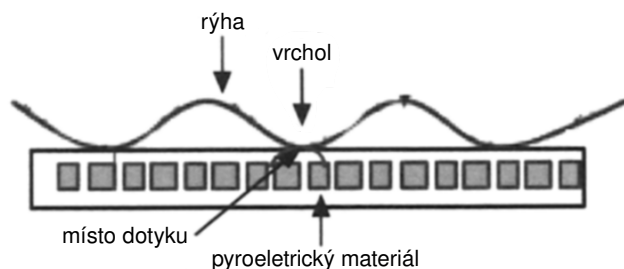


Obrázek 2.6: Kapacitní senzor otisků prstů, převzato a upraveno z [21].

Senzor je potřeba ochránit před poškozením způsobeným elektrostatickými výboji, korozi (vlivem chemikálií obsažených v potu) nebo fyzickým poškrábáním. Z toho důvodu je senzor potřeba patřičně uzemnit a ochránit protektivní vrstvou, která by ovšem měla být co nejtenčí, neboť snižuje detekční vlastnosti senzoru. [21][18][22]

2.3.3 Termická technologie

Senzor založený na termické technologii využívá pyroelektrické materiály, které generují proud na základě teplotních rozdílů. Části kůže, které se přímo dotýkají povrchu (vrcholy papilárních linií) tvoří rozdílný teplotní potenciál oproti údolím mezi nimi. Nahřívání samotného senzoru pomáhá zvýšit tento teplotní rozdíl, čímž je docíleno vyšší rozlišitelnosti papilárních linií. Schéma termického senzoru lze vidět na obrázku 2.7. [21][18]

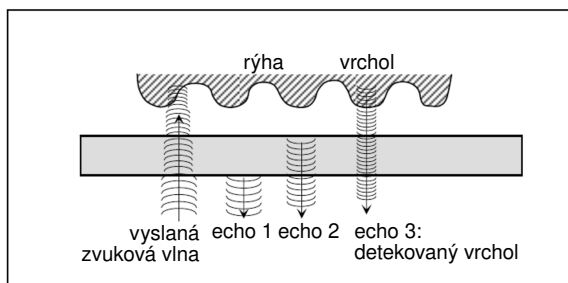


Obrázek 2.7: Termický senzor otisků prstů, převzato a upraveno z [22].

Vzhledem k tomu, že se teplotní rozdíly vcelku rychle vyrovnávají, je tato technologie vhodnější pro průtahové senzory otisků prstů než pro ty dotykové. Výhodou je zejména vysoká odolnost proti elektrostatickým výbojům. Díky přenosu teplotní informace, místo elektrické, může být ochranná vrstva na povrchu senzoru podstatně tlustší než například u kapacitních senzorů. Tyto senzory nicméně spotřebovávají větší energii než ostatní technologie. Jejich použití při vyšší okolní teplotě snižuje jejich rozlišitelnost vrcholů a údolí, neboť teplotní rozdíl mezi nimi není až tak velký. [21][18][22]

2.3.4 Ultrazvuková technologie

Senzory postavené na této technologii se skládají z vysílače a přijímače. Vysílač vyšle k prstu akustický signál, který je v kůži reflektován zpět směrem k přijímači. Touto metodou je změřena hloubková mapa kůže – struktura papilárních linií. [21] Princip je naznačen na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Ultrazvukový senzor otisků prstů, převzato a upraveno z [21].

Modifikací frekvence akustického signálu lze dosáhnout různého rozlišení otisku prstu, kdy vyšší frekvence znamenají vyšší rozlišení. Díky tomu lze ultrazvukovou technologií dosáhnout nejlepší kvality výsledných otisků prstů v porovnání s ostatními technologiemi. Senzor snímá strukturu i pod povrchem kůže, a nikoliv jen na něm, tudíž je jeho výhodou také odolnost vůči ušpiněným prstům nebo drobným poraněním pokožky. Díky tomu má tato metoda také lepší odolnost proti umělým prstům (falzifikátům). Nevýhodou je zejména velikost zařízení a jeho cena. [21][18][22]

Kapitola 3

Rozpoznávání podle otisků prstů

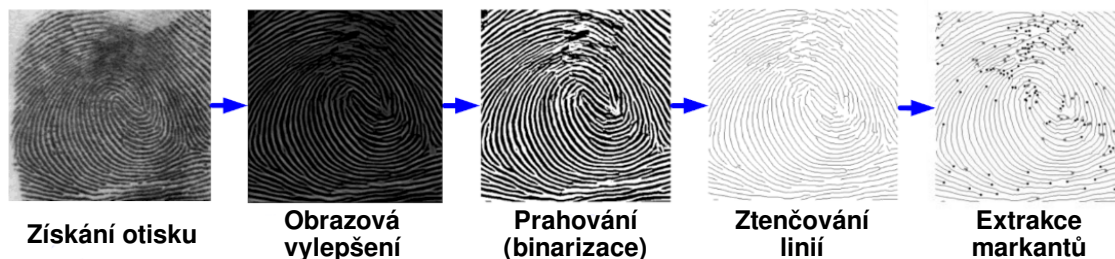
Po úspěšném získání obrázku otisku prstu dochází k samotnému rozpoznávání. Toho by šlo docílit například přímým porovnáním dvou takových obrázků – pixel po pixelu dané obrázky porovnat a určit, jestli se shodují. Jenže tato naivní metoda nemůže správně fungovat. Pokud by otisky prstů pocházely z různých senzorů nebo byl naskenován válený a píchaný otisk prstu, budou zajisté naprosto rozdílné (zejména pokud uvažujeme porovnání na úrovni pixelů).

Lze tedy očekávat, že pro efektivní a úspěšné porovnávání bude potřeba ze samotného obrázku extrahovat některé informace. Z informací v sekci 2.2 lze uvažovat papilární linie (jejich směr, hustotu a celkovou strukturu), třídu otisku prstu (a pozice jádra a delty) nebo markanty (jejich typ, polohu a orientaci). Porovnání na základě třídy otisku prstu by vytvořilo spíše nefunkční systém – tříd není mnoho, navíc jak bylo zmíněno v sekci 2.2, otisky prstů třídy smyčka disponuje více než polovina populace. Třída je ovšem vhodná pro rychlé rozhodnutí, že se dané otisky určitě neshodují. U velkých databází se může jednat o znatelnou optimalizaci [18].

Metody založené na porovnání papilárními liniemi existují, ale jejich rozlišovací schopnost není vysoká [10]. Jiné metody využívají pro rozpoznávání a následnou verifikaci či identifikaci neuronové sítě [19][2][1]. I přes vysokou popularitu neuronových sítí v současné době, stále nejrozšířenější a nejspolehlivější metodou je porovnávání na základě markantů. Není určité náhodou, že se podobně postupuje v daktyloskopii při manuálním porovnávání dvou otisků prstů – vyznačí se markanty a porovnává se jejich pozice, typ a směr.

3.1 Extrakce markantů

Aby bylo možné porovnávat otisky prstů na základě markantů je nejprve potřeba markanty z obrázku otisku prstu získat. Schéma procesu extrakce markantů lze vidět na obrázku 3.1. Prvním krokem je získání samotného obrázku v digitální podobě, tento proces byl popsán v sekci 2.3.



Obrázek 3.1: Proces rozpoznávání podle otisků prstu, převzato a upraveno z [18].

3.1.1 Vylepšení obrazové kvality

Úspěšnost extrakce markantů je velmi závislá na kvalitě samotného snímku otisku prstu. Ideální otisk prstu by měl mít jasně definované papilární linie, které v lokálním okolí mají přesně daný směr, a lze je tedy jednoduše rozeznat od pozadí a detekovat v nich markanty. V reálných otiscích však mohou mít papilární linie příliš nízký kontrast, mohou být příliš široké a tím pádem jedna do druhé splývají, nebo může být snímek příliš zašuměný. Kvalitu také snižují onemocnění kůže nebo vady použitého senzoru otisku prstu (viz sekce 2.3). Příčiny a dělení těchto vlivů lze také nalézt v sekci 4.2. [13][21][11]

Z výše uvedených důvodů je v dalším kroku extrakce markantů potřeba snímek otisku prstu vylepšit tak, aby byla dosažena co nejlepší možná úspěšnost detekce. Kvůli zmíněným poškozením se stává, že papilární linie jsou ve snímku v některých místech přerušené. Jedním z cílů vylepšování je tedy pokusit se tyto vady odstranit a do obrázku papilární linie doplnit. Některá místa mohou být však natolik poškozená, že je naopak lepší je z obrázku úplně odstranit. V těchto regionech by totiž mohly být chybně detekovány markanty, které se na otisk prstu vůbec nevyskytují. [13][21]

Na počátku obvykle dochází k **normalizaci** a zlepšení kontrastu snímku. Toho je dosaženo metodami jako škálování histogramu, lineární rozšíření kontrastu (*linear contrast stretching*) pomocí lokálního minima a maxima nebo normalizací intenzity pixelů, pomocí lokální průměrné hodnoty intenzity a jejího rozptylu. Výsledkem tohoto kroku, avšak může být i obrázek, který má horší rozlišitelnost popředí a pozadí než původní snímek. Důvodem je zvýšení kontrastu i okolního šumu, který se stává podstatně zřetelnější. I přes tento nežádoucí efekt je zvyšování a normalizace kontrastu papilárních linií důležitá pro další zpracování. [13][11][21][16][23]

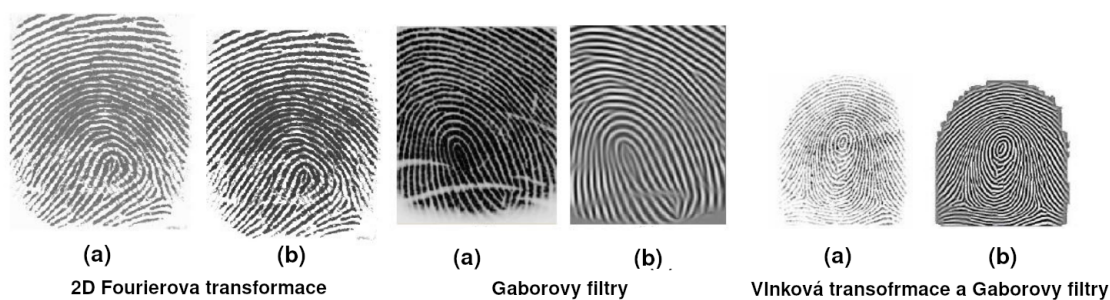
Aby mohly být dokresleny papilární linie i v místech, kde se v původním obrázku nevyskytují, je potřeba určit jejich směr v těchto bodech. Toho je docíleno pomocí odhadu **směrového pole**. Existuje několik metod, jako například odhad na základě gradientů intenzit bodů obrázku v horizontálním a vertikálním směru [21][13] nebo pomocí dvojrozměrné Fourierovy transformace [17]. Jelikož tyto metody odhadují směrové pole lokálně, poškozené části otisku jako například jizvy mohou ve svém okolí zkreslit výslednou orientaci. Tento problém lze vyřešit následným vyhlazením směrového pole na základě většího okolí. To ale může způsobit další potíže v místech s velkými změnami směru papilárních linií (například v okolí singularit), kde okolní papilární linie mají ve skutečnosti mít velmi odlišný směr. To stejné platí v případech, kdy je celková kvalita odhadu směrového pole nízká, neboť lokálně způsobená chyba je propagována do zbytku pole. V každém případě je dobré umět určit míru jistoty v odhadnuté směrové pole. [11][13][21][23]

Kromě směrového pole bývá k dokreslení papilárních linií potřeba znát i jejich frekvenci, tedy **pole hustoty** papilárních linií. Dříve zmíněná 2D Fourierova transformace [17] dokáže

kromě směrového pole odhadnout i pole hustoty. Jiná metoda využívá informaci o změně intenzity pixelů po přímce vedoucí pravoúhle k papilární linii, tak aby neprocházela žádným markantem. Tyto intenzity poté tvoří sinusoidální funkci, která udává i frekvenci papilárních linií v dané oblasti. Podobně jako u směrového pole bývá využito vyhlazování. Požadavek na neexistenci markantů v místě odhadu frekvence papilárních linií je dán z toho důvodu, že jejich výskyt ovlivňuje okolí a tím i jejich lokální hustotu. Při následném vyhlazování pole hustoty by mohlo dojít k chybné eliminaci těchto markantů. [11][13][23]

Posledním krokem je samotné **vylepšení papilárních linií**. Podstatou je vytvoření nové struktury, která odpovídá papilárním liniím v původním obrázku, tedy jejich frekvenci a jejich směru. Toho lze dosáhnout například 2D Fourierovou transformací a následnou filtrací ve frekvenční doméně, pomocí Gaborových filtrů nebo vlnkové transformace společně s Gaborovými filtry. V případě Fourierovy transformace je snímek ve frekvenční oblasti filtrován 16 Butterworth filtry, kde každý je nastaven do jedné z 16 orientací, které byly v této metodě dříve použity k určení směrového pole. Následně je snímek převeden zpět do časové oblasti inverzní Fourierovou transformací. Následně musí být ještě filtrovaný snímek upraven pomocí intenzit pixelů v původním obrázku, čímž dojde k rekonstrukci papilárních linií a vzniká finální vylepšený snímek. [23][11]

Metoda založená na Gaborových filtrech využívá zvláště získané směrové pole a pole hustoty. Gaborovy filtry mají vlastnosti, umožňující jak selekci směru, tak frekvence, čímž se na tento úkol skvěle hodí. Je připravena sada filtrů podle lokálních orientací a frekvencí v obrázku a snímek je jimi filtrován. Výsledkem je vylepšený snímek otisku prstu. V poslední zmíněné metodě je před samotným filtrováním Gaborovými filtry provedena navíc vlnková transformace. Jejím cílem je odstranění šumu v obrázku. Během této transformace je původní snímek rozložen na několik menších částí, z nichž jsou určeny vlnkové koeficienty. Gaborovo filtrování následně probíhá na těchto menších částech. Na závěr je potřeba provést rekonstrukci celkového snímku. Na obrázku 3.2 je možné vidět srovnání výsledků tří popsaných metod, (a) je původní snímek, (b) snímek vylepšený. [23]



Obrázek 3.2: Porovnání výsledků metod pro vylepšení snímku., převzato a upraveno z [23].

3.1.2 Prahování a ztenčování linií

Po úpravách přichází na řadu krok prahování (binarizace). Účelem tohoto kroku je získat jednoduchý obrázek s černými papilárními liniemi a bílým pozadím. Každý pixel obrázku je porovnán s prahem a je mu určena odpovídající barva (černá, bílá). Naivní metoda s jedním globálním prahem pro celý obrázek není příliš účinná. I přes normalizaci kontrastu a odstranění šumu v předchozích krocích, je stále možné, že různé části snímku mají rozdílný kontrast mezi papilárními liniemi a pozadím. Jediný práh by v takovém případě mohl odstranit papilární linie v místech kde jsou příliš světlé, nebo naopak odstranit pozadí

v místech, kde je příliš tmavé. V praxi se používají různé metody s adaptivním prahem pro binarizaci pro menší části obrázku. [21]

V této části procesu jsou papilární linie již jasně oddělitelné od pozadí, ale jejich šířka je několik pixelů a navíc proměnlivá. Pro snadnější detekci markantů je tedy potřeba v předposledním kroku tyto linie ztenčit přesně na šířku jednoho pixelu, výslednému obrázku se říká kostra papilárních linií. Pokud však snímek otisku prstu obsahoval póry, které nebyly během vylepšování kvality odstraněny, projeví se v binarizovaném snímku jako bílé tečky na papilárních liniích. Ty mohou způsobit přerušování v linii ve vytvořené kostře, které může být detekováno jako markant ukončení. Podobné problémy s falešně detekovanými markanty mohou způsobit nerovnosti na okrajích papilárních linií, které mohou při ztenčování vytvořit výběžky na kostře. V některých případech by naopak mohlo dojít k odstranění skutečného markantu. Řešením těchto problémů může být algoritmus pro vyplňování děr a mezer v papilárních liniích nebo srovnávání šířky linií v celém obrázku. Samotné ztenčování linií lze pak provádět řadou dalších algoritmů, které jsou používány například ve vektorizaci kreseb a map, rozpoznávání znaků a podobně. [21]

3.1.3 Detekce markantů

Nakonec následuje samotné detekování markantů a určení jejich vlastností – pozice, typ a směr. Jak bylo uvedeno v sekci 2.2 v části o markantech, detekovány bývají jen ukončení a vidličky. K detekci lze použít například tzv. *crossing number*, které je počítáno pro každý bod v kostře papilárních linií z rozdílů hodnot bodů v 8-okolí tohoto bodu. Podle výsledné hodnoty je poté určeno, zdali se jedná o bod na papilární linii, ukončení, vidličku nebo složitější markant. Existují však i další přístupy, některé z *crossing number* vycházejí, jiné definují speciální operátory, který umějí zadané markanty rozpoznat. Další možností je i využití neuronových sítí. V některých postupech není ani vyžadováno předchozí ztenčení papilárních linií. Po detekci markantu je známa jejich pozice a zbývá určit jeho úhel. To spočívá v určení směru podle orientace papilární linie, na které leží, a určení správného kvadrantu na základě okolních bodů papilární linie (kterým směrem linie pokračuje). [21]

Všechny dosud zmíněné metody pracují nad binarizovaným snímek otisku prstu. Existuje však celá řada dalších postupů, které vycházejí z původního černobílého snímku. Výhodou těchto algoritmů je jednak časová úspora oproti nutnosti prahovat obrázek a ztenčovat linie, ale také větší odolnost proti falešným papilárním liniím, které mohou vznikat při ztenčování. Tyto algoritmy vycházejí a případně vylepšují původní návrh od autorů Maio a Maltoni v článku [20]. Jejich algoritmus sleduje jednu papilární linii, dokud nedojde na její konec (ukončení), místo, kde se štěpí (vidlička), nebo ji neprojde celou. Posun po papilární linii probíhá ve směru proudění linie podle směrového pole a v každém kroku dochází k určení lokálního maxima intenzity pixelů v následující oblasti. Takto zvolené maximum je pak dalším bodem detekované papilární linie. Po nalezení markantu nebo projití celé linie je kontrolována další, čímž jsou postupně nalezeny všechny markanty. Aby se zabránilo opakované kontrole stejné papilární linie, je průběžně vytvářen pomocný obrázek již viděných bodů, které se již znovu nekontrolují. Zmíněná vylepšení tohoto algoritmu zahrnují například adaptivní úpravu parametrů algoritmu pro práh kontrastu papilární linie pro různé části snímku nebo průchod po více papilárních liniích současně. [21]

Jak bylo zmíněno v sekci 2.2, určení směru a pozice markantu také záleží na specifikaci dané aplikace pro rozpoznávání či standardu pro biometrickou šablonu. V sekci 3.3 lze nalézt takovou specifikaci pro biometrickou šablonu podle standardu ISO/IEC 19794-2.

3.2 Porovnávání markantů

Porovnávání markantů je problematika porovnávání dvou vzorů. Nejprve bývá nalezen globální překryv (otisky prstu jsou zarovnány) a následuje hledání lokálního překryvu (porovnávají se jednotlivé markanty). V průběhu porovnávání dochází k translaci, rotaci a dalším geometrickým operacím, aby bylo dosaženo co nejlepšího překryvu. Některé metody umožňují i deformace souřadnic markantů, čímž kompenzují chyby způsobené vlivem elasticity kůže. Při výsledném porovnání nemusí všechny markanty přesně odpovídat, neboť je stanovena jistá oblast tolerance pokrývající chyby v průběhu snímání. Algoritmy musí počítat i se skutečností, že některé markanty (zejména ty na okrajích otisku prstu) nemusejí být v jednom nebo druhém otisku vůbec detekovány. [10][21]

Výsledkem porovnání není binární informace, zdali jsou otisky prstů shodné či ne, ale skóre porovnání (*similarity score*, *matching score*) [21][10]. Biometrický systém má pak stanoven práh citlivosti, podle kterého se určí, zdali získané skóre odpovídá shodě či neshodě. Zvyšováním prahu lze tedy kontrolovat bezpečnost systému. Jako příklad definice skóre porovnání lze uvést

$$s = \frac{k}{\frac{(n+m)}{2}},$$

kde k označuje počet shodných markantů, n počet markantů v prvním otisku, m počet markantů v druhém otisku a s je výsledné skóre [21]. V tomto příkladu je skóre normalizovaná hodnota v rozmezí 0–1, nicméně obecně může být z libovolného intervalu [10]. Kromě shodnosti markantů se mohou na hodnotě skóre podílet i další informace, jako například kvalita markantů, kvalita původního snímku otisku prstu a další [21].

3.3 Biometrické šablony

Pro přímé porovnávání dvou právě získaných otisků prstů by nebylo potřeba extrahované informace (nejčastěji markanty, viz sekce 3) nikam ukládat. Pokud je ovšem budován biometrický systém s registrací uživatelů a jejich následnou identifikací či verifikací, je potřeba informace získané z otisků prstů ukládat do databáze ve známém formátu. Z takové databáze jsou poté při identifikaci či verifikaci tyto informace získávány a porovnávány s těmi získanými v danou chvíli od uživatele. Takto uložené otisky prstů nazýváme biometrické šablony.

Drtivá většina výrobců biometrických systémů založených na otiscích prstů využívá své vlastní, proprietární, šablony. Tyto proprietární šablony mohou uchovávat libovolné informace, které daný výrobce pro jeho systém vyžaduje a jejich specifikace nemusí být veřejná. Z pohledu interoperability mezi systémy by ovšem bylo žádoucí, aby existoval pouze jeden formát biometrické šablony, který lze použít v libovolném systému. Řešením jednoho formátu biometrické šablony by měl být jasný nadnárodní standard, specifikující všechny náležitosti formátu šablony, jako jsou povinná a volitelná pole, jejich význam a jednotky v jakých jsou jejich hodnoty uvedeny. Existuje však několik různých standardů, v různých verzích, které se v některých důležitých aspektech zásadně liší (a to i mezi jednotlivými verzemi). [21] Tyto standardy navíc nebývají v průmyslu příliš akceptovány a od toho se odvíjí i četnost jejich skutečného využití.

Jako příklady existujících standardů lze uvést ISO/IEC 19794-2:2005 a jeho poslední revize ISO/IEC 19794-2:2011 nebo ANSI INCITS 378-2004 a jeho revize ANSI INCITS

378-2009[R2014], ANSI INCITS 378:2009/AM 1:2010[R2015] a poslední z roku 2019. Jejich hlavní principy budou v krátkosti popsány v následujících sekcích.

3.3.1 ISO-IEC 19794-2

Samotný standard [28] není veřejně dostupný, nicméně v době řešení této práce bylo možné do něj nahlédnout online. Existuje ovšem i legálně veřejně dostupné shrnutí základních informací, důležitých pro tvorbu programů pracujících s tímto standardem, viz webová stránka [31]. Následující popis bude z tohoto shrnutí pro jednoduchost vycházet. Uváděné informace byly navíc porovnány se samotným standardem. Shrnutí popisuje verzi standardu z roku 2005 s její korekcí v roce 2009, která je již dnes nahrazena revizí z roku 2011. Shrnutí k této novější revizi bylo ovšem dostupné až později a tato diplomová práce již počítala s prací se standardem z roku 2005. Krátké shrnutí rozdílů mezi těmito dvěma verzemi lze nalézt na konci této sekce.

ISO/IEC 19794-2:2005 ukládá zejména markanty, a to jejich pozici, směr a typ (vidlička, ukončení nebo *jiné*). Navíc jsou uloženy metadata otisku prstu, jako například pozice prstu (tzn. o který prst se jedná a na které ruce), a dodatečné informace formou rozšíření, které si výrobci mohou sami specifikovat. Jedna šablona může obsahovat více otisků prstů. Kromě základní šablony, která je popsána v následujícím textu, specifikuje standard další dvě šablony, které slouží pro použití na čipových kartách.

Tabulka 3.1 obsahuje strukturu hlavičky šablony. Pole **MAGIC** musí obsahovat konstantní hodnotu `FMR\0` (`\0` značí byte s hodnotou 0) a slouží k rozeznání šablony od jiných formátů, pole **VERSION** musí mít hodnotu `20\0` a slouží k rozlišení verze šablony od novějších verzí. **TOTALBYTES** obsahuje celkovou velikost šablony v bytech jako neznaménkové 32-bitové číslo kódované jako big-endian. Nicméně hodnota musí být vyšší než 24 bytů, neboť menší hodnota by nedokázala pokrýt ani 24 bytovou hlavičku. Význam ostatních polí hlavičky je zřejmý z jejich názvu nebo pro tuto práci nezajímavý, šířka a výška jsou udány v pixelech, rozlišení v pixelech na centimetr.

Tabulka 3.1: Hlavička šablony podle ISO/IEC 19794-2:2005.

Délka	Kód	Název
24 B	HEADER	Hlavička šablony
4 B	MAGIC	Magické číslo
4 B	VERSION	Verze formátu
4 B	TOTALBYTES	Celková délka šablony
4 b	DEVSTAMP	Informace o senzoru
12 b	DEVID	ID senzoru
2 B	WIDTH	Šířka původního obrázku
2 B	HEIGHT	Výška původního obrázku
2 B	RESOLUTIONX	Horizontální rozlišení (v pův. obr.)
2 B	RESOLUTIONY	Vertikální rozlišení (v pův. obr.)
1 B	FPCOUNT	Počet otisků prstů v šabloně
1 B		Neznámé

Po hlavičce šablony následují záznamy otisků prstu, těch je přesně **FPCOUNT**. Formát těchto záznamů je ukázán v tabulce 3.2. Pole **POSITION** udává pozici prstu na ruce, ze kterého byl otisk prstu sejmuto. Možné hodnoty jsou 0 až 10, kde 0 značí neurčený typ prstu, 1 až 5 palec až malíček pravé ruky a zbývající hodnoty palec až malíček ruky levé.

Jelikož šablona umožňuje uložit více otisků stejného prstu, pole **VIEWOFFSET** udává index, nebo pořadí otisku pro otisky stejného prstu. **SAMPLETYPE** udává jakým způsobem byl otisk prstu sejmuto. Možné hodnoty jsou obyčejný (pravděpodobně pícháný způsob sejmutí otisk prstu), rolovaný a průtahový. Pro obyčejné a rolované otisky lze navíc specifikovat i živost detekovanou při snímání (živý, neživý). **FPQUALITY** udává celkovou kvalitu otisku prstu s hodnotami 0 (nejhorší) až 100 (nejlepší), jak měřit kvalitu lze dohledat v standardu ISO/IEC 19784-1:2006. Pole **MINCOUNT** určuje počet markantů v rámci daného záznamu otisku prstu, za nímž i následuje tento počet záznamů markantů, viz tabulka 3.3.

Po záznamech markantů se nacházejí rozšiřující data pro daný otisk prstu. Ty mohou být specifikována samotným výrobcem. Standard však specifikuje tři typy rozšiřujících dat: počet papilárních linií mezi páry markantů, informace o jádrech a deltách a zónová data o kvalitě (tabulky 3.4, 3.5 a 3.6).

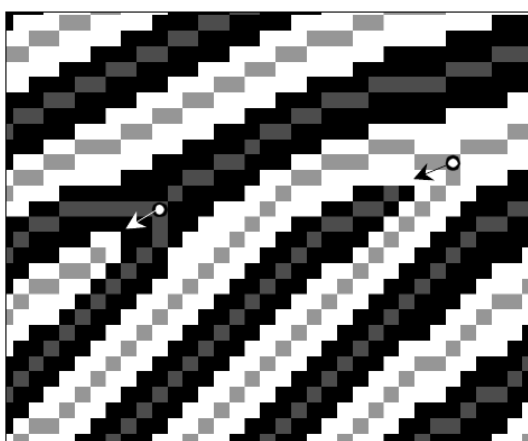
Tabulka 3.2: Záznam jednoho otisku prstu v šabloně podle ISO/IEC 19794-2:2005.

Délka	Kód	Název
>6 B	FINGERPRINT	Otisk prstu
1 B	POSITION	Pozice prstu na ruce
4 b	VIEWOFFSET	Index otisku prstu pro daný prst
4 b	SAMPLETYPE	Typ snímání
1 B	FPQUALITY	Kvalita otisku prstu
1 B	MINCOUNT	Počet markantů
	MINUTIA	MINCOUNT záznamů markantů
2 B	EXTBYTES	Celková délka rozšiřujících dat
<i>EXTBYTES</i> B	EXTENSIONS	Rozšiřující data

V tabulce 3.3 je zobrazen formát záznamů markantů. **MINTYPE** určuje jeho typ, možné hodnoty jsou 01 (ukončení), 10 (vidlička) a 00 (jiné). Horizontální i vertikální pozice markantu je uvedena v pixelech, zleva doprava, shora dolů, počínaje nulou. Jedná se o 14-bitová neznaménková čísla. **MINANGLE** určuje úhel vektoru udávajícího směr markantu s hodnotami 0–255, kde 0 znamená směr vpravo a úhel roste proti směru hodinových ručiček. Při ukládání šablony je nutný úhel ve stupních či radiánech přepočítat a kvantovat do tohoto rozmezí. Při čtení šablony je pak nutný opačný proces. Úhel ukončení je definován jako průměr z úhlů údolí papilárních linií, které obklopují právě ukončenou papilární linii. Tento úhel tedy směřuje dovnitř papilární linie. V případě vidličky je její úhel dán jako průměr z úhlů dvou papilárních linií, které se papilární linie rozdvojuje. Tento úhel tedy směřuje k údolí papilární linie mezi těmito dvěma větvemi. Na obrázku 3.3 lze vidět pozice a úhly obou popsaných markantů. **MINQUALITY** má podobný význam jako **FPQUALITY** u záznamu otisku prstu, ovšem její význam není nikde přesně specifikován.

Tabulka 3.3: Záznam jednoho markantu v šabloně podle ISO/IEC 19794-2:2005.

Délka	Kód	Název
6 B	MINUTIA	Markant
2 b	MINTYPE	Typ markantu
14 b	MINX	Horizontální pozice markantu
2 b		Rezervováno
14 b	MINY	Vertikální pozice markantu
1 B	MINANGLE	Úhel markantu
1 B	MINQUALITY	Kvalita markantu



Obrázek 3.3: Pozice a směr ukončení (černá šipka) a vidličky (bílá šipka) podle ISO/IEC 19794-2:2005, převzato z [21].

Tabulka 3.4 zobrazuje hlavičku sekce s rozšířeními, která je pokračováním tabulky 3.2. Polem `EXTTYPE` je určen typ rozšíření. Možné hodnoty jsou `0x0001` (počty papilárních linií, tabulka 3.5), `0x0002` (informace o jádru a deltě, tabulka 3.6), `0x0003` (zónová data) a `0x0101–0xFFFF` pro rozšíření definovaná výrobcem. V dalším poli se nachází délka rozšiřujících dat a následují samotná rozšiřující data.

Tabulka 3.4: Hlavička záznamu jednoho rozšíření v šabloně podle ISO/IEC 19794-2:2005.

Délka	Kód	Název
<i>EXTBYTES</i> B	EXTENSIONS	Rozšíření
2 B	EXTTYPE	Typ rozšíření
1 B	EXTLEN	Délka dat rozšíření
<i>EXTLEN</i> B	EXTDATA	Data rozšíření

V tabulce 3.5 se nachází tvar dat pro rozšíření udávající informace o počtech papilárních linií mezi páry markantů. První pole `METHOD` udává metodu, která byla použita pro extrakci této informace z otisku prstu, standard definuje tři možné hodnoty: *custom*, *quadrants*, *octants*. Další dvě pole specifikují počáteční a ukončující markant jako index do seznamu markantů v sekci `MINUTIA`, mezi kterými byl počet papilárních linií spočítán. Poslední pole `RIDGECOUNT` pak udává samotný jejich počet.

Tabulka 3.5: Záznam s počty papilárních linií v šabloně podle ISO/IEC 19794-2:2005.

Délka	Kód	Název
>4 B	RIDGECOUNT	Počty papilárních linií mezi dvěma markanty
1 B	METHOD	Metoda extrakce počtu papilárních linií
1 B	EDGEFROM	Index do seznamu markantů počátečního markantu
1 B	EDGETO	Index do seznamu markantů ukončujícího markantu
1 B	RIDGECOUNT	Počet papilárních linií mezi EDGEFROM a EDGETO
		Další záznamy počtu papilárních linií

V tabulce 3.6 je zobrazen záznam rozšiřujících dat s informací o jádrech a deltách v otisku prstu. Záznam je rozdělen na část o jádrech a část o deltách. V každé části je nejprve uveden počet daných singularit jako 4-bitové číslo, za kterým následuje odpovídající počet záznamů dané singularity. Pole CHASANGLE a DHASANGLE určují, jestli záznam obsahuje informaci o úhlu (0b1), či nikoliv (0b0). Informace o úhlu se nachází v polích CORENALGE a DELTAANGLE. V případě jádra jde o úhel nejbližší papilární linie k pozici jádra (tečny papilární linie k horizontální ose). V případě delty jde o tři úhly tří papilárních linií v místě, kde se rozbíhají. Podobně jako u úhlů markantů je hodnota přepočítána a kvantována na hodnoty 0–255. Pozice singularit jsou uvedeny jsou vyjádřeny v pixelech jako souřadnice X a Y.

Tabulka 3.6: Záznam s informacemi o deltě a jádru v šabloně podle ISO/IEC 19794-2:2005.

Délka	Kód	Název
>12 B	COREDELTA	Informace o jádru a deltě
4 b		Rezervováno
4 b	CORECOUNT	Počet záznamů jader
1 b		Rezervováno
1 b	CHASANGLE	Udává, zdali je obsažena informace o úhlu
14 b	COREX	Horizontální pozice jádra
2 b		Rezervováno
14 b	COREY	Vertikální pozice jádra
1 B	COREANGLE	Úhel jádra, pouze pokud CHASANGLE není 0b00
CORECOUNT - 1		Další záznamy jader
4 b		Rezervováno
4 b	DELTACOUNT	Počet záznamů delt
1 b		Rezervováno
1 b	DHASANGLE	Udává, zdali je obsažena informace o úhlu
14 b	DELTAX	Horizontální pozice delty
2 b		Rezervováno
14 b	DELTAY	Vertikální pozice delty
3 B	DELTAANGLE	Úhly delty, pouze pokud DTYPE není 0b00
DELTACOUNT - 1		Další záznamy delt

Korekce z roku 2009 do standardu oproti původní verzi přidala pole DEVSTAMP, DEVID, VIEWOFFSET a SAMPLETYPE, čímž se přiblížila ke standardu ANSI INCITS 378 z roku 2004 (viz další sekce). Tato nová pole ovšem pouze vyplnila původně nevyužité bity a šablony jsou tedy mezi sebou kompatibilní. Rozdílů v novější revizi standardu z roku 2011 bylo podstatně více a novější šablony nejsou již zpětně kompatibilní. Celý popis ISO/IEC 19794-2:2011 lze

nalézt na webové stránce [32], zde budou pouze zmíněny nejzásadnější funkční rozdíly. Pole DEVID, WIDTH, HEIGHT, RESOLUTIONX, RESOLUTIONY byly přesunuty z hlavičky šablony do záznamu otisku prstu. To, podobně jako v šabloně ANSI, umožňuje uchovávat v jedné šabloně otisky prstu z různých čteček, kdy každý původní snímek měl jiné rozměry, rozlišení apod. Byly přidány i nová pole, jako například datum a čas pořízení snímku otisku prstu, informace o certifikaci nebo technologii senzoru otisku prstu a jeho výrobci. Jiná pole, jako například POSITION nebo SAMPLETYPE získala nové hodnoty nebo se jejich velikost změnila. Došlo také k upřesnění významu některých polí, nebo naopak rozvolnění významu ve prospěch konkrétních implementací.

3.3.2 ANSI INCITS 378

Samotný standard není bohužel veřejně dostupný, existuje ovšem legálně dostupné shrnutí základních informací, důležitých pro tvorbu programů pracujících s tímto standardem, viz [30]. Následující popis bude z tohoto shrnutí vycházet. Popsána je revize ANSI 378–2009/AM1 z roku 2010.

ANSI INCITS 378 ukládá zejména markanty, a to jejich pozici, směr a typ (vidlička, ukončení nebo *vidlička nebo ukončení*). Nepovinně může obsahovat i informace o počtu papilární linie mezi markanty a informace o jádrech a deltách. Navíc jsou obsaženy metadata o otisku prstu, jako například pozice prstu (tzn. o který prst se jedná a na které ruce). Jedna šablona může obsahovat více otisků prstů.

Tabulka 3.7 zobrazuje formát hlavičky této šablony. Pole MAGIC musí obsahovat hodnotu FMR\0 (\0 značí byte s hodnotou 0) a slouží k rozeznání formátu šablony. V poli VERSION musí být obsažena hodnota 035\0 a slouží k rozeznání verze formátu (předchozí revize měly jinou hodnotu). Hodnota TOTALBYTES udává celkovou délku šablony v bytech. Jedná se o 32-bitové neznaménkové číslo kódované jako big-endian. Nicméně hodnota musí být vyšší než 40 bytů, neboť šablona musí obsahovat alespoň jeden otisk prstu.

Pole VENDOR je 16-bitové neznaménkové číslo obsahující ID výrobce, který danou šablonu vytvořil. Toto ID by mělo být zakoupeno, být platné a nesmí být 0, aby byla šablona validní. Existuje však možná hodnota 0x103, výrobce „Vendor Unknown“, kterou lze použít místo zakoupení vlastního ID výrobce. Další pole, kromě FPCOUNT jsou nezájímavá, toto pole udává počet záznamů otisků prstů v šabloně. Podle standardu musí šablona obsahovat alespoň jeden otisk prstu.

Tabulka 3.7: Hlavička šablony podle ANSI INCITS 378-2009/AM1.

Délka	Kód	Název
20 B	HEADER	Hlavička šablony
4 B	MAGIC	Magické číslo
4 B	VERSION	Verze formátu
4 B	TOTALBYTES	Celková délka šablony
2 B	VENDOR	ID výrobce
2 B	SUBFORMAT	Subformát specifikovaný výrobcem
1 B	DEVSTAMP	Informace o senzoru
2 B	DEVID	ID senzoru
1 B	FPCOUNT	Počet otisků prstů v šabloně

Záznam jednoho otisku prstu je možné vidět v tabulce 3.8. Pole POSITION udává pozici prstu na ruce, ze kterého byl otisk prstu sejmuto. Možné hodnoty jsou 0 až 10, kde 0 značí

neurčený typ prstu, 1 až 5 palec až malíček pravé ruky a zbývající hodnoty palec až malíček ruky levé. Oproti původní verzi standardu navíc přibyly další možné hodnoty, značící otisky prstů z více prstů naráz. V poli `VIEWOFFSET` se nachází index otisku prstu v rámci daného typu prstu, šablona tedy může obsahovat více otisků prstů jednoho prstu. `MEDIATYPE` určuje jakým způsobem byl otisk prstu sejmuto, To zahrnuje použitou technologii (optická, neoptická), typ senzoru (kontaktní, bezkontaktní) a jiné. `FPQUALITY` udává celkovou kvalitu otisku prstu s hodnotami 0 (nejhorší) až 100 (nejlepší), způsob měření kvality určuje pole `QALGO`. Dále jsou uvedena metadata o původním obrázku otisku prstu, tedy jeho šířka, výška a rozlišení. Pole `MINCOUNT` určuje celkový počet markantů pro daný otisk prstu, za kterým následují záznamy markantů, viz tabulka 3.9.

Za záznamy markantů leží pole `EXTBYTES`, určující počet rozšiřujících sekcí, který bude následovat. Standard definuje dva typy rozšiřujících sekcí: počet papilárních linií mezi markanty a informace o deltách a jádrech. Jejich popis lze najít v [30]. Výrobce může specifikovat i další sekce.

Tabulka 3.8: Záznam jednoho otisku prstu v šabloně podle ANSI INCITS 378-2009/AM1.

Délka	Kód	Název
>19 B	FINGERPRINT	Otisk prstu
1 B	POSITION	Pozice prstu na ruce
1 B	VIEWOFFSET	Index otisku prstu pro daný prst
1 B	MEDIATYPE	Kategorie senzoru
1 B	FPQUALITY	Kvalita otisku prstu
4 B	QALGO	Algoritmus pro určení kvality
2 B	WIDTH	Šířka původního obrázku
2 B	HEIGHT	Výška původního obrázku
2 B	RESOLUTIONX	Horizontální rozlišení (v pův. obr.)
2 B	RESOLUTIONY	Vertikální rozlišení (v pův. obr.)
1 B	MINCOUNT	Počet markantů
	MINUTIA	MINCOUNT záznamů markantů
2 B	EXTBYTES	Celková délka rozšiřujících dat
	EXTENSION	Rozšiřující data

V tabulce 3.3 je zobrazen formát záznamů markantů. `MINTYPE` určuje jeho typ, možné hodnoty jsou 01 (ukončení), 10 (vidlička) a 00 (ukončení nebo vidlička). Horizontální i vertikální pozice markantu je uvedena v pixelech, zleva doprava, shora dolů, počínaje nulou. Jedná se o 14-bitová neznaménková čísla. `MINANGLE` určuje úhel vektoru udávajícího směr markantu s hodnotami 0–179, kde 0 znamená směr vpravo a úhel roste proti směru hodinových ručiček. Při ukládání je nutné úhly ve stupních či radiánech přepočítat a kvantovat do tohoto rozmezí. Při čtení šablony je poté nutný opačný proces. `MINQUALITY` má podobný význam jako `FPQUALITY` u záznamu otisku prstu, význam kvality určuje pole `SUBFORMAT` z hlavičky šablony.

Tabulka 3.9: Záznam jednoho markantu v šabloně podle ANSI INCITS 378-2009/AM1.

Délka	Kód	Název
6 B	MINUTIA	Markant
2 b	MINTYPE	Typ markantu
14 b	MINX	Horizontální pozice markantu
2 b		Rezervováno
14 b	MINY	Vertikální pozice markantu
1 B	MINANGLE	Úhel markantu
1 B	MINQUALITY	Kvalita markantu

Při porovnání se standardem ISO, popsaným v předcházející podsekcí, je vidět, že šablony sdílí velkou část polí. Nicméně jejich význam nebo povolené hodnoty se mohou lišit. Standard ANSI se zdá být flexibilnější v ohledu zdroje otisků prstů, neboť informace o původním obrázku jsou zahrnuty v záznamu otisku prstu, nikoliv v hlavičce a každý otisk tedy může pocházet z jiné čtečky (která může mít různé rozlišení). Pole *MEDIATYPE* může být užitečné při určování tolerancí a dalších parametrů během porovnávání. Na druhou stranu je ISO šablona podstatně jednodušší, což může být pro některé využití výhodnější. Za zmínku též stojí, že pole *MAGIC*, které by mělo sloužit k rozlišení různých formátů, má povinnou hodnotu, která je pro oba standardy totožná. Rozlišit lze tyto šablony pouze na základě pole *VERSION*. Původní verze obou standardů však měli i toto pole totožné a rozeznat tyto šablony bylo možné pouze algoritmicky na základě pole *TOTALBYTES*. [30][31]

Kapitola 4

Syntetické otisky prstů

Při vývoji nového algoritmu pro rozpoznávání podle otisků prstů nebo při porovnávání několika algoritmů mezi sebou je třeba řešit důležitou otázku, a to jakou databázi použít. Taková databáze by měla být dostatečně velká (tisíce až desítky tisíc otisků prstů), ale její získání není snadné. Nasnímání otisků prstů velkému množství lidí je drahá a zdlouhavá záležitost, kterou navíc musí provádět důvěryhodná organizace, které jsou lidé ochotni svůj otisk prstu poskytnout. Navíc jak bylo uvedeno v sekci 2.2, některé třídy otisků prstů jsou v populaci méně zastoupené a tím pádem je jejich sběr o to náročnější. Když už je taková databáze vytvořena, z důvodu ochrany soukromí nemůže být snadno sdílena. [21][18]

Řešením výše uvedených důvodů může být generování syntetických otisků prstů, které by měly být podobné těm skutečným lidským. V ideálním případě mají být nerozlišitelné. Generátor syntetických otisků prstů poté může vytvořit otisk z jakékoliv třídy, s libovolnými markanty, hustotou papilárních linií a dalšími parametry, které se zadají na vstup. Takových otisků navíc může být vygenerováno velké množství, prakticky omezené jen časem a náklady na provoz počítače, na kterém generátor běží. Jelikož takto vytvořené otisky nepodléhají žádným zásadám o ochraně soukromí, mohou být šířeny libovolně pouze se svolením autora. [21][18]

4.1 Základní princip generování syntetických otisků prstů

Generování otisků prstu je inverzní biometrický problém [34]. Jeho úkolem je nalezení otisku prstu, který odpovídá zadaným parametrům, jako jsou například markanty, jádro, delta, frekvence papilárních linií atd. To je opačný postup, než který se používá pro biometrické rozpoznávání, kdy je vstupem otisk prstu, ze kterého chceme některé z těchto parametrů získat. Pokud by měl být dodržen přesně opačný postup k tomu uvedenému na obrázku 3.1 v kapitole 3, jednalo by se o rekonstrukci otisku prstu. Generování otisku prstu je obecnější pojem a postup může být odlišný, ovšem cílem je vytvořit věrný otisk prstu.

Syntetický otisk prstu je obvykle vytvořen z několika komponent. První komponentou je směrové pole, které určuje směr proudění linií pro každý bod v obrázku. Součástí této komponenty jsou i singularity, neboť ty buď směrové pole při jeho generování ovlivňují, nebo naopak mohou vzniknout jako vedlejší produkt jeho generování. Druhou komponentou je pole hustoty papilárních linií. Při důkladném zkoumání různých otisků prstu si lze povšimnout, že papilární linie nejsou stejně frekventované v každé části prstu, pole hustoty určuje právě tuto frekvenci pro jednotlivé body výsledného obrázku. Poslední hlavní komponentou bývá tvar otisku prstu. Bez ohraničujícího tvaru by vždy byl otisk prstu vy-

generován jako obdélník vyplňující celý obrázek. Pro vytvoření realistického otisku prstu je tedy potřeba stanovit jeho tvar a odstranit přebývající papilární linie, které se nacházejí mimo vymezenou plochu. [21][18]

Lze najít tři základní principy používané pro generování syntetických otisků prstů. První princip, který využívá například generátor SFinGe (viz sekce 4.3), generuje jednotlivé komponenty otisku prstu zvlášť a následně začne generovat samotné papilární linie spojením všech třech komponent do jedné. Proces generování začíná z několika předem určených bodů, ze kterých se papilární linie postupně rozrůstají. Druhý princip, který je použit například v generátoru SyFDaS, vychází z předpokladu, že jednotlivé komponenty jsou na sobě závislé. Například směrové pole je ovlivněné singularitami (jádro, delta), markanty jsou frekventovanější v okolí singularit a jejich směr je závislý na směru papilárních linií. Těmito fakty je řízen postup generování, kdy na začátku mohou být vygenerovány singularity, podle nich a případně dalších parametrů je určeno směrové pole a z něj jsou odvozeny pozice, typy a směry markantů. Uvedený postup ovšem není jediný možný a zmíněný generátor SyFDaS používá postup odlišný (viz kapitola 4.4). Poslední princip se pokouší o čistou rekonstrukci a vychází pouze ze znalosti markantů (například z biometrické šablony) bez dodatečných vstupních parametrů. Výsledkem všech těchto principů je tzv. *master fingerprint*, obraz otisku prstu, který lze připodobnit k výsledku extrakce papilárních linií z otisku prstu v procesu rozpoznávání (obrázek 3.1). [18]

4.2 Poškození otisků prstu

Ze své podstaty, samotný proces generování *syntetických* otisků prstů vytváří dokonalé a čistě vypadající otisky prstu, které nepůsobí přirozeně (*master fingerprint*). Jak již bylo naznačeno v sekci 2.3, čtečky otisků prstů musí čelit různým úskalím, které se odvíjejí od technologie použité v jejich senzoru. Dále, jak bylo zmíněno v sekci 2.2 v části o papilárních liniích, hlubší poranění kůže prstu, které zasahují i do škáry, zůstávají viditelné v struktuře papilárních linií. Všechny tyto přirozené jevy se na výsledném snímku otisku prstu projeví, ale základnímu vygenerovanému otisku prstu chybí, což je zdrojem jeho nepřirozenosti. Pokud mají syntetické otisky prstů působit věrohodněji, je potřeba tyto jevy zkoumat a následně jejich vliv na syntetický otisk vygenerovat. Tyto jevy můžeme rozdělit do tří hlavních kategorií: vliv prstu, vliv senzoru a vliv prostředí. [18]

Vliv prstu jsou všechny jevy, které nějak souvisí s prstem samotným nebo způsobem, jakým je k senzoru přiložen. Jedná se například o špinavý prst. I malé částice nacházející se na kůži se ve výsledném snímku otisku prstu projeví jako viditelné tečky. Vodivé materiály, vlhké, nebo naopak i příliš suché prsty mohou zhoršit rozlišitelnost papilárních linií u některých technologií senzorů. Dále do této kategorie patří i fyzické poranění kůže. Jedná se o neúmyslná poranění (dočasná, zasahující jen pokožku, či trvalá, zasahující i škáru) i úmyslná (operace za účelem pozměnění struktury papilárních linií, leptání prstů kyselinou aj.). Kromě poranění existují i onemocnění kůže, které papilární linie trvale pozměňují. Tyto poškození se na výsledném otisku prstu projeví například jako viditelné pruhy nebo tmavé skvrny. Na závěr lze uvést i neochotu osoby si otisk prstu nechat sejmout. V takovém případě může být prst přiložen jen částečně, s příliš velkým tlakem nebo příliš rychle. Otisky prstů jsou poté rozmazané, neúplné nebo příliš tmavé. [18]

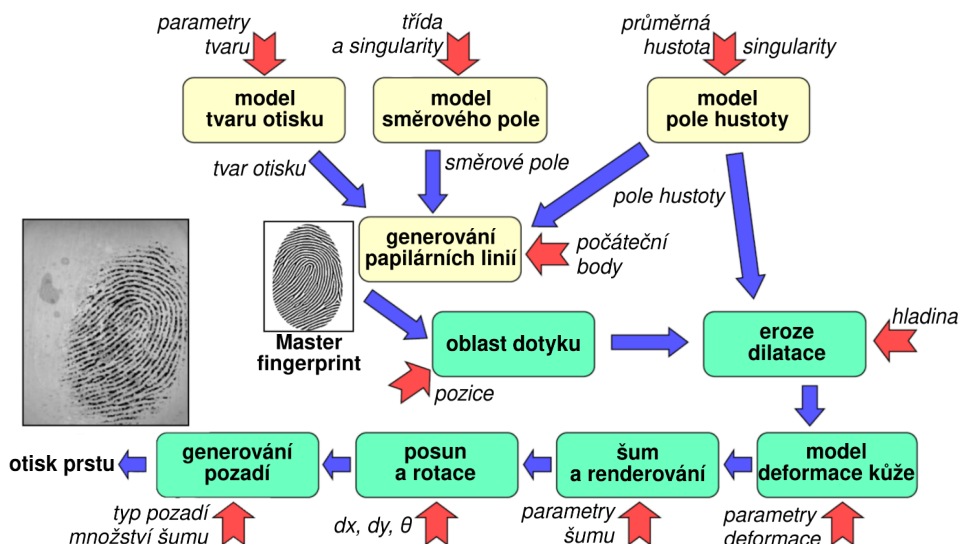
Vlivem senzoru jsou myšleny takové jevy, které přímo souvisejí se senzorem. Zde se jedná zejména o vliv samotné technologie. Dále se může jednat například o špinu na senzoru, která působí podobné problémy jako špinavé prsty. Latentní otisky, které na senzoru zůstávají po předchozím skenování, mohou jednak ovlivnit otisk podobně jako špína, ale

navíc způsobují bezpečnostní riziko, neboť je lze použít k neoprávněnému získání přístupu. Na závěr nelze opomenout fyzické poškození samotného senzoru, díky kterému mohou být výsledné snímky takřka jakékoliv. [18]

Vlivy prostředí jsou velmi specifické podle typu senzoru. Vibrace mohou poškodit libovolný senzor, teplota může mít nepříznivý vliv pro senzory založené na termické technologii a světlo může ovlivnit snímání u optických či elektrooptických senzorů. Jelikož jsou čtečky otisků prstů elektronická zařízení, mohou jejich fungování ovlivnit elektromagnetická radiace, což může způsobit například rozostřený snímek. [18]

4.3 SFinGe

Generátor SFinGe (*Synthetic Fingerprint Generator*) [5][21] používá první z principů popsaných v sekci 4.1. Během generování tedy dochází k samostatnému vytvoření směrového pole, pole hustoty a tvaru otisku prstu. Celý postup je možné vidět na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Proces generování otisku prstu v generátoru SFinGe, převzato z [18].

Nejprve je určen tvar otisku prstu, za tímto účelem byl vytvořen jednoduchý model založený na obdélníku a čtyřech eliptických obloucích, který je řízen pěti různými parametry a středovým bodem. Geometrický význam jednotlivých parametrů a příklady vytvořených tvarů lze vidět na obrázku 4.4. Obdélník dává tvaru otisku prstu jeho hlavní objem, jeho je dána parametrem c a jeho šířka parametry a_1 a a_2 . Horní a spodní zaoblené části jsou tvořeny páry elips od odpovídajících vrcholů obdélníku po body vzdálené b_1 , respektive b_2 pixelů od okraje obdélníku. [21]

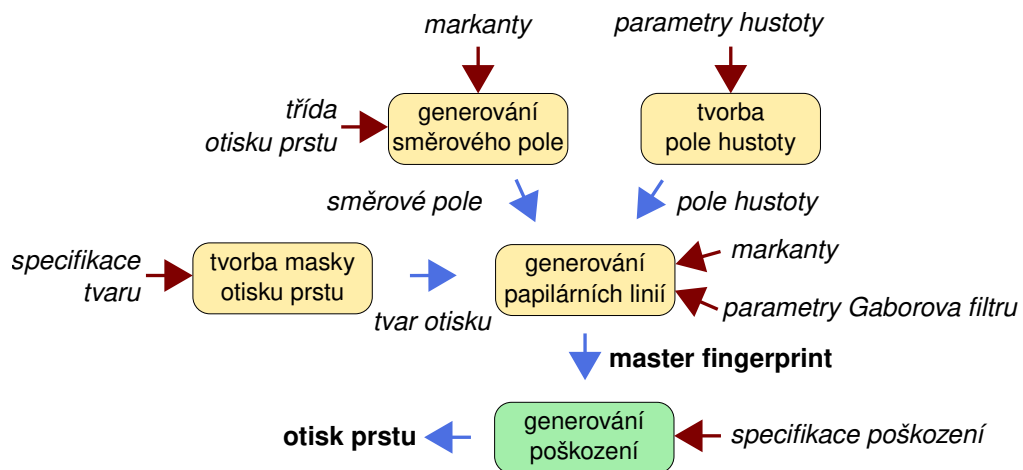
V druhém kroku je vytvořeno směrové pole pomocí modelu navrženého v roce 1993 Sherlockem a Monroem [26] a v roce 1996 vylepšeného pány Vizcaya a Gerhardt [29]. Toto vylepšení umožňovalo realističtější proudění papírných linií než původní model. Úkolem modelu je na základě známých poloh singularit a speciální mapovací funkce pro každou singularitu spočítat směr libovolného bodu na obrázku. V SFinGe jsou prvně náhodně určeny singularity a následně osm parametrů mapovací funkce, z nichž první čtyři jsou zvoleny náhodně a zbytek je dopočítán tak, aby bylo produkováno souvislé směrové pole.

Třetí krok vytváří pole hustoty. Nejprve je náhodně zvolena celková frekvence podle distribuce frekvencí ve skutečných otiscích prstů a následně je upravena v oblastech nad nejvyšším jádrem a pod nejnižší deltou, kde bývá frekvence nižší. Na závěr je ještě provedeno lokální uhlazení pomocí čtvercového filtru. V konečném kroku generování jsou vytvořeny jednotlivé papilární linie spojením všech tří předchozích kroků. Generování probíhá iterativně z předem určených počátečních bodů pomocí Gaborova filtru, který je modifikován dle lokálního směrového pole a pole hustoty. Tento krok automaticky vytváří jednotlivé markanty. Jelikož je jejich tvorba vedlejším efektem generování papilárních linií, jejich pozice, typ i směr jsou náhodné a mohou vznikat markanty všech typů. [21][5]

Výše popsané kroky generují *master fingerprint*. Ten je dále upravován, aby působil přirozeněji a mohou tak být vytvořeny i různé variace toho stejného otisku. Nejprve je upravena oblast kontaktu prstu se senzorem. Toho je docíleno posunem otisku a jeho rotací. V dalším kroku je simulován tlak prstu na senzor, vlhkost a suchost prstu. K tomu se používají operátory eroze a dilatace. Erozí dochází k rozšíření papilárních linií (vyšší tlak, vlhkost), dilatací k jejich ztenčení (suchost). Pomocí nelineární deformace je dále simulována elasticita kůže. Je také přidán šum, póry, drobná zranění a další nedostatky, které se na skutečných snímcích prstu mohou objevovat. Následně dochází k celkovému posunu a rotaci obrázku a na závěr k vygenerování realisticky vypadajícího pozadí. [21][5]

4.4 SyFDaS

Generátor SyFDaS (Synthetic Fingerprint Damage Simulator) se skládá se dvou oddělených modulů – generátoru *master fingerprint* vycházejícího z [7] a simulace poškození otisku prstu [18].



Obrázek 4.2: Proces generování otisku prstu v generátoru SyFDaS.

Proces generování je naznačen na obrázku 4.2. Na vstupu generátoru otisku prstu musí být zadány markanty – jejich poloha, typ a úhel. Typem markantu zde může být pouze vidlička nebo ukončení. Z úhlů markantů je odvozeno směrové pole. V místě pozice markantu je hodnota směrového pole dána přesně úhlem daného markantu. Pro body, nacházející se v prostoru mezi markanty, se úhel určí podle úhlů okolních markantů. Jejich vliv ovšem není stejný, každý markant má svoji váhu, která je nepřímě úměrná vzdálenosti od aktuálně počítaného bodu. Pokud však není specifikováno dostatečné množství markantů v okolí já-

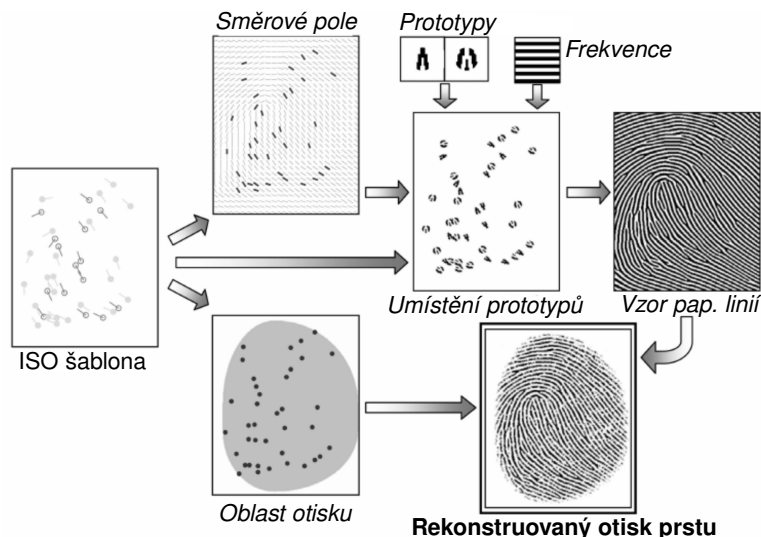
dra, kde se směr mění velmi náhle, nelze předpokládat, že směrové pole bude v tomto místě vytvořeno správně. Následná absence jader či delt může způsobit, že výsledné směrové pole nebude odpovídat žádné třídě otisku prstu. Z tohoto důvodu je možné před generováním směrového pole zvolit konkrétní třídu, podle které je připraveno odpovídající základní směrové pole. Teprve toto základní pole je upraveno podle vlivu jednotlivých markantů. [18]

Pole hustoty je v celém otisku prstu uniformní a může být na začátku manuálně upraveno. Z dostupných informací jsou podobně jako v SFinGe (viz sekce 4.3) vygenerovány papilární linie s použitím Gaborova filtru, jehož vlastnosti lze také manuálně modifikovat. Jako počáteční body nejsou ovšem použity náhodné body v obrázku, ale na vstupu zadané markanty. Tento fakt zajistí, že zadané markanty budou ve výsledném obrázku vždy přítomny. Další markanty jsou vygenerovány procesem tvorby papilárních linií automaticky stejně jako v SFinGe. Na závěr může být aplikována maska otisku prstu, která určuje výsledný tvar otisku, jinak je vyplněn celý obrázek. Takto vygenerovaný otisk prstu může být přesunut do druhého modulu, který se stará o simulaci poškození. Dostupné jsou poškození způsobené senzorem (dotykový a průtahový senzor) a prstem samotným (onemocnění, fyzické poškození, vlhkost, aj.). Detailní popis tohoto modulu lze najít v [18].

4.5 Další metody generování syntetických otisků prstů

V předchozích dvou sekcích byly popsány zástupci dvou prvních principů zmíněných v sekci 4.1. Tato sekce se zaměřuje na třetí princip, ve kterém se vychází pouze s markantů.

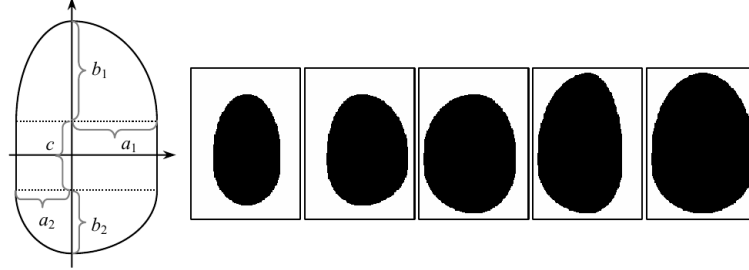
Tento princip je použit například v [6]. V této metodě je na vstupu šablona ISO/IEC 19794-2:2005 (popsáno v sekci 3.3.1) obsahující záznamy markantů, které jsou z ní extrahovány. Proces generování je možno vidět na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Proces generování z ISO šablony podle [6], převzato a upraveno z [6].

Z markantů získaných ze šablony je v první řadě získána plocha otisku, ta je reprezentována stejným modelem jako v SFinGe (viz sekce 4.3). Parametry a_1 , a_2 , b_1 , b_2 a c a středový bod v obrázku 4.4 jsou však určeny automaticky na základě markantů. Nejprve je určen střed a výška obdélníku. Střed je spočítán jako průměrná horizontální a vertikální poloha ze všech markantů a parametr c je nastaven na hodnotu $\frac{1}{6}$ rozlišení obrázku. Počáteční

hodnoty zbývajících parametrů jsou zvoleny tak, aby výsledný tvar zahrnoval i ty nejvzdálenější markanty od středu. Následně jsou tyto parametry upraveny tak, aby tvar zahrnoval úplně všechny markanty. Na závěr je ke každému parametru přičtena malá hodnota, aby markanty nejdále od středu nebyly na úplném okraji výsledného otisku.



Obrázek 4.4: Model tvaru otisku prstu v generátoru SFinGe, převzato z [21].

Dalším krokem je výpočet směrového pole pomocí modelu odvozeného z [29]. Avšak na rozdíl od SFinGe, kde je tento model také použit, není dopředu známa poloha singularit a ani není možné parametry mapovací funkce zvolit náhodně, neboť pak by výsledné směrové pole neodpovídalo původnímu otisku prstu z šablony. Model směrového pole je definován pomocí

- počtu singularit n_s ($n_s = 1$ znamená jedna delta a jedno jádro),
- pozic singularit l_j (jádro) a d_j (delta),
- a parametrů řídicí mapovací funkci, lišících se podle n_s .

Jelikož jsou všechny tři části modelu na začátku neznámy, musí se určit minimalizací cenové funkce. Minimalizace probíhá třikrát, a to pro hodnoty $n_s \in \{0, 1, 2\}$. Při každé z minimalizací jsou určeny jak polohy singularit, tak parametry mapovací funkce. Z výsledků těchto tří minimalizací je vybrána ta hodnota n_s , pro kterou je výsledná cena nejnižší. Tím je určen počet singularit n_s , jejich pozice a zbývajících parametry nutné pro výpočet směrového pole. V případě, kdy šablona otisku prstu obsahuje i dodatečné informace o singularitách (viz sekce 3.3.1), je problém zjednodušen pouze na určení parametrů mapovací funkce.

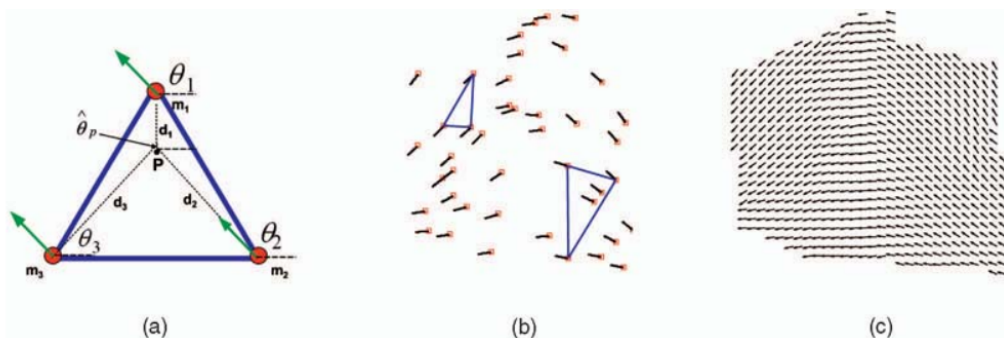
Pole hustoty je v této metodě fixní a pro získání lepších výsledků jsou generovány čtyři otisky s různou frekvencí papilárních linií. Po získání směrového pole a tvaru otisku prstu dochází ke generování samotných papilárních linií. Na počátku jsou na pozice markantů ze šablony vloženy jejich prototypy. Prototyp je malý obrázek, který připomíná odpovídající markant – vidličku nebo ukončení. Tyto prototypy, kromě pozice musejí být vloženy i ve správné orientaci, aby jejich úhel odpovídal úhlu markantu z šablony. Následně je pomocí Gaborova filtru iterativně vygenerován zbytek vzoru papilárních linií. Vzniklý obrázek se dále upraví přidáním šumu a odstraněním přebytečných oblastí, které jsou mimo oblast otisku prstu spočítanou dříve, čímž vzniká konečný otisk prstu. Na obrázku 4.5 se na levé straně nachází vygenerovaný vzor papilárních linií překrytý maskou oblasti otisku prstu a na pravé straně výsledný otisk prstu po aplikování šumu a masky.



Obrázek 4.5: Proces generování z ISO šablony podle [6], převzato z [6].

Evaluace vygenerovaných otisků prstů ukazuje, že je metoda velmi účinná a vytvořené otisky jsou schopny ošálit automatický systém pro rozpoznávání. Ovšem při manuálním porovnání expertem je úspěšnost nižší. Ukazuje se také, že použití informací o singularitách, pokud jsou v šabloně dostupné, zlepšuje úspěšnost jen nepatrně, což svědčí o tom, že navržený model pro výpočet směrového pole je dobrý.

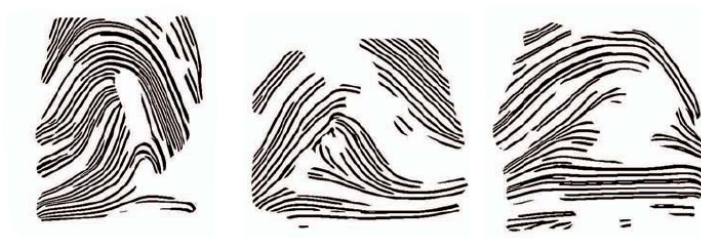
Publikace [25] navrhuje odlišný způsob výpočtu směrového pole z markantů. V tomto algoritmu jsou nejprve vytvořeny trojice markantů. Tyto trojice tvoří trojúhelníky, které musí splňovat jisté podmínky, aby byly považovány za validní. Výsledný trojúhelník by neměl být příliš velký, maximální rozdíl velikosti úhlu oproti mediánu úhlů markantů v trojici by neměl být větší než stanovená tolerance a neměly by být příliš úzké. Získané trojúhelníky mohou být vnořeny jeden do druhého nebo se překrývat. Proto jsou ještě vybrány jen ty, které jsou „kvalitní“ (definováno speciální funkcí). Po získání všech validních trojic je spočítána hodnota směrového pole uvnitř jednotlivých trojúhelníků jako funkce vzdáleností bodu od všech tří markantů, tvořících vrcholy trojúhelníku, a jejich úhlů. Na závěr je výsledné pole ještě vyhlazeno průměrujícím filtrem, který zajistí hladké přechody. Na obrázku 4.6 (a) zobrazuje jednu trojici markantů tvořící trojúhelník, (b) ukazuje všechny markanty a dva nalezené trojúhelníky a (c) je příklad odhadnutého směrového pole před krokem vyhlazení.



Obrázek 4.6: Výpočet směrového pole podle [25], převzato z [25].

Navržený postup má ovšem podobně jako metoda použitá v generátoru SyFDaS problém s tvorbou směrového pole v oblasti singularit. Z odhadnutého směrového pole autoři konstruují křivky *streamline* a z nich pomocí *Line Integral Convolution* (LIC) [4] rekonstru-

ují otisky prstů. Ačkoliv vygenerované papilární linie celkem odpovídají původnímu otisku prstu, není jimi důsledkem použitých metod pokryt celý otisk prstu a otisk tedy nepůsobí kompletně a věrohodně. Příklady vygenerovaných otisku lze vidět na obrázku 4.7. [25]



Obrázek 4.7: Rekonstruované otisky prstů, převzato z [25].

Kapitola 5

Návrh

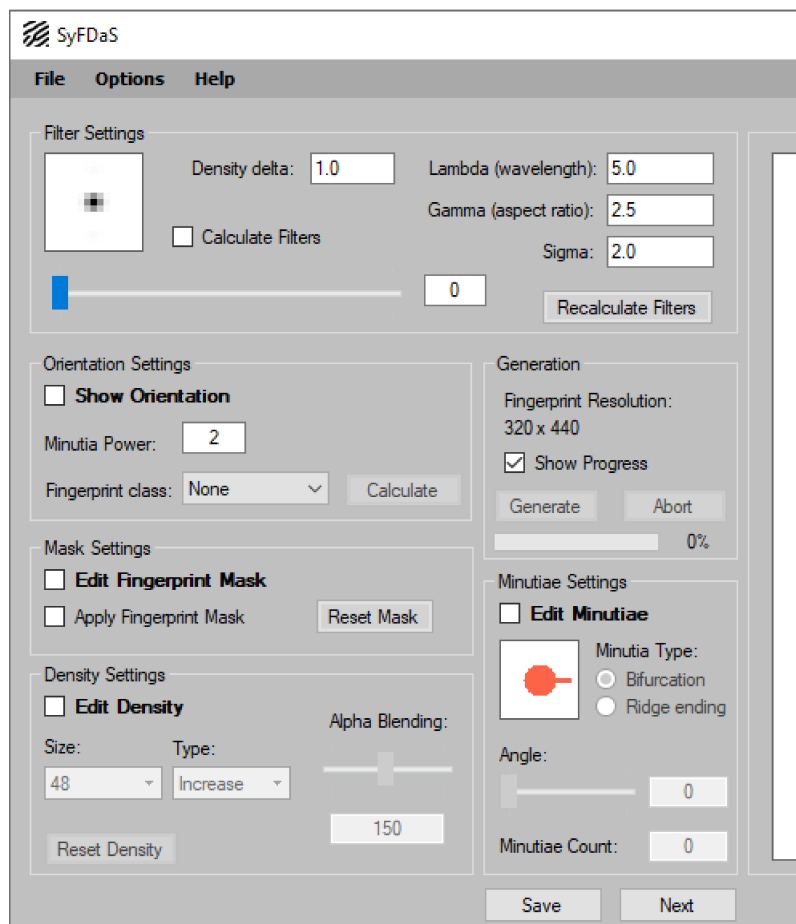
Cílem této práce je navržení a implementace metody pro generování syntetického otisku prstu, jehož vstupem bude biometrická šablona. Jak bylo diskutováno v sekci 3.3, pojem biometrická šablona je vcelku obecný. Kromě standardizovaných formátů existuje nespočet proprietárních šablon, které jsou často neveřejné a informace v nich uložené mohou být takřka libovolné. Je ovšem velmi pravděpodobné, že libovolný formát biometrické šablony bude obsahovat informace o markantech. Z tohoto důvodu je při návrhu metody důležité vycházet právě z markantů, jakožto skutečného vstupu generování.

Je pravdou, že i standardizované šablony mohou obsahovat dodatečné informace jako počet papilárních linií mezi dvěma markanty nebo pozice jádra a delty, tyto informace jsou však nepovinné a při návrhu metody s nimi nelze počítat. Nebylo by však na škodu je v případě přítomnosti využít a proces generování tím optimalizovat.

V kapitole 4 byly zkoumány různé přístupy, které již byly pro generování otisků prstů navrženy. Z pohledu této práce se jeví jako ideální metody vycházející z principu generování pouze z markantů. Je ovšem třeba nezapomínat na generátor SyFDaS (popsán v sekci 4.4), neboť na vstupu také přijímá zejména markanty. Jelikož byly pro účely této práce poskytnuty zdrojové soubory generátoru SyFDaS, tak pokud by se podařilo celý proces zautomatizovat, byla by velká část práce hotova. Následující sekce analyzuje aktuální stav při použití SyFDaS pro generování z šablony. Tato analýza bude sloužit pro následný návrh kroků a vylepšení, které je potřeba provést.

5.1 Analýza použití SyFDaS pro generování z šablony

V současné podobě je již možné generátorem SyFDaS vygenerovat otisk prstu podle šablony, je však nutné provést několik manuálních kroků. Na obrázku 5.1 je zobrazeno uživatelské rozhraní, ve kterém jsou kroky provedeny.



Obrázek 5.1: Uživatelské rozhraní generování otisku prstu v SyFDaS.

Nejprve je potřeba extrahovat informace ze souboru se šablonou. K tomu je možné použít existující nástroje nebo vlastní skript. Kromě samotných markantů je důležité získat i rozměry původního obrázku. Pokud šablona obsahuje i informace o singularitách, mohou být použity pro odvození, z jaké třídy se daný otisk prstu nachází. Jinak je možné se pokusit o odvození z pohledu na markanty.

V dalším kroku je možné začít pracovat se samotným SyFDaS. Po vytvoření nového prázdného snímku otisku prstu se správnou výškou a šířkou lze nahrát informace o markantech z externího souboru, ten musí mít následující formát:

```

_CISLO_MARKANTU_1_POZICE_X_POZICE_Y_UHEL_TYP[_] \n
...
_CISLO_MARKANTU_N_POZICE_X_POZICE_Y_UHEL_TYP[_]

```

CISLO_MARKANTU_N je pořadové číslo markantu N, POZICE_X a POZICE_Y je horizontální a vertikální pozice markantu, UHEL je jeho úhel a TYP je jeho typ, možné hodnoty jsou 1 (vidlička) a 2 (ukončení). Poslední mezera na řádce je nepovinná.

Po načtení markantů je možné zkusit vygenerovat směrové pole automaticky. Pokud byla z šablony extrahována informace o singularitách a odtušena třída otisku prstu, je možné upravit směrové pole odpovídajícím způsobem. Konkrétní informaci o pozici jádra či delty nelze ovšem v generátoru nijak využít. V dalším kroku je možné upravit pole hustoty nebo

modifikovat masku otisku prstu tak, aby obsahovala všechny markanty. Na závěr nezbyvá než otisk prstu vygenerovat.

Jak je možné vidět, celý proces je poněkud nešikovný a je potřeba jej automatizovat. Některé kroky navíc vyžadovaly rozhodnutí založené na znalosti polohy markantů a jejich vlastností. Jelikož je pro uživatele šablona (zejména ta binární) černou skříňkou, bylo by nejlepší tyto kroky vylepšit.

5.2 Načtení šablony

Prvním krokem musí zajisté být načtení samotné šablony do generátoru. Na rozdíl od současného stavu nesmí být potřeba šablonu předem dekodovat a získat informace manuálně. Vzhledem k velkému množství dostupným šablon by měl modul načítání šablony být dostatečně obecný. Informace získané ze šablony mohou být pak automaticky předány do generátoru.

Sekce 3.3.2 ukázala, že šablony mohou být značně rozdílné. Z toho důvodu nelze navrhnout takový modul, který bude automaticky umět přečíst libovolnou šablonu. Nicméně abstraktní třída s jednoduchým rozhraním, které vstupní modul zná, může tento problém řešit. Bude odpovědností třídy, která od dané abstraktní třídy dědí, vědět, jaký je interní formát šablony a jak jej dekodovat. Vstupnímu modulu tato třída pak jen poskytne již extrahované potřebné informace. Tento přístup navíc umožní snadné přidání dalších šablon bez nutnosti úprav vstupního modulu, pokud by bylo potřeba.

Další výhodou je možnost vytvoření speciálních „šablon“, jako například šablona pro vygenerování naprosto náhodného otisku prstu nebo otisku určité třídy. Třída reprezentující takovou speciální šablonu by místo čtení vstupního souboru generovala markanty a další informace náhodně či dle statických pravidel. Vstupnímu modulu třída poté jen předá veřejným rozhraním smlouvaná data a ten je předá generátoru.

Jelikož bude generátor již znát různé typy šablon, nabízí se umožnit i uložení vlastní šablony z manuálně přidaných markantů a dalších parametrů (které lze do dané šablony uložit). Každá třída implementující šablonu by tedy měla navíc umět načíst data z generátoru a zakódovat je do odpovídajícího formátu. Výjimkou jsou samozřejmě diskutované speciální šablony.

5.3 Automatizace jednotlivých kroků generátoru

V současném řešení lze **tvar otisku prstu** určit pouze manuálně. Algoritmus popsáný v [6] umí však tento problém řešit automaticky pouze ze znalosti dostupných markantů. Implementace tohoto algoritmu do SyFDaS by tento problém vyřešila. Pro případy, kdy se odhadnutí tvaru otisku prstu nepodaří, by bylo vhodné uložit i celou vygenerovanou strukturu papírárních linií a nabídnout uživateli možnost tvar otisku prstu dodatečně upravit.

Směrové pole lze již nyní vygenerovat automaticky. Jak bylo ovšem uvedeno v sekci 4.4, pokud není specifikována konkrétní třída otisku prstu, může generátor vyprodukovat otisk prstu nepatřící do žádné existující třídy. Tento problém je možné obejít manuální volbou třídy otisky prstu. Bylo by tedy možné tuto volbu posunout do části načtení šablony, aby mohl být zbytek procesu plně automatický. I v případě, kdy je takto přidán další vstupní parametr pro automatické generování otisku prstu, není stále zaručeno, že směrové pole bude podobné tomu z původního otisku prstu. Důvodem je poloha singularit, která je v současné verzi SyFDaS pro jednotlivé třídy otisku prstu dána pevně. Místo třídy otisku prstu by

tedy mělo být spolehlivější nechat uživatele zvolit pozice a typy singularit. Tyto polohy by následně sloužili jako vstup pro současné definice tříd otisků prstů, čímž by výsledné směrové pole mělo být přesnější.

Jako ještě uživatelsky přívětivější varianta se ovšem jeví automatická volba třídy otisku prstu podle algoritmů navržených v [6] nebo [25] (oba přístupy byly popsány v sekci 4.5). Z těchto dvou možností se zdá být lepší metoda z [6], neboť ta zároveň řeší i výpočet celkového směrového pole. Vzhledem k výsledkům prezentovaným v odkazované práci, lze předpokládat, že implementace tohoto algoritmu by i zlepšila kvalitu samotných generovaných otisků. Navíc tento algoritmus řeší i případ, kdy se v šabloně vyskytují informace o singularitách a bere je v potaz. Tím je do návrhu zakomponována i dříve zmíněná optimalizace.

V současné verzi generátoru je **pole hustoty** vždy uniformní, ale může být manuálně modifikováno. V případě plně automatizovaného generování by tento mechanismus mohl zůstat zachovaný. Ve standardizovaných šablonách se však nepovinně může vyskytovat i informace o počtu papilárních linií mezi dvěma markanty. Tato informace by zajisté mohla být použita pro výpočet lokální frekvence mezi markanty a následně dopočítaná pro ostatní oblasti. Ovšem vzhledem k tomu, že toto rozšiřující pole není povinné a četnost jeho přítomnosti není známa, tak se jedná o nezbytné vylepšení. V tomto případě by bylo lepší řešení neuniformní pole hustoty vytvořené na základě heuristik jako například v generátoru SFinGe [21] nebo vygenerování více různých otisků prstů s různými frekvencemi jako bylo navrženo a použito v [6]. Uživatel však může v případě potřeby pole hustoty sám upravit.

Samotné **generování papilárních linií** pomocí Gaborova filtru je v nynější verzi uspokojivé. Stejnou metodu používají i další generátory ([5], [6]) a jiné metody jako například LIC v [25] produkovaly spíše horší výsledky. Zdá se tedy, že není potřeba tento krok měnit.

5.4 Simulace poškození

Po úspěšném vygenerování otisku prstu by mohl automatizovaný proces simulovat i některé poškození. U tohoto kroku je však velmi obtížné postupovat pouze na základě informací z šablony. Vodítkem by mohly být snad jen informace o kvalitě otisku prstu, které se podle standardů mají v ISO i ANSI šablonách vyskytovat. V případě nižší kvality by mohlo být vygenerováno větší množství poškození a naopak. U ANSI šablony je dostupná i informace o typu čtečky otisků prstu, která byla pro snímání otisku prstu použita. Z této informace by mohl SyFDaS vyvodit, který typ poškození senzoru má generovat. Tyto řešení ovšem nejsou příliš univerzální, pokud by byla uvažována podpora širší palety šablon.

Východiskem se zdá být náhodné generování poškození (například podobné tomu z SFinGe [21]) nebo podobný přístup jako při generování databáze, který již v SyFDaS existuje [18]. Tato práce se však neplánuje této problematice věnovat do větší hloubky a hlavním cílem bude automatické vygenerování *master fingerprint*.

5.5 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní generátoru SyFDaS je přizpůsobené pro manuální úpravu jednotlivých vstupů pro generování, bude jej ovšem možné použít i pro automatické generování. Stejně jako načtení souboru s markanty, importování biometrické šablony je z pohledu uživatele pouze zvolení souboru v adresáři. Ačkoliv v této práci popsané formáty biometrických šablon jsou od sebe rozeznatelné, nemusí to tak být u všech. Z toho důvodu se zdá být jako

ideální řešení se uživatele před výběrem samotného souboru s šablonou dotázat, jaký formát šablony si přeje importovat. K tomu by mělo sloužit modální okno zobrazené před otevřením průzkumníku souborů. Jednoduchá rozbalovací nabídka se seznamem podporovaných šablon (včetně těch speciálních) bude dostatečná. Generátor by měl mít po importování šablony všechny potřebné informace k vygenerování otisku, není tedy potřeba žádný další ovládací prvek. Jelikož generování probíhá v hlavním rozhraní generátoru, bude mít uživatel možnost si po prohlédnutí výsledného otisku všechny parametry případně dále upravit a otisk vygenerovat znovu.

Vzhledem k tomu, že směrové pole nebo plocha otisku prstu budou automaticky odhadnutelné, bude přínosné do hlavního rozhraní přidat nová tlačítka, kterými lze tuto operaci provést. Díky tomu nebude pro využití nové funkcionality nutné generovat otisk prstu ze šablony, ale bude dostupná vždy.

Jelikož generátor SyFDaS do teď nepracoval se singularitami, které budou v každém případě nutné pro tvorbu směrového pole, bude potřeba rozšířit uživatelské rozhraní i o manipulaci s nimi. Uživatel bude tedy schopný singularity přidávat, upravovat jejich polohu a mazat je. Tato interakce by mohla fungovat podobně jako manipulace s markanty.

Kapitola 6

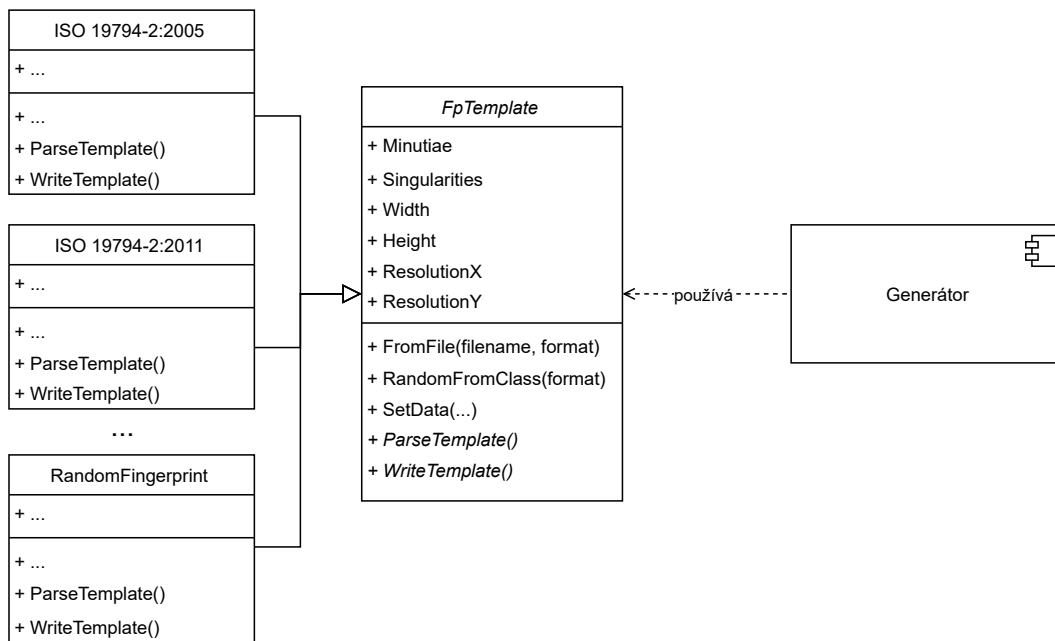
Implementace úprav generátoru

Jak bylo uvedeno v kapitole 5, bylo učiněno rozhodnutí implementovat generování otisků prstů z biometrické šablony do generátoru SyFDaS. Tato kapitola se věnuje implementaci jednotlivých dílčích částí, tak jak byly identifikovány v průběhu návrhu.

6.1 Práce se šablonou

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, jednotlivé šablony mají velmi odlišný formát a není tedy vhodné vytvářet jedinou třídu, která dokáže jakýkoliv takový formát přečíst. Z pohledu generátoru je však zbytečné znát, jakého typu a jaký formát konkrétní šablona měla. Generátor se zajímá pouze o několik základních informací, které lze téměř z kterékoliv šablony vyčíst. Z toho důvodu byla vytvořena abstraktní třída `FpTemplate`, která poskytuje jednoduché, avšak dostačující rozhraní, se kterým generátor pracuje. Pro každý podporovaný formát šablony pak má existovat další třída, která od této abstraktní třídy dědí. Zodpovědností těchto konkrétních tříd je znát formát konkrétní biometrické šablony a umět z něj vyčíst všechny potřebné informace.

Tento vztah mezi abstraktní třídou a třídami pro jednotlivé formáty umožňuje generátoru pracovat pouze se třídou `FpTemplate`. Pomocí tovární metody `FromFile`, které generátor předá očekávaný formát šablony a cestu k souboru, je vytvořena instance konkrétní třídy schovaná za známé rozhraní. Generátoru pak pouze stačí vyvolat samotné načtení šablony a následně získat informace o rozměrech obrázku, markantech nebo singularitách, které jsou následně předány do jednotlivých částí generátoru podle jejich zodpovědností. Na obrázku 6.1 lze vidět diagram tříd odpovídající popsané implementaci.



Obrázek 6.1: Diagram tříd architektury práce se šablonami v generátoru SyFDaS.

Z diagramu na obrázku 6.1 lze také vidět metody `SetData` a `WriteTemplate`. Tyto metody slouží pro uložení šablony z aktuálních dat v generátoru. Podobně jako v případě načítání je nejprve vytvořena instance šablony pomocí tovární metody a následně jsou této instanci předána potřebná data a šablona je na závěr zapsána na disk. Zapisovány jsou jen ty informace, které jsou obsaženy ve veřejném rozhraní třídy `FpTemplate`.

V rámci této práce byla implementována podpora pro standardizovanou šablonu ISO/IEC 19794-2:2005/Cor.1:2009 a pět speciálních šablon pro generování náhodných otisků prstů pěti tříd, které generátor zná (oblouk, klenutý oblouk, levá smyčka, práva smyčka a spirála). Pro přidání podpory pro další formáty šablon je potřeba pouze vytvořit konkrétní třídu pro daný formát a implementovat metody `ParseTemplate` a `WriteTemplate`. Stejně tak je možné rozšířit veřejné rozhraní třídy `FpTemplate` o další nepovinné informace, které mohou být v generátoru v budoucnu užitečné.

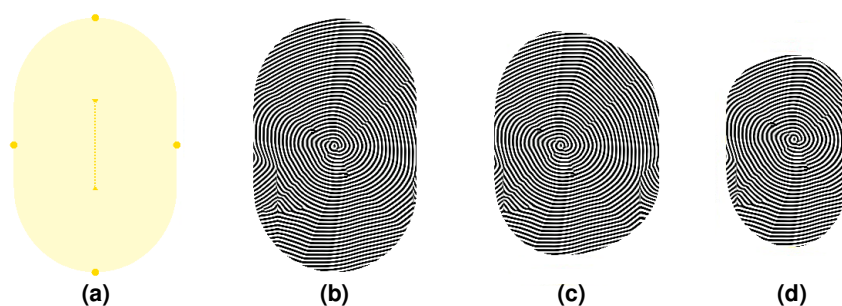
6.2 Tvar otisku prstu

Problematika tvaru otisku prstu může být rozdělena do dvou podproblémů. Jsou jimi samotná reprezentace tvaru otisku a automatizace odhadnutí tvaru otisku prstu z dostupných informací. Jelikož generátor již disponuje funkcionalitou tvaru otisku prstu, bylo pro splnění zadání dostatečné jeho tvorbu automatizovat. Tato původní reprezentace však nedávala uživateli dostatečné možnosti přizpůsobení. Bylo tedy rozhodnuto tuto část generátoru upravit a implementovat namísto původního řešení model, který byl použit jak v generátoru SFinGe, tak v článku [6]. Další výhodou, kromě širšího množství tvarů, kterých lze tímto modelem dosáhnout, je možnost použití algoritmu z článku [6], který odhadne tvar otisku prstu pouze na základě markantů.

6.2.1 Reprezentace tvaru otisku prstu

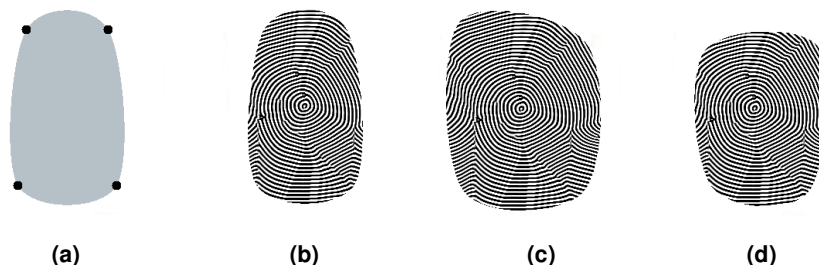
Původní implementace tvaru otisku prstu neměla pro zamýšlený další vývoj příliš co nabídnout a mohla být odstraněna. Místo ní byla vytvořena nová třída `FpShape`, která implementuje již zmíněný model. Jak bylo uvedeno v sekci 4.5, tento model reprezentuje tvar otisku prstu pomocí svého středu a pětice parametrů: a_1 , a_2 , b_1 , b_2 a c . Schéma tohoto modelu lze najít na obrázku 4.4. Parametr c kontroluje výšku obdélníku, který dodává tvaru výšku v nejširším bodě. Parametry a_1 a a_2 pak jeho šířku. Společně s parametry b_1 a b_2 pak tvoří poloosy čtyř elips, jejichž obloukové výseče tvoří zbytek tvaru otisku prstu.

V rámci uživatelské prostředí bylo ovládání těchto parametrů reprezentováno pomocí pěti kontrolních bodů, ty mohou být viděny na obrázku 6.2 (a). Čtyři žluté body po obvodu tvaru ovládají délky poloos jednotlivých elips (parametry a_1 , a_2 , b_1 a b_2). Úsečka uprostřed s madly ve tvaru šipky na obou koncích pak kontroluje výšku středového obdélníku, tedy velikost parametru c . Posouváním celého tvaru po plátně pak dochází k úpravě pozice středového bodu.



Obrázek 6.2: Nové uživatelské rozhraní konfigurace tvaru otisku prstu a příklady vytvořených tvarů.

Pro srovnání, obrázek 6.3 (a) zobrazuje staré uživatelské rozhraní, které bylo ovládáno pouze pomocí čtyř bodů, mezi nimiž byl vykreslen oblouk. Obrázky 6.3 a 6.2 (b), (c) a (d) poté ukazují příklady tvarů, které lze těmito odlišnými přístupy vytvořit. Tvar (b) je v obou případech výchozí tvar. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma reprezentacemi je ostrost v „rozích“, kde má stará reprezentace své kontrolní body. Ty mohou v situacích, kdy je snaha, aby byl otisk prstu širší, působit nepřírozně.



Obrázek 6.3: Staré uživatelské rozhraní konfigurace tvaru otisku prstu a příklady vytvořených tvarů.

6.2.2 Automatický odhad tvaru

Jak již bylo naznačeno výše, odhad tvaru otisku prstu je implementován pomocí algoritmu z článku [6]. Vstupem pro tento algoritmus jsou pouze polohy markantů a výška obrázku. Algoritmus pracuje na velmi jednoduchém principu. Nejprve je určen střed tvaru jako průměrná horizontální a vertikální souřadnice všech markantů. Následně je nastavena velikost parametru c , a to na šestinu výšky obrázku, což dodá tvaru protáhlý tvar. Následně jsou nastaveny zbylé parametry tak, aby výška a šířka tvaru pokrývala i nejzazší markanty v každém směru. Tím je vytvořen přibližný tvar, který by měl pokrývat většinu markantů. V následujícím kroku jsou však délky poloos upraveny tak, aby jejich oblouk skutečně pokrýval všechny markanty ležící v odpovídajícím kvadrantu. Toho je docíleno zjištěním, které markanty se nacházejí vně oblasti a výběrem toho nejbližšího z nich. Pro tento markant jsou pak poloosy odpovídajícího oblouku upraveny tak, aby měl co nejmenší obsah a zároveň markant pokrýval. Vzhledem k tomu, že množina možných řešení tohoto podproblému je velmi omezená (poloosy nesmí být menší než nyní, nesmí sahat za hranice obrázku a možné hodnoty jsou celá čísla), je možné projít všechny možné kombinace bez vlivu na výkon, a tak zjistit tu nejlepší. Tento krok se opakuje tak dlouho, dokud nezůstane ani jeden markant nacházející se mimo získanou oblast. Aby se markanty na okrajích nenacházely přesně na okraji výsledného tvaru, jsou všechny poloosy protaženy o malou hodnotu. Každý markant má kolem sebe tedy dostatek prostoru, aby byl ve výsledném otisku viditelný.

Aby nebylo automatické odhadnutí tvaru otisku prstu použitelné pouze pro generování syntetického otisku prstu z biometrické šablony, bylo do uživatelského rozhraní generátoru také přidáno tlačítko, které spustí tento algoritmus. Uživatel si tedy může nechat tvar z markantů odhadnout i v případě, kdy vytváří otisk manuálně nebo nahraje markanty ze souboru.

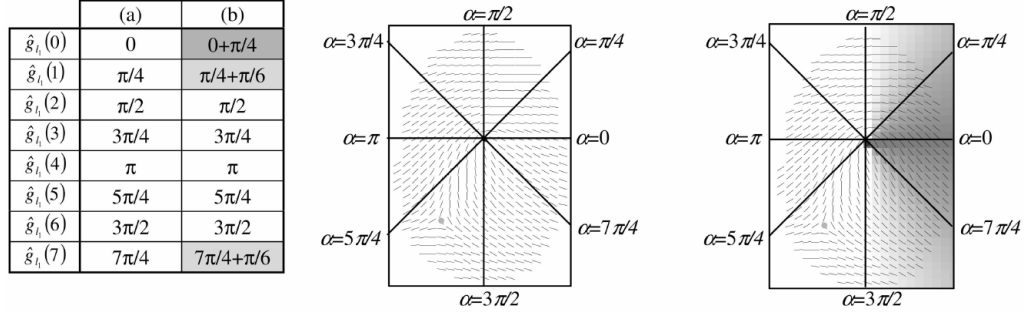
6.3 Odhad směrového pole

V sekci návrhu 5.3 bylo diskutováno několik možných řešení odhadu směrového pole s různými úrovněmi uživatelské přívětivosti. Za nejlepší variantu bylo považováno kompletně automatické řešení pomocí přístupu z článku [6]. Tento přístup pro odhad směrového pole používá model, který lze nalézt i v dalších publikacích, např. [26], [29] nebo [21]. Jak již bylo uvedeno v sekci 4.5, tento upravený model definuje směrové pole jako funkci počtu singularit, jejich pozic a dalších parametrů, které se liší podle počtu singularit. Počet singularit pak udává, jaké třídy otisk prstu je. Odhadnutím všech těchto parametrů je pak odhadnuto jak směrové pole, tak pozice singularit a třída otisku prstu.

6.3.1 Jak model funguje

Pro lepší pochopení následující problematiky je potřeba přiblížit fungování modelu. Původní model z publikace [26] nahlíží na obrázek otisku prstu jako na komplexní rovinu, kde každý bod obrázku je komplexní číslo. Hodnota směrového pole pro konkrétní bod pak závisí na fázových úhlech mezi daným bodem a pozicemi singularit. Vizcaya a Gerhardt [29] dodali modelu vyšší variabilitu přidáním možnosti korekce fázových úhlů na základě q kontrolních bodů, které jsou rovnoměrně rozprostřeny po obvodu obrázku. Velikost této korekce je obecně různá pro jednotlivé singularity. Jako vhodné q je udávána hodnota 8 [21]. V praxi to znamená, že pro 8 různých úseků v obrázku lze upravit vliv fázového úhlu k singularitě. Například lze směrové pole více stočit směrem na stranu či dolů. Příklad kontrolních bodů

a jejich vliv na směrové pole při změně lze vidět na obrázku 6.4. Tabulka nalevo zobrazuje hodnoty kontrolních bodů pro obrázky (a) a (b). Rozdíly mezi těmito dvěma sadami hodnot a jejich vliv na směrové pole jsou zvýrazněny stupni šedé.



Obrázek 6.4: Vliv změny hodnot kontrolních bodů v modelu pole orientací, převzato z [6].

Model podporuje tři různé konfigurace singularit: žádná, jeden pár a dva páry. Žádnou singularitu má třída oblouk, jeden pár mají smyčky a klenutý oblouk. Dva páry jsou míněny pro dvojitou smyčku ze třídy spirála. Obvyčejná smyčka, kterou generátor SyFDaS podporuje a má dvě delty a jedno jádro bohužel tímto modelem nelze reprezentovat a bude vyžadovat samostatné řešení.

Vzniklý model tedy může mít pro každou singularitu osm různých parametrů a k tomu navíc pozice singularit, pro otisk třídy smyčka se jedná o 20 parametrů, pokud počítáme souřadnici singularity jako dvě hodnoty x a y . Vzhledem k tomu že v článku [6] bylo cílem parametry tohoto modelu (a tedy směrové pole) odhadnout minimalizací, rozhodli se autoři model zjednodušit a pro každou singularitu používají jen dva parametry. Hodnoty osmi kontrolních bodů jsou pak odvozeny na základě těchto dvou parametrů. Tím model pro smyčku obsahuje pouze 8 celkových parametrů místo zmíněných 20 – pozice singularit jako čtyři hodnoty a celkem čtyři parametry pro tyto dvě singularity. Stále však by odhadnutí třídy otisku prstu (tj. konfigurace/počtu párů singularit), pozic singularit a všech ostatních parametrů pomocí minimalizace bylo příliš náročné. Místo toho autoři navrhli provést tři minimalizace, pro žádnou singularitu (oblouk), pro jeden pár singularit (smyčky a klenutý oblouk) a pro dva páry singularit (dvojité smyčky). Každá minimalizace pak odhaduje jen pro ni potřebné parametry. Na závěr je vybráno to směrové pole, které dosáhlo nejnižší ceny.

6.3.2 Implementace modelu a zhodnocení

Implementace popsané přístupu do generátoru spočívala podobně jako u tvaru otisku prstu, popsaného v sekci 6.2, ve dvou krocích. Prvním krokem bylo vytvoření třídy, která si uchovává parametry samotného modelu směrového pole a dokáže z nich vypočítat směr v libovolném bodu obrázku. Bylo zde důležité uvědomit si, že model pracuje s úhly v komplexní rovině, kde hodnoty na reálné ose rostou směrem doprava a na imaginární směrem nahoru. Avšak ve zpracování obrazu, včetně generátoru SyFDaS je situace odlišná. Hodnoty na horizontální ose se chovají stejně, avšak vertikální souřadnice rostou směrem dolů. Tento rozdíl způsoboval na první pohled podivné chování vypočteného směrového pole v oblastech kolem singularit, kdy pole kolem jádra připomínalo spíše deltu a naopak. První intuitivní řešení převrácením vertikální souřadnice vztahem $y = H - y$, kde H je výška obrázku a y vertikální

souřadnice, bodu nebylo správné. Pokud se vezmou v potaz i kontrolní body (respektive úhly na kterých se nacházejí), lze si povšimnout, že v souřadnicovém systému generátoru SyFDaS nejsou úhly převráceny vertikálně, nýbrž otočeny o 180° . Druhý důležitý poznatek je, že k vertikálními převrácení dochází přirozeně, takže namísto rotace o 180° lze provést pouze horizontální převrácení. Ve skutečnosti tedy není vůbec potřeba upravovat souřadnici y , nýbrž souřadnici x vztahem $x = W - x$, kde W je výška obrázku. Po této změně se již směrové pole chovalo dle očekávání.

Druhým krokem byla implementace odhadnutí parametrů modelu z dostupných informací, tedy markantů a rozměrů obrázku. K minimalizaci jsem se rozhodl využít stejný minimalizační algoritmus jako použili autoři v článku [6] a to algoritmus Nelder-Mead simplex [24]. Výhodou tohoto algoritmu je jeho efektivita a rychlost, neboť nepoužívá derivace funkcí ale pouze funkční hodnoty. Algoritmus byl dostupný v .NET frameworku Accord.NET¹.

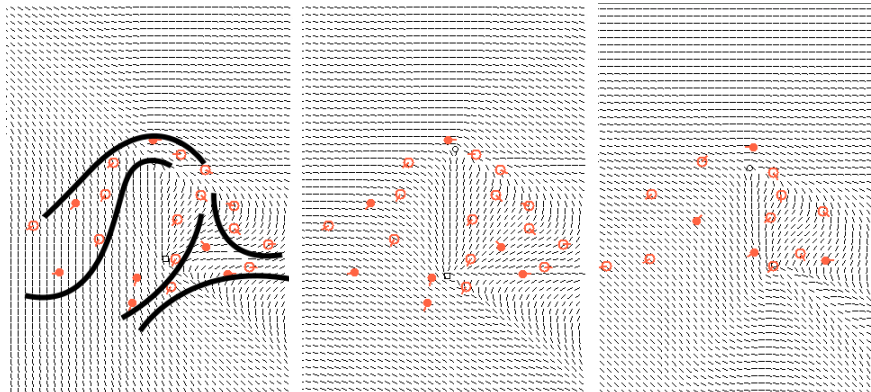
Hned při prvotním vyhodnocení implementace se však ukázalo, že odhad směrového pole z markantů příliš neodpovídá očekáváním. Odhadnuté singularity nerespektovaly hranice obrázku, zbylé parametry zase neměly takovou hodnoty aby vytvářely směrové pole, které by vyhovovalo markantům. Avšak ani po mnoha modifikacích, které se snažily minimalizační algoritmus navést správným směrem, se nepodařilo dosáhnout takových výsledků, jaké byly prezentovány ve zmíněném článku. Tyto modifikace zahrnovaly omezení definičního oboru pro parametry modelu dle specifikace, úpravy cenové funkce nebo poskytnutí přibližného řešení minimalizačnímu algoritmu. Přibližné řešení se řídilo jednoduchými pravidly, například pro jeden pár singularit (smyčky, klenutý oblouk) lze očekávat, že se delta bude nacházet níže než jádro a obě singularity budou nejspíše v oblasti kolem středu obrázku. Tyto úpravy však nebyly úplně bez efektu. Omezení definičního oboru zamezilo singularitám, aby se nacházely mimo hranice obrázku, nicméně i tak je algoritmus umisťoval spíše na okraje. Tento problém vyřešilo přibližné řešení, díky kterému výsledné pozice již nepůsobily úplně náhodně. Bohužel se ale i tak zdálo, že minimalizační algoritmus vždy nachází lokální minimum, které má daleko od toho optimálního.

Problémy s odhadem vedly k otázce, zdali má smysl na tomto řešení strávit více času. Několik směrových polí vygenerovaných tímto modelem i s automatickým odhadem parametrů se nacházejí na obrázku 6.5. První obrázek černými liniemi naznačuje, jaké by v ideálním případě měly směry být. Kromě nepřesně umístěných singularit si lze také povšimnout, že v levém horním kvadrantu model nedokázal správně zakřivit orientaci směrem dolů, navzdory několika markantům, které se v těchto místech nacházejí. Tento jev je však pravděpodobně spojen spíše s odhadem než se samotným modelem. Pro generování otisků prstů z markantů je ovšem zásadní, aby směr papilárních linií v okolí markantů odpovídal jejich směru. Přidání úpravy směrového pole podle markantů a vyhlazení výsledku bohužel tyto problémy nevyřešilo. Markanty ovlivnily směrové pole příliš a výsledek nebyl příliš lepší než odhad směrového pole pouze z markantů metodou, která se již v generátoru nacházela. Nižší vliv markantů pak zase nebyl dostatečný pro případy, kdy bylo modelem odhadnuté směrové pole příliš odlišné.

Další velký problém, který je v tomto případě spojen se samotným modelem, lze vidět na posledním příkladu na obrázku 6.5, kde se singularity nenacházejí přímo pod sebou. V otisku prstu třídy levá smyčka se papilární linie kolem jádra obvykle stáčí zpět na levou stranu a míjejí jádro, často přes střed obrázku. V tomto modelu se však zdá být nemožné tento jev správně simulovat. Příčinou je pravděpodobně samotná definice hodnot kontrolních bodů jednotlivých singularit pomocí parametrů modelu. Lze očekávat, že úpravy těchto

¹http://accord-framework.net/docs/html/R_Project_Accord_NET.htm

definic, případně jejich diferenciace na základě třídy otisku prstu, by problém vyřešila. Odhad parametrů by pak mohlo zlepšit použití genetických algoritmů, které by mohly najít optimálnější řešení. Avšak vzhledem k omezenému času bylo rozhodnuto řešení odhadu směrového pole přehodnotit a vydat se odlišnou cestou.

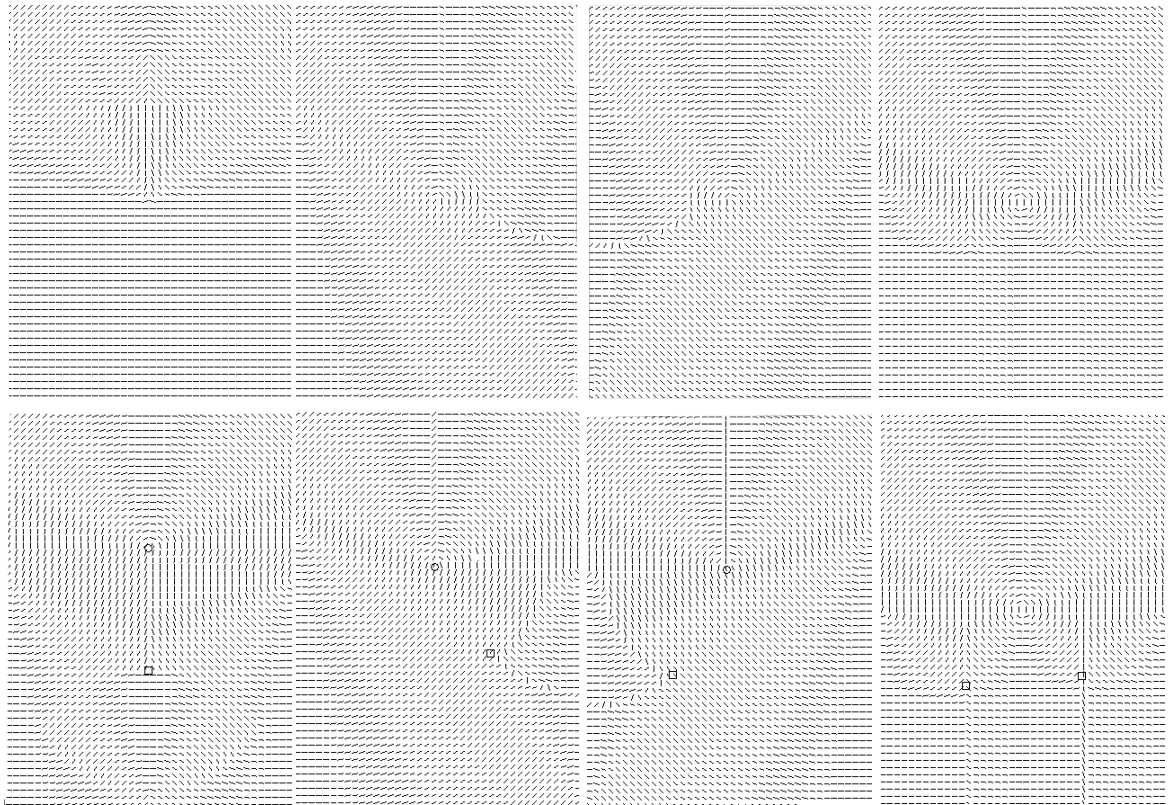


Obrázek 6.5: Směrové pole vytvořené přístupem podle článku [6].

6.3.3 Odhad na základě předdefinovaných tříd otisků prstů

Jak bylo uvedeno v sekci 4.4, generátor SyFDaS má podporu volby třídy otisku prstu, která slouží k vylepšení směrového pole. Pro každou třídu je předdefinováno pole, které může být následně upraveno směry markantů s dostatečně nízkou vahou. Toto základní pole pro třídu zajistí, že výsledné směrové pole skutečně odpovídá dané třídě, zatímco korekce směry markantů jej přizpůsobí konkrétnímu otisku. Po neúspěchu s modelem popsáním výše bylo řešení založeno na tomto systému.

Hlavní nevýhoda současného řešení je, že definice pro jednotlivé třídy jsou převážně statické – nedokážou se přizpůsobit konkrétním otiskům. Následná korekce směrů nemusí pak být dostatečná v případech, kdy je skutečné jádro otisku na odlišném místě, nebo jsou směry úplně jiné. Jde o stejný problém, jaký se objevil v případě modelu v předchozí sekci. Definice tříd v některých případech obsahují jistou náhodnost v umístění singularit nebo v míře zakřivení papilárních linií, pro generování otisků ze šablony je však taková náhodnost nevhodná. Z těchto důvodů bylo cílem upravit každou z pěti podporovaných tříd tak, aby reflektovaly zadané pozice singularit. Chování papilárních linií kolem singularit může být poněkud rozdílné pro jednotlivé třídy. Kvůli tomu se nepodařilo vytvořit pouze jednu univerzální definici, která by uměla vytvořit správné směrové pole pouze na základě pozic a typů singularit. Změny jednotlivých tříd byly založeny na již existujícím kódu. Jednotlivé definice však byly implementovány různými autory a některé musely být vytvořeny znovu. Je nutno podotknout, že i po těchto úpravách se stále jedná o průměrná směrová pole pro danou třídu a nemusí ve všech případech zcela vyhovovat. Následná korekce směry markantů je stále nezbytná, ale ne vždy musí vyprodukovat dobrý výsledek. Příklady vytvořených směrových polí pro jednotlivé třídy před provedenými změnami a po nich lze vidět na obrázku 6.6. Směrové pole pro třídu oblouk nebylo upraveno, neboť neobsahuje žádné singularity.



Obrázek 6.6: Základní směrová pole pro jednotlivé třídy bez využití singularit v předchozí verzi (nahore) a s nimi v nové verzi (dole). Zleva: klenutý oblouk, levá smyčka, prvá smyčka, spirála.

Jelikož generátor SyFDaS zatím vůbec nepracoval se singularitami, které jsou nyní pro použití tříd otisků prstů potřebné, bylo nutné přidat do uživatelské rozhraní ovládací prvky pro jejich manipulaci. Přidávání singularit bylo řešeno dvěma tlačítky a následné změny polohy či mazání jsou prováděny stejně jako manipulace s markanty, tedy přímo na plátně generátoru. Při běžné práci s generátorem je tedy nyní možné definovat pozice singularit, čímž je automaticky odhadnuta třída otisku prstu a zvoleno správné směrové pole. To je následně upraveno podle směru markantů. Automaticky zvolenou třídu otisku prstu lze však stále změnit a tím vynutit jinou.

Dosud popsané změny měly za cíl zlepšit odhad směrového pole, který již v generátoru byl. Bohužel jejich důsledkem vzniká závislost na znalost singularit, která stále brání automatickému generování otisků prstů z biometrických šablon. V případě, kdy jsou singularity uloženy v šabloně (viz sekce 3.3) již není potřeba provádět další kroky. Pokud však singularity v šabloně nejsou, musí být nejprve odhadnuty. Kvůli časové tísní bylo rozhodnuto za tímto účelem použít dříve implementovaný přístup odhadu směrového pole pomocí modelu z článku [6]. Jak bylo uvedeno, snahy o zlepšení celkové odhadu částečně zlepšily alespoň detekci singularit. Největším problémem modelu byl špatný odhad ostatních parametrů a tím pádem i směrového pole. Implementace modelu byla tedy přetransformována do podoby, která na základě markantů a rozměrů obrázku vrátí pouze odhadnuté pozice a typy singularit. Ty mohou být následně použity pro určení třídy otisku prstu a odpovídajícího základního směrového pole. Nevýhodou tohoto rozhodnutí je ovšem nemožnost odhadnout singularity pro otisk třídy spirála. Model naopak dokáže odhadnout otisky se

dvěma páry singularit, které generátor nezná a tím pádem tuto konfiguraci považuje za nevalidní a nepoužije žádné základní směrové pole. Jelikož je odhad singularit pouze dílčí funkcionalita, a odlišné řešení by vyžadovalo další rozsáhlý výzkum, bylo rozhodnuto tento problém v současné verzi neřešit.

Kapitola 7

Vyhodnocení vygenerovaných otisků

Jelikož je cílem práce generování syntetických otisků prstů z biometrické šablony, měly by získané otisky být co nejvěrněji podobné skutečným otiskům, ze kterých byly šablony získány. Během implementace byly výsledky průběžně vizuálně srovnávány, nicméně tato metoda není exaktní. Náplní této kapitoly je srovnání získaných výsledků pomocí komerčního porovnávače otisků prstů.

7.1 Použité nástroje a data

Pro srovnání syntetických a originálních otisků prstů byl použit *VeriFinger SDK*¹ od společnosti *Neurotechnology*. Kromě samotného porovnání, disponuje tento nástroj i funkcionalitou pro tvorbu biometrických šablon různých formátů. Mezi nimi jsou i standardizované šablony od společností ISO a ANSI. Díky podpoře standardu ISO-IEC 19794-2:2005, kterou generátor SyFDaS podporuje byl *VeriFinger* zvolen i pro tvorbu testovacích biometrických šablon.

Při porovnávání dvou otisků určí *VeriFinger* skóre, udávající podobnost otisků. Tohle skóre může dosahovat hodnot přes 1000 pro identické otisky. Nelze však očekávat, že by syntetický otisk prstu dosahoval takových hodnot. Biometrické systémy obvykle nastavují hranici *false acceptance rate* (FAR), která je v procentech. Tato hodnota udává procento verifikovaných vzorků, které jsou označeny nepravdivě jako shodné. Z dokumentace lze vyčíst, že ve *VeriFinger* odpovídá FAR 0,1 % skóre 36, 0,000001 % pak odpovídá skóre 96. Hranici skóre odpovídajícího zadané FAR lze nalézt následujících formulí:

$$\text{Skóre} = -12 \cdot \log_{10} \frac{\text{FAR \%}}{100}$$

Na základě těchto hodnot lze v následujících experimentech určit, kolik z vygenerovaných otisků by v systému využívající *VeriFinger* a danou FAR uspělo.

Druhou nezbytnou součástí pro vyhodnocení je databáze otisků prstů. Pro tento účel byla zvolena databáze *NIST Special Database 4* [33]. Databáze obsahuje 2000 černobílých snímků otisků prstů pěti různých tříd: oblouk, klenutý oblouk, levá smyčka, pravá smyčka a spirála. Tyto třídy korespondují s těmi podporovanými generátorem SyFDaS. Snímky mají rozměry 512x512 pixelů s 72 DPI. Toto rozlišení je bohužel pro *VeriFinger* příliš

¹<https://www.neurotechnology.com/verifinger.html>

malé a snímky nelze načíst. Generátor SyFDaS navíc generuje obrázky do maximálních rozměrů 320x440 pixelů. Z těchto důvodů bylo provedeno zmenšení obrázků na velikost 320x320 pixelů a úprava jejich rozlišení na 500 DPI. Díky tomu mají vygenerované otisky prstů stejné rozměry i rozlišení jako původní snímky, což je pro účely porovnávání žádoucí. Změna velikost byla provedena nástrojem *ImageMagick*².

Vzhledem k tomu, že otisky prstů je potřeba generovat v uživatelském rozhraní SyFDaS manuálně a samotné generování je časově náročné, z celé databáze bylo vybráno 25 otisků prstů. Otisky byly zvoleny tak, aby každá třída byla zastoupena pěti různými snímky a jednotliví zástupci nebyly příliš podobní. Z těchto 25 otisků prstů byly vytvořeny nástrojem *VeriFinger* biometrické šablony ISO-IEC 19794-2:2005, které byly použity v následujících experimentech. Celkem bylo vygenerováno 75 syntetických otisků.

7.2 Plně automatické generování

První sada 25 syntetických otisků byla vytvořena plně automatizovaně, bez jakýchkoliv zásahů. Cílem tohoto experimentu bylo vyhodnotit úspěšnost odhadu pozic singularit a tím tedy i třídy otisku prstu. U otisků, kde byly singularity odhadnuty špatně, je dále zajímavé pozorovat úspěšnost porovnání i bez předdefinovaného směrového pole.

Skóre pro jednotlivé otisky prstu lze vidět v tabulce 7.1. Jak si lze povšimnout, celkem pouze osm otisků přesáhlo hodnotu skóre 36, která odpovídá FAR 0,1 %. Ačkoliv je tato hodnota nízká, není to pro automatické generování úplně špatný výsledek. Jeden z otisků třídy klenutý oblouk dokonce dosáhl skóre, které je velmi blízké hranici pro FAR 0,000001 %. Celkově ze všech tříd otisků prstů dopadla nejlépe třída oblouk, jejíž medián skóre všech pěti otisků dosáhl hodnoty 32. Důvodem, proč právě otisky třídy oblouk dosáhly dobrých výsledků je pravděpodobně to, že tato třída nemá žádné singularity a směrové pole se nemění příliš náhle. Oblouky mají výhodu i v případech, kdy selže odhad singularit a není použito žádné základní směrové pole. Absence jader či delt je pro výpočet směrového pole pouze z markantů ideální.

Pro zbylé třídy lze obecně říct, že jejich otisky dosahovaly velmi nízkých skóre v případech, kdy byla třída špatně detekována. Existují však i výjimky. Například otisk W/1, který je třídy spirála. Pro tuto třídu, jak bylo uvedeno v sekci 6.3, není možné automaticky najít singularity korektně a tato třída nebude nikdy automaticky detekována. I přes to otisk získal skóre 65. Tento otisk lze vidět na obrázku 7.1. Je zřejmé, že vygenerovaný otisk nepatří do třídy spirála a nebylo by možné si jej splést s reálným otiskem. Nicméně díky dostatečnému množství markantů v oblastech delt nebyla absence základního směrového pole problém a delty jsou i tak viditelné. Ačkoliv zatočená část otisku nebyla správně vygenerována, některé její markanty byly zachyceny a porovnávač tento otisk dokázal celkem úspěšně porovnat s originálem.

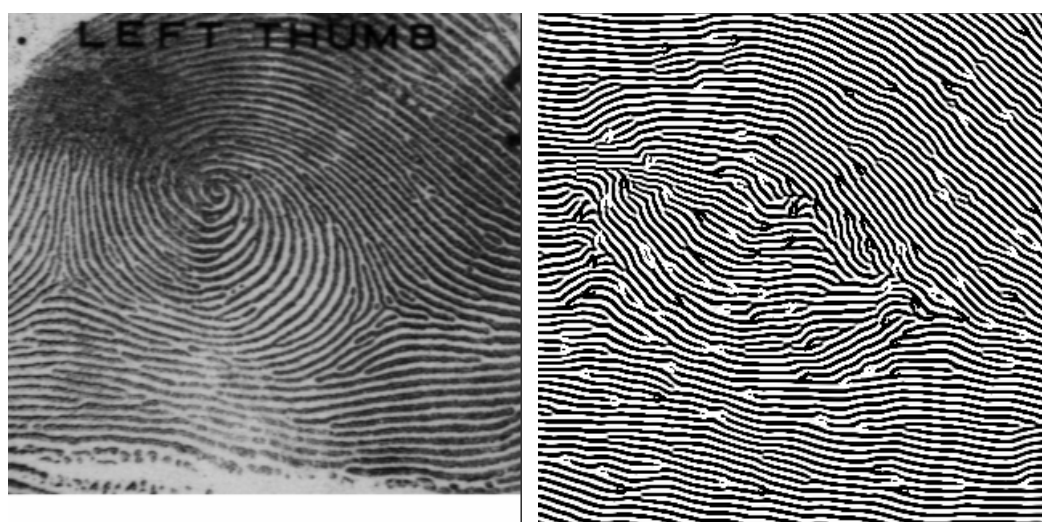
²<https://imagemagick.org/index.php>

Tabulka 7.1: Skóre otisků vygenerovaných s odhadem pozic singularit.

Oblouk			Klenutý oblouk		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %
A/1	58	Ano	T/1	7	Ne
A/2	43	Ano	T/2	28	Ne
A/3	8	Ne	T/3	9	Ne
A/4	17	Ne	T/4	38	Ano
A/5	32	Ne	T/5	94	Ano
Medián	32	Ne	Medián	28	Ne

Levá smyčka			Pravá smyčka		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %
L/1	21	Ne	R/1	28	Ne
L/2	50	Ano	R/2	44	Ano
L/3	27	Ne	R/3	24	Ne
L/4	8	Ne	R/4	15	Ne
L/5	40	Ano	R/5	32	Ne
Medián	27	Ne	Medián	28	Ne

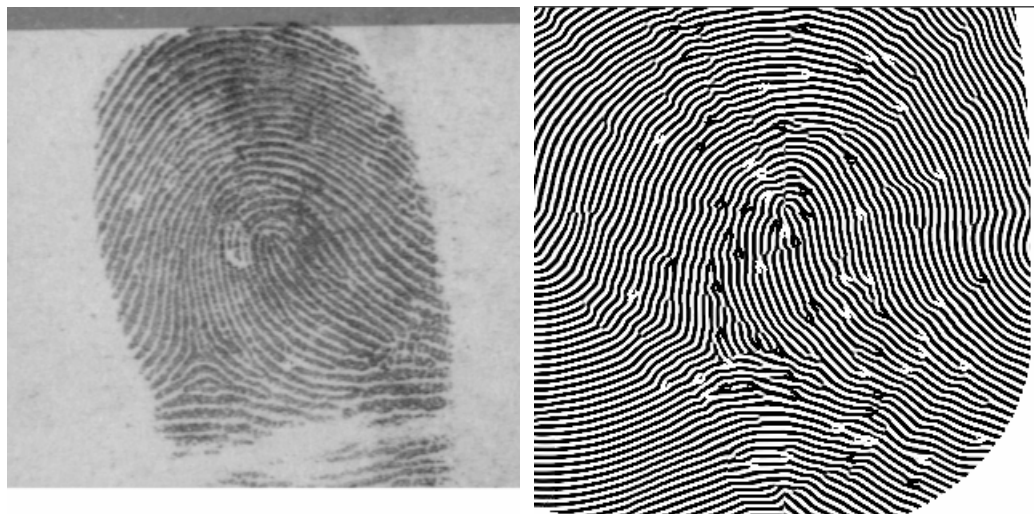
Spirála			Všechny třídy		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	Třída	Skóre	FAR 0,1 %
W/1	65	Ano	Oblouk	32	Ne
W/2	25	Ne	Klenutý oblouk	28	Ne
W/3	24	Ne	Levá smyčka	27	Ne
W/4	17	Ne	Pravá smyčka	28	Ne
W/5	25	Ne	Spirála	25	Ne
Medián	25	Ne	Celkový medián	27	Ne



Obrázek 7.1: Původní otisk W/1 a plně automaticky vygenerovaný syntetický otisk.

Na obrázku 7.2 se nachází příklad jiného otisku prstu. Jedná se o otisk R/1 a podařilo se u něj správně odhadnout jeho třídu. Do značné míry lze říct, že samotné pozice singularit

odpovídají a odhad tedy dopadl velmi dobře. Otisk však získal nízké skóre a to pouhých 28. Bohužel se v tomto případě zdá, že předdefinované směrové pole pro otisk třídy pravá smyčka je příliš odlišné od toho správného a ani korekce markanty nepomohla. Vedlejším efektem takových případů může být situace, kdy výsledné směrové pole není příliš hladké a tím pádem i vygenerovaná papilární linie je kostřbatá. Porovnávač pak jednotlivé výběžky na linii může interpretovat jako ukončení. Větší množství v originálním otisku neexistujících markantů pak může způsobovat nízké skóre.



Obrázek 7.2: Původní otisk R/1 a plně automaticky vygenerovaný syntetický otisk.

Při prohlížení jednotlivých syntetických otisků bylo stanoveno, že hustota papilárních linií je pro některé otisky příliš vysoká. Následkem toho působí otisky na pohled velmi zmateně a některé markanty mohou splývat. Vyšší hustota také zvyšuje šanci, že se papilární linie omylem spojí a vytvoří další markanty. Bylo tedy rozhodnuto vygenerovat další sadu otisků s nižší hustotou papilárních linií. Pro jednoduchost byla použita stejná hodnota hustoty pro všechny body obrázku. Výsledky lze vidět v tabulce 7.2. Hranici FAR 0,1 % se tentokrát podařilo překonat 9 otiskům a nejúspěšnější třídou byla tentokrát levá smyčka. Při prozkoumání výsledků je patrné, že snížení hustoty skutečně pomohlo a skóre otisků prstů se zvýšilo. Znatelně se zlepšilo skóre například otisků L/3, R/5 nebo W/1. V případě některých jiných otisků však skóre naopak pokleslo. Tento jev lze však považovat za přirozený, nově nastavená hodnota hustoty nemusí vyhovovat všem otiskům. Při novém generování také došlo k novému odhadu singularit, což mohlo způsobit detekci jiné třídy a tím pádem i lepších či horších výsledků. Celkově lze říct, že ve většině případů bude otiskům vyhovovat spíše nižší hodnota hustoty, než je ta výchozí v generátoru SyFDaS. Zkušenosti s generováním otisků i mimo tento experiment závěry také potvrzují. Dalším možným vysvětlením je i to, že algoritmus extrakce markantů v nástroji *VeriFinger* lépe detekuje markanty oddělené větším údolím mezi liniemi.

Tabulka 7.2: Skóre otisků vygenerovaných s odhadem pozic singularit a nižší hustotou papilárních linií.

Oblouk			Klenutý oblouk		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %
A/1	60	Ano	T/1	8	Ne
A/2	28	Ne	T/2	42	Ano
A/3	14	Ne	T/3	17	Ne
A/4	17	Ne	T/4	30	Ne
A/5	30	Ne	T/5	99	Ano
Medián	28	Ne	Medián	30	Ne

Levá smyčka			Pravá smyčka		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %
L/1	25	Ne	R/1	26	Ne
L/2	53	Ano	R/2	37	Ano
L/3	38	Ano	R/3	10	Ne
L/4	2	Ne	R/4	23	Ne
L/5	42	Ano	R/5	65	Ano
Medián	38	Ano	Medián	26	Ne

Spirála			Všechny třídy		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	Třída	Skóre	FAR 0,1 %
W/1	92	Ano	Oblouk	28	Ne
W/2	29	Ne	Klenutý oblouk	30	Ne
W/3	30	Ne	Levá smyčka	38	Ano
W/4	25	Ne	Pravá smyčka	26	Ne
W/5	32	Ne	Spirála	30	Ne
Medián	30	Ne	Celkový medián	30	Ne

Ačkoliv některé příklady ukázaly, že i bez správně detekované třídy otisku prstu lze vyprodukovat kvalitní syntetický otisk, tyto otisky však vizuálně vůbec nepřipomínají reálný otisk. Nehledě na zlepšení skóre některých otisků díky nižší hustotě je zřejmé, že největší slabinou generátoru je odhad pozic singularit. I přes drobná zlepšení popsané v sekci 6.3 není tento postup dostatečný a do budoucna budou potřeba další úpravy. Na příkladu z obrázku 7.2 je totiž patrné, že správně detekovaná třída je minimálně pro vizuální uvěřitelnost otisku nezbytná.

7.3 Generování s manuální korekcí

Třetí experiment na rozdíl od předchozích dvou cílí otestovat schopnosti současné verze generátoru v případě, že se uživatel rozhodne otisk alespoň trochu přizpůsobit. Pro tuto sadu syntetických otisků byly tedy manuálně upraveny detekované singularity tak, aby co nejpřesněji odpovídaly původnímu otisku prstu. Všechny otisky byly generovány se stejnou hustotou jako v druhém experimentu, aby byly manuální zásahy co nejmenší. Nicméně pokud bylo skóre některého otisku výrazně nízké, bylo vynaloženo vyšší úsilí hustotu nebo další parametry manuálně doladit. Výsledky z tohoto experimentu se nacházejí v tabulce 7.3.

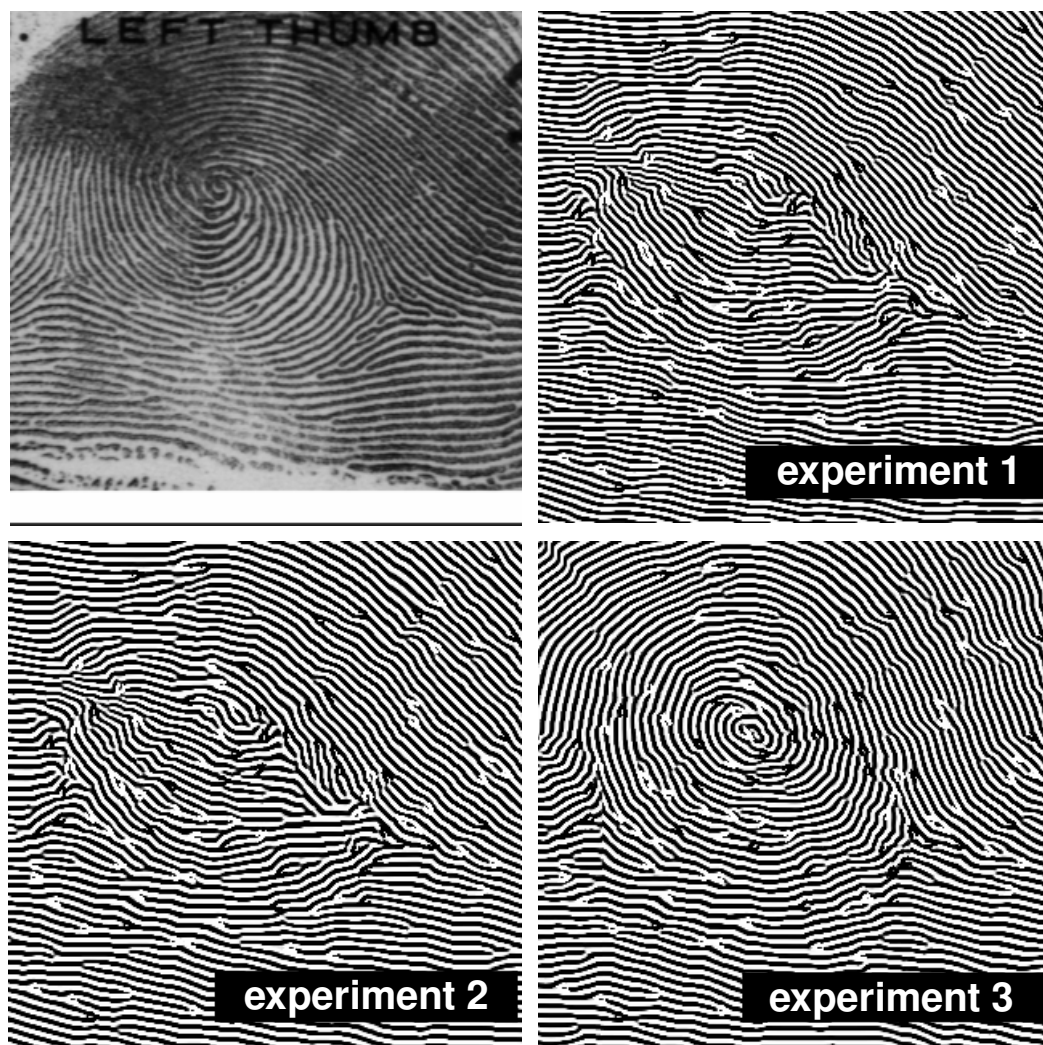
Tabulka 7.3: Skóre otisků vygenerovaných s manuálními zásahy.

Oblouk			Klenutý oblouk		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %
A/1	59	Ano	T/1	24	Ne
A/2	24	Ne	T/2	51	Ano
A/3	20	Ne	T/3	51	Ano
A/4	60	Ano	T/4	44	Ano
A/5	48	Ano	T/5	59	Ano
Medián	48	Ano	Medián	51	Ano

Levá smyčka			Pravá smyčka		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %
L/1	49	Ne	R/1	30	Ne
L/2	79	Ano	R/2	39	Ano
L/3	24	Ano	R/3	30	Ne
L/4	13	Ne	R/4	51	Ano
L/5	72	Ano	R/5	38	Ano
Medián	49	Ano	Medián	38	Ano

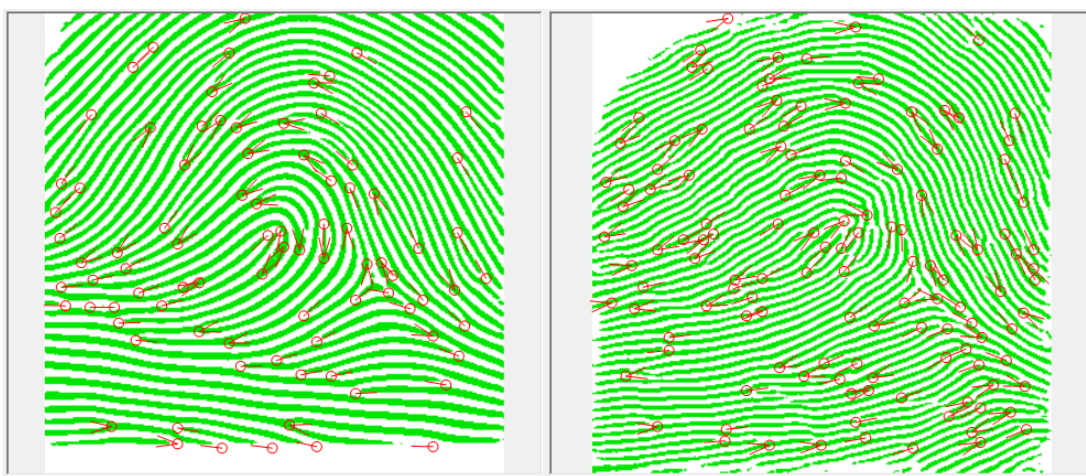
Spirála			Všechny třídy		
ID otisku	Skóre	FAR 0,1 %	Třída	Skóre	FAR 0,1 %
W/1	59	Ano	Oblouk	48	Ano
W/2	43	Ano	Klenutý oblouk	51	Ano
W/3	89	Ano	Levá smyčka	49	Ano
W/4	57	Ano	Pravá smyčka	38	Ano
W/5	86	Ano	Spirála	59	Ano
Medián	59	Ano	Celkový medián	49	Ano

Díky manuálním zásahům do pozic singularit se podařilo všem třídám dosáhnout mediánového skóre, které překonává hranici FAR 0,1%. Takových otisků bylo 18 z 25, 13 z nich přesahuje i hranici pro FAR 0,01% a 4 dokonce hranici FAR 0,001%. Pro většinu otisků došlo ke zvýšení skóre, což ukazuje, že základní směrové pole není důležité jen pro vizuální vzhled otisku. Lze však najít i takové otisky, které dosahovaly podstatně lepšího skóre bez správně určené třídy v prvním nebo druhém experimentu. Jedná se například o otisky A/2, R/5 či W/1. Poslední jmenovaný otisk byl již zkoumán v rámci prvního experimentu a je zajímavé jej porovnat i v rámci tohoto experimentu. Srovnání původního otisku W/1 se syntetickými ze všech tří experimentů se nachází na obrázku 7.3. Na první pohled vypadá třetí vygenerovaný otisk mnohem lépe. Jedná se nyní skutečně o otisk třídy spirála a pozice singularit i středu spirály přibližně odpovídají. Bohužel, jakékoliv snahy otisk zlepšit nedosáhly dalšího zlepšení. Při důkladném srovnání jednotlivých otisků lze najít jen několik markantů, které otisky z prvních dvou experimentů vystihly o něco lépe. Je možné, že *VeriFinger* zrovna tyto markanty upřednostnil a povedlo se mu přes ně vytvořit lepší porovnání než v případě manuálně upraveného otisku.



Obrázek 7.3: Původní otisk W/1 a vygenerovaný syntetický otisk s manuálními úpravami singularit.

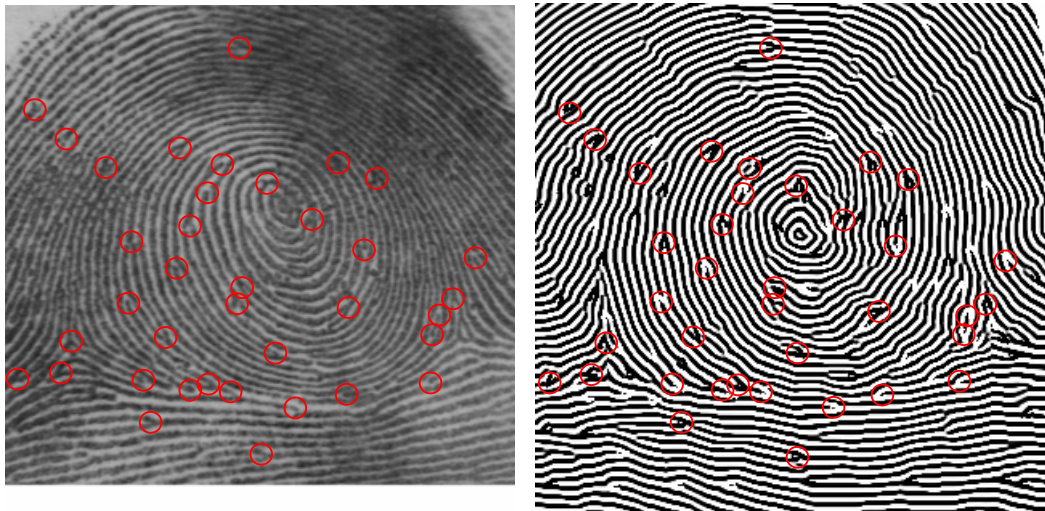
Dalším zajímavým otiskem je otisk L/4. Tento otisk dosahoval velmi špatných výsledků ve všech třech experimentech a jeho nejvyšší dosažené skóre bylo 13. Ani v tomto případě se žádným nastavením generátoru nepodařilo skóre více vylepšit. Na obrázku 7.4 se nachází snímek obrazovky z ukázkového nástroje s grafickým uživatelským rozhraním pro verifikaci otisků prstů z *VeriFinger SDK*. Na první pohled je vidět, že v syntetickém otisku prstu se nachází podstatně více markantů. Ve všech těchto markantech bohužel *VeriFinger* pravděpodobně vidí neshodu, která následně vede na nízké skóre. Důvodem tohoto vysokého počtu markantů je s největší pravděpodobností stejný problém jako byl diskutován v prvním experimentu. Nehladké směrové pole způsobit kostrbaté papilární linie, čímž může docházet k detekci falešných ukončení nebo spojení paralelních linií do vidličky, která se v původním otisku nenachází. U tohoto příkladu je tento efekt zřetelně vidět díky binarizovaným snímkům.



Obrázek 7.4: Původní otisk L/4 a vygenerovaný syntetický otisk s manuálními úpravami singularit.

7.4 Manuální porovnání markantů

V rámci této části vyhodnocení byl jeden otisk prstu prohlédnut důkladně a byly manuálně nalezeny odpovídající markanty. Automatický porovnávač nedetekuje vždy všechny markanty, a ne vždy zahrne všechny odpovídající markanty do výsledného porovnání. Důvodem mohou být například nadbytečné markanty, které do srovnání nesedí. Na obrázku 7.5 se nachází originální a syntetický otisk W/3 z třetího experimentu. V obou otiscích jsou červenými kružnicemi vyznačeny shodné markanty.



Obrázek 7.5: Původní otisk W/4 a vygenerovaný syntetický otisk s manuálními úpravami singularit. Shodné markanty jsou vyznačeny červenými kružnicemi.

Je důležité si uvědomit, že markanty obsažené v biometrické šabloně byly také detekovány pomocí nástroje *VeriFinger*. Z toho důvodu je nutné u některých markantů uvažovat, jestli v daném místě, které jako markant nutně nevypadá, nemohl být při extrakci přeci jen nalezen. V otiscích se takto podařilo nalézt 37 shodných markantů. Je možné si povšimnout, že zejména vidličky jsou v některých případech vygenerovány spíše jako šmouhy. Důvodem je samotný proces generování, kdy jsou nejprve umístěny prototypy markantů a následně jsou generovány papilární linie pomocí Gaborových filtrů. Pokud jsou dva markanty blízko sebe, jsou vygenerovány jeden přes druhého, místo toho, aby se korektně napojily. Zároveň během generování papilárních linií může dojít k dalšímu poškození těchto markantů a nemohou pak být správně detekovány. Je také možné najít markanty, jejichž směr je v syntetickém otisku zdánlivě o něco jiný než v původním obrázku. Jedná se zejména o ukončení. Prototyp markantu byl v takových případech pravděpodobně vygenerován správně, nicméně vygenerovaná papilární linie (na základě nepřesného směrového pole) vizuální směr markantu pozměnila. Záleží pak na procesu extrakce markantů při verifikaci, jestli nedojde k nadměrnému vyhlazení kostry papilární linie a detekovaný směr syntetického markantu není odlišný. To má samozřejmě za následek nemožnost tyto markanty spárovat.

Je zřejmé, že v obou otiscích se nachází velké množství dalších markantů, které se neshodují. To může být způsobeno například tím, že takové markanty v originálním otisku nebyly vůbec detekovány při tvorbě šablony. V případě syntetického otisku je to způsobeno přirozeným jevem při generování papilárních linií pomocí Gaborových filtrů, kdy mohou vzniknout úplně nové markanty.

7.5 Shrnutí výsledků a možné úpravy

Z poznatků získaných během experimentů popsaných v předchozích sekcích lze vyvodit několik závěrů. Srovnání výsledků prvních dvou experimentů se třetím jasně ukazuje, že největší překážkou v plně automatizované generování syntetických otisků je odhad pozic singularit. Tyto výsledky se částečně daly očekávat již ze závěrů udělaných během vývoje. Syntetické otisky prezentované v článku však [6] naznačují, že tato metoda má potenciál. Stálo by tedy za vyzkoušení, zdali by například některý z genetických algoritmů dokázal

odhadnout parametry modelu lépe. Sekci 6.3 upozorňuje na možné problémy se samotným modelem, které zabraňují vytvoření správného směrového pole pro určité konfigurace singularit. Je však možné, že s lepší minimalizací by tyto problémy byly zanedbatelné a model by mohl dokonce být použit i pro celkový odhad směrového pole. Pokud by byla nutná následná korekce úhly markantů, bylo by možné ji řešit odděleně v různých oblastech v závislosti na pozicích singularit. Takový přístup by mohl snížit negativní vliv blízkých markantů, které se nalézají na opačné straně singularity a jejich směr je naprosto odlišný. I kdyby by model stále nebyl dostatečný pro odhad směrového pole, zlepšení minimalizace by mohlo vést na kvalitnější odhad singularit, který by stejně jako v současné verzi mohl být použit pouze jako první krok odhadu směrového pole.

Myšlenka lokalizované korekce směrového pole markanty by byla užitečná i při odhadu směrového pole současnou metodou založenou na základním směrovém poli podle třídy a korekcí markantů. Jak experimenty ukázaly, v některých případech tato korekce způsobuje nehladké směrové pole, které se následně projevuje v kostrbatých papilárních liniích. Tento jev, kromě vytvoření falešných markantů, dělá otisk prstu nepřírozený. V ideálním případě by generátor již při tvorbě směrového pole měl umět odhadnout, že mezi dvojicí markantů má pravděpodobně být jasná papilární linie a směrové pole by tedy mělo být co nejplynulejší.

Lze nalézt i možná vylepšení pro základní směrová pole jednotlivých tříd. V sekci 3.3 o biometrických šablonách, bylo uvedeno, že nepovinné záznamy o singularitách kromě jejich polohy obsahují i informaci o jejich úhly. Tento úhel například v případě delty udává, jaký úhel mají papilární linie vycházející z této delty v jednotlivých směrech. Tato informace není však v současné verzi nijak využita. Za předpokladu, že je tato informace dostupná a základní směrové pole by ji využívalo, lze v oblastech kolem singularit očekávat podstatné zlepšení. Takové pole by mělo vyžadovat mnohem menší korekci úhly markantů, což by snižovalo její negativní vlivy diskutované v předchozích odstavcích.

Ze závěrů manuálního porovnání dvou otisků je patrné, že samotné vygenerované markanty nemívají nejlepší kvalitu. Některé vidličky působí spíše jako černé šmouhy a ukončení často generují několik nadbytečných pixelů. Obrázek binarizovaného otisku prstu 7.4 ukazuje, že porovnávač si s těmito defekty poradí, nicméně i tyto mohou být zdrojem nadbytečných markantů. Stejný efekt má i použití Gaborových filtrů pro samotné generování papilárních linií. Jak je známo, tento postup přirozeně generuje další markanty. Obvykle je tento fakt považován za výhodu, nicméně v případě generování z biometrických šablon je tomu spíše naopak. Bylo by naopak žádoucí, aby měl výsledný otisk prstu jen a pouze markanty obsažené v biometrické šabloně. Snahy o zamezení tvorby nových markantů by však nejspíše vedly na úplně jiné řešení.

S markanty souvisí i další potenciální problém. Při detekci a ukládání markantů do biometrických šablon se mimo jiné řeší i jejich přesná pozice na kostře papilární linie (viz sekce 3.3). Tato pozice může být rozdílná pro jednotlivé šablony. Generátor však markanty umisťuje vždy stejným způsobem, což může způsobit drobné odchylky mezi pozicí markantu v originálním obrázku a syntetickém otisku. Ačkoliv by tento rozdíl měl být vcelku malý, lze věřit tomu, že i on může způsobit drobné rozdíly při porovnávání. Společně s nedokonalými prototypy markantů zmíněnými v předchozím odstavci mohou tyto rozdíly vést i na splynutí či ztrátu některých z nich.

Ačkoliv nebyly v rámci této práce implementovány heuristiky pro úpravu pole hustoty nebo jeho celkový odhad, z porovnání výsledků prvních dvou experimentů lze vyvodit, že i tato změna by měla pozitivní vliv na výsledné otisky. Pro tento účel se zdá být jako nejlepší zdroj informací počet papilárních linií mezi páry markantů, který lze nepovinně nalézt v biometrických šablonách. Jak již však bylo zmíněno v sekci 5.3, nelze předpokládat,

že je tato informace v šablonách příliš běžná. Algoritmus, který by tuto informaci využíval by tedy byl spíše optimalizace. Potřebné informace by však možná šly vyčíst i ze samotných markantů. V otiscích se často objevují páry markantů, které leží velmi blízko vedle sebe. Pokud se navíc zdají být orientovány paralelně k očekávanému směru proudění papírní linie, lze očekávat, že leží na dvou vedlejších liniích. Z toho by pak šlo odhadnout i samotnou frekvenci.

Ve srovnání s ostatními přístupy zmíněnými v kapitole 4 lze říct, že generátor SyFDaS stojí někde uprostřed. SFinGe zcela zřejmě generuje lepší a věrohodnější otisky prstů. Je ovšem důležité vzít v potaz fakt, že se nesnaží napodobit existující otisk prstu a jeho odhad směrového pole je založen na náhodných hodnotách. Generátory navržené v článcích [25] a [6] řeší stejně jako SyFDaS generování z biometrických šablon. Ačkoliv metoda v prvním ze zmíněných článků měla své výhody, výsledné syntetické otisky byly pouze částečné a nebyly tedy příliš uvěřitelné. Článek [6] prezentuje velmi dobré výsledky, ať již po vizuální stránce otisků, tak při automatickém porovnávání. SyFDaS je návrhově k tomuto generátoru asi nejbližší, nicméně jeho výsledky nejsou prozatím srovnatelné, zejména jde-li o automatický odhad směrového pole.

Kapitola 8

Závěr

V rámci této diplomové práce byly nastudovány biometrické vlastnosti otisků prstů, metody pro jejich rozpoznávání a následného porovnávání s jinými otisky prstů za účelem identifikace či verifikace. Dále bylo nutné seznámit se s biometrickými šablonami a generátory syntetických otisků prstů. Na základě nabytých znalostí byla navržena metoda pro generování syntetického otisku prstu z biometrické šablony postavená na existujícím generátoru SyFDaS, který je vyvíjen na Fakultě informačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Tato metoda byla následně implementována a vyhodnocena, čímž byly splněny všechny body zadání.

Rozhodnutí, které byly v rámci návrhu uskutečněny, vedly k návrhu automatizovaného procesu. Dosud manuální postup generování otisku prstu v generátoru SyFDaS měl být rozšířen o kompletně automatické generování z biometrické šablony. K propojení jednotlivých kroků generování bez nutnosti zásahu uživatele bylo potřeba navrhnout některé kroky odlišným způsobem. Jednalo se zejména o odhad tvaru otisku prstu nebo odhad směrového pole. Navržený systém pro zpracování biometrické šablony měl také umožnit snadnou rozšiřitelnost o podporu dalších šablon, ale i jejich tvorbu v generátoru.

Navržené změny byly v dalším kroku implementovány. Z alternativních metod pro odhad směrového pole byla zvolena metoda pracující se základními směrovými poli pro jednotlivé třídy otisků prstů, které jsou následně upraveny úhly známých markantů. Základní směrová pole jsou definovaná pomocí pozic singularit a přizpůsobí se tedy konkrétnímu otisku prstu. K automatizování procesu odhadu směrového pole bylo nutné implementovat metodu pro detekci singularit pouze z markantů. Pro tento účel byla využita metoda odhadu směrového pole, která pracuje i se singularitami. Ačkoliv byla tato metoda vyzkoušena i pro celkový odhad směrového pole, nedosahovala očekávaných výsledků. Její použití pro detekci singularit však bylo dostatečné jako první krok do úplně nové funkcionality generátoru SyFDaS. Všechny implementované úpravy měly za cíl zlepšit generátor SyFDaS celkově, nikoliv jen pro účely generování z biometrické šablony.

Po implementaci bylo provedeno vyhodnocení kvality syntetických otisků prstů vytvořených z biometrických šablon. Experimenty v průběhu vyhodnocení měly za cíl ukázat, jak generátor zvládá zcela automatické generování otisků a jak lze tyto otisky dále vylepšit, pokud uživatel nespolehá na automatické řešení a jednotlivé parametry generování upraví. Zejména výsledky otisků vytvořených s manuálním zásahem uživatele byly uspokojivé. Některé syntetické otisky dokázaly uspět v porovnávání se skutečnými otisky pomocí nástroje *VeriFinger* i při hranici *false acceptance rate* nastavenou na hodnotu 0,001 %.

Na závěr byly diskutovány problémy současného řešení a možnosti, jakými je lze řešit. Pro účely automatizovaného generování je nezbytné dále vylepšit proces detekce singularit,

který se zdá být nejslabší částí generátoru. Další možné změny by měly cílit na celkové zlepšení kvality výsledný syntetických otisků. Jde například o lepší korekci základního směrového pole pomocí markantů, přesnější umístování prototypů známých markantů nebo jejich samotná kvalita. Všechny tři tyto úpravy by měly vést na tvorbu menšího počtu nadbytečných markantů, které mohou mít negativní vliv při verifikaci syntetického otisku. Vylepšení a automatizace dalších částí generátoru, jako je například pole hustoty papírních linií, by také měly vést na kvalitnější výsledný syntetický otisk.

Literatura

- [1] ARRIETA, A. G., ESTRADA, G. C., ROMERO, L. A., LÁZARO, Á. L. S. a LANCHO, B. P. Neural Networks Applied to Fingerprint Recognition. In: *Distributed Computing, Artificial Intelligence, Bioinformatics, Soft Computing, and Ambient Assisted Living*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, s. 621–625. ISBN 978-3-642-02481-8.
- [2] BALDI, P. a CHAUVIN, Y. Neural Networks for Fingerprint Recognition. *Neural Computation*. Květen 1993, sv. 5. DOI: 10.1162/neco.1993.5.3.402.
- [3] BOLLE, R., PANKANTI, S. a JAIN, A. K. *Biometrics, Personal Identification in Networked Society: Personal Identification in Networked Society*. USA: Kluwer Academic Publishers, 1998. ISBN 0-7923-8345-1.
- [4] CABRAL, B. a LEEDOM, L. C. Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution. In: *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1993, s. 263–270. SIGGRAPH '93. DOI: 10.1145/166117.166151. ISBN 0897916018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/166117.166151>.
- [5] CAPPELLI, R. SFinGe: An Approach to Synthetic Fingerprint Generation. In: *International Workshop on Biometric Technologies (BT2004)*. 2004, s. 147–154.
- [6] CAPPELLI, R., MAIO, D., LUMINI, A. a MALTONI, D. Fingerprint Image Reconstruction from Standard Templates. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Září 2007, sv. 29, s. 1489–1503. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1087.
- [7] CHALOUPKA, R. *Generátor otisků prstů*. Brno, CZ, 2007. 52 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/52753>.
- [8] COUNCIL OF EUROPEAN UNION. *Council regulation (EU) no 2016/679*. 2016 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>.
- [9] DALUZ, H. M. *Fundamentals of Fingerprint Analysis, Second Edition*. Taylor & Francis, 2018. 353 s. ISBN 978-1-138-48745-1.
- [10] DRAHANSKÝ, M. *Biometrické systémy*. Studijní opora, 2006. Dostupné z: https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/BIO/private/BIO_Studijni_opora.pdf.
- [11] HARA, M. Fingerprint Image Enhancement. In: LI, S. Z. a JAIN, A., ed. *Encyclopedia of Biometrics*. Boston, MA: Springer US, 2009, s. 474–482. DOI: 10.1007/978-0-387-73003-5_49. ISBN 978-0-387-73003-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_49.

- [12] HICKLIN, R. A. Anatomy of Friction Ridge Skin. In: *Encyclopedia of Biometrics*. Boston, MA: Springer US, 2009, s. 23–28. DOI: 10.1007/978-0-387-73003-5_48. ISBN 978-0-387-73003-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_48.
- [13] HONG, L., WAN, Y. a JAIN, A. Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. Zář 1998, sv. 20, s. 777 – 789. DOI: 10.1109/34.709565.
- [14] HOUCK, M. M., ed. *Forensic Fingerprints*. Elsevier Science, 2016. 208 s. Advanced Forensic Science Series. ISBN 9780128006726. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=-x7fcQAAQBAJ>.
- [15] FEDERAL BUREAU OF INVESTIGATION. *The Science of Fingerprints: Classification and Uses*. Federal Bureau of Investigation, 2019. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=e-HCDwAAQBAJ>.
- [16] U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE. *The Fingerprint: Sourcebook*. U.S. Department of Justice, 2014. Dostupné z: <https://books.google.de/books?id=erPOoQEACAAJ>.
- [17] KAMEI, T. a MIZOGUCHI, M. Image filter design for fingerprint enhancement. In: *Proceedings of International Symposium on Computer Vision - ISCV*. 1995, s. 109–114. DOI: 10.1109/ISCV.1995.476986.
- [18] KANICH, O. *Research in Fingerprint Damage Simulations*. Brno, CZ, 2019. Ph.D. thesis. Brno University of Technology, Faculty of Information Technology. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/phd-thesis/832/>.
- [19] LEUNG, W. F., LEUNG, S. H., LAU, W. H. a LUK, A. Fingerprint recognition using neural network. In: *Neural Networks for Signal Processing Proceedings of the 1991 IEEE Workshop*. 1991, s. 226–235. DOI: 10.1109/NNSP.1991.239519.
- [20] MAIO, D. a MALTONI, D. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1997, sv. 19, č. 1, s. 27–40. DOI: 10.1109/34.566808.
- [21] MALTONI, D., MAIO, D., JAIN, A. a PRABHAKAR, S. *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer London, 2009. Springer Professional Computing. ISBN 9781848822542.
- [22] MEMON, S., SEPASIAN, M. a BALACHANDRAN, W. Review of finger print sensing technologies. In: *2008 IEEE International Multitopic Conference*. Leden 2009, s. 226–231. DOI: 10.1109/INMIC.2008.4777740.
- [23] PAUL, A. M. a LOURDE, R. M. A Study on Image Enhancement Techniques for Fingerprint Identification. In: *2006 IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance*. 2006, s. 16–16. DOI: 10.1109/AVSS.2006.14.
- [24] PRESS, W., TEUKOLSKY, S., VETTERLING, W. a FLANNERY, B. *Numerical Recipes with Source Code CD-ROM 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2007. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. ISBN 9780521884075. Dostupné z: <https://books.google.de/books?id=cOP4KzHMSTcC>.

- [25] ROSS, A., SHAH, J. a JAIN, A. From Template to Image: Reconstructing Fingerprints from Minutiae Points. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. Květen 2007, sv. 29, s. 544–560. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1018.
- [26] SHERLOCK, B. a MONRO, D. A model for interpreting fingerprint topology. *Pattern Recognition*. 1993, sv. 26, č. 7, s. 1047–1055. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(93\)90006-I](https://doi.org/10.1016/0031-3203(93)90006-I). ISSN 0031-3203. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003132039390006I>.
- [27] STRAUS, J. *Kriminalistika, kriminalistická technika*. Vydavatelství PA ČR, 2004. ISBN 80-725-1165-3.
- [28] ČSN ISO/IEC 19794-2: Informační technologie – Formáty výměny biometrických dat – Část 2: Data markantů prstu. Česká agentura pro standardizaci, březen 2007.
- [29] VIZCAYA, P. R. a GERHARDT, L. A. A nonlinear orientation model for global description of fingerprints. *Pattern Recognition*. 1996, sv. 29, č. 7, s. 1221–1231. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(95\)00154-9](https://doi.org/10.1016/0031-3203(95)00154-9). ISSN 0031-3203. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031320395001549>.
- [30] VÁŽAN, R. *ANSI INCITS 378:2009/AM 1:2010[R2015]* [online]. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://templates.machinezoo.com/ansi378-2009am1>.
- [31] VÁŽAN, R. *ISO/IEC 19794-2:2005/Cor.1:2009 Summary* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://templates.machinezoo.com/iso-19794-2-2005>.
- [32] VÁŽAN, R. *ISO/IEC 19794-2:2011/Cor.1:2012 Summary* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://templates.machinezoo.com/iso-19794-2-2011>.
- [33] WATSON, C. NIST Special Database 4. NIST 8-Bit Gray Scale Images of Fingerprint Image Groups. World Wide Web-Internet and Web Information Systems. 1970.
- [34] YANUSHKEVICH, S. Synthetic Biometrics: A Survey. In: *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings*. Leden 2006, s. 676–683. DOI: 10.1109/IJCNN.2006.246749.

Příloha A

Obsah přiloženého paměťového média

Přiložené paměťové médium obsahuje:

- `xsubaa00.pdf` – technická zpráva ve formátu PDF
- `latex` – adresář se zdrojovými soubory technické zprávy ve formátu \LaTeX
- `evaluation` – adresář se šablonami otisků prstů použitých pro vyhodnocení, vygenerovanými otisky a výsledky jednotlivých experimentů
- `SyFDaS` – adresář se zdrojovými soubory generátoru SyFDaS