



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

ANALÝZA FALZIFIKÁTŮ OTISKŮ PRSTŮ VYTVOŘENÝCH Z VYLEPTANÉ FORMY

ANALYSIS OF FINGERPRINT SPOOFS CREATED FROM MOLD DONE BY ETCHING TECHNIQUE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN TILGNER

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce



Student: **Tilgner Jan**
Program: Informační technologie
Název: **Analýza falzifikátů otisků prstů vytvořených z vyleptané formy**
Analysis of Fingerprint Spoofs Created from Mold Done by Etching
Technique
Kategorie: Bezpečnost
Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se biometrického rozpoznávání podle otisků prstů a falzifikátů otisků prstů, soustředte se na metody tvorby formy pro falzifikáty. Seznamte se s generováním syntetických otisků prstů.
2. S využitím vhodných materiálů vytvořte několik forem pro tvorbu falzifikátů otisků pomocí vyleptání.
3. Formy z předchozího kroku využijte na tvorbu falzifikátů, ty nasnímejte s využitím dostupných senzorů (např. SecuGen, DinoLite).
4. Navrhněte metodu analýzy rozdílů mezi zdrojovým otiskem prstu a nasnímaného falzifikátu.
5. Implementujte navržený algoritmus z předchozího bodu.
6. Otestujte algoritmus z předchozího bodu na vytvořené sadě z bodu 3. Pomocí vhodného algoritmu na zjištění kvality otisků prstů (např. Neurotechnology VeriFinger, NFIQ) dále analyzujte kvalitu falzifikátů.
7. Dosazené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná rozšíření Vašeho řešení.

Literatura:

- Drahanský, M. Kanich, O., Dvořák, M.: Spoofing methods in hand-based biometrics, Hand-based Biometrics: Methods and Technologies, IET, 2018, p. 32, ISBN 978-1-78561-224-4.
- Kanich, O., Mézl, M., Drahanský, M.: Creative Materials Used for Fingerprint Spoofs, Proceedings of International Workshop on Biometrics and Forensics 2018, IEEE, Sassari, 2018, p. 8.
- Champod, C., Espinoza, M.: Forgeries of Fingerprints in Forensic Science, Handbook of Biometrics Anti-Spoofing, Springer, 2014, pp. 13-34, ISBN 978-1-4471-6523-1.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Bod 1 a částečně body 2 a 3.

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

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

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

Datum zadání: 1. listopadu 2019

Datum odevzdání: 28. května 2020

Datum schválení: 10. ledna 2020

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou falzifikátů otisků prstů vzniklých z formy vytvořené leptáním. Nejdříve bude vytvořena forma pomocí metody leptání používané při tvorbě plošných spojů. Ta se použije k výrobě falzifikátu z tekutého latexu a ten bude následně nasnímán. Tento snímek je porovnán se svou předlohou. Pro analýzu vytvořených snímků bude navržen a implementován algoritmus, který bude na vytvořené databázi snímků otestován a porovnán s výsledky již existujících algoritmů. Navržený algoritmus páruje markanty do dvojic a snaží se v druhém snímku najít dvojici markantů, se kterými je podobná. Vytvořené falzifikáty dosahovaly nízkých kvalit a otisk se na ně nepřenesl dostatečně detailně.

Abstract

This work aims to analyse fingerprint spoofs from mold created by etching. Mold will be created using the technique used to create printed circuit board. After that spoof will be cast using liquid latex and then scanned. Created spoofs will then be compared to their original image. Algorithm to evaluate these spoofs is designed and implemented. The algorithm works by comparing pairs of minutiae from each fingerprint if they are similar. This algorithm will be tested on database of fingerprint spoofs and the results will be compared to existing software results. Spoofs created by this technique had poor quality and minutiae did not match the original fingerprint.

Klíčová slova

Otisk prstu, papilární linie, falzifikát, leptání, porovnání otisku prstu, kvalita otisku, detekce falešného otisku

Keywords

Fingerprint, ridge pattern, fingerprint comparison, spoof, etching, fingerprint quality, presentation attack detection

Citace

TILGNER, Jan. *Analýza falzifikátů otisků prstů vytvořených z vyleptané formy*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich, Ph.D.

Analýza falzifikátů otisků prstů vytvořených z vy- leptané formy

Prohlášení

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

.....

Jan Tilgner
28. května 2020

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem kdo mi při vypracování této práce pomohli. Zejména své rodině, za neustálou podporu a panu Dr. Kanichovi za cenné rady.

Obsah

1	Úvod	2
2	Základní údaje o otiscích prstů	3
2.1	Úvod do biometrie	3
2.2	Papilární linie	5
2.3	Klasifikace otisků	5
2.4	Proces snímání otisků prstů	8
3	Zpracování otisků prstů	11
3.1	Kvalita otisků prstů	11
3.2	Postup porovnání otisků prstů	16
3.3	Vyhodnocení shody otisků prstů	21
4	Falzifikáty a syntetické otisky prstů	23
4.1	Tvorba falzifikátu	23
4.2	Výroba formy	25
4.3	Syntetické otisky prstů	26
5	Návrh porovnání rozdílů mezi otisky prstů	28
5.1	Předzpracování snímku	28
5.2	Porovnání snímků	31
6	Tvorba databáze a implementace algoritmu	34
6.1	Tvorba forem	35
6.2	Vytvoření databáze falzifikátů	37
6.3	Implementace	39
7	Vyhodnocení	42
7.1	Vyhodnocení pro vytvořený algoritmus	42
7.2	Vyhodnocení pomocí FiQiVi a NFIQ	43
7.3	Shrnutí výsledků	45
8	Závěr	46
	Literatura	47

Kapitola 1

Úvod

Systémy pro autentizaci osob jsou v dnešní době velmi rozšířené a téměř každý už se někdy setkal s aplikací či softwarem, který by po něm požadoval ověření identity. Nejrozšířenějším způsobem autentizace uživatele je dvojice uživatelské jméno a heslo. Někteří uživatelé ale nenakládají se svým heslem dostatečně obezřetně a opatrně. Tento problém se dá řešit například pomocí biometrických rysů člověka. Každý člověk má tyto rysy jiné a lze ho podle nich proto jednoznačně identifikovat. Stále více se v dnešní době rozmáhá ověřování pomocí otisku prstu.

Nauka zabývající se otisky prstů se nazývá daktyloskopie. Její počátky můžeme najít už v 19. století [27]. V roce 1901 vyvinul Paul-Jean Coulier metodu na extrakci latentních otisků na papír pomocí par jódu. Díky tomu později začala londýnská policie používat identifikaci zločinnů pomocí otisků prstů. Brzy nato začaly otisky využívat i americké policejní složky [30]. Prvním případem zločince usvědčeného pomocí jeho otisků zanechaných na místě činu byl Schefferův případ. Vrah byl u soudu usvědčen, protože bylo prokázáno, že otisky zanechané na rozbitém skle z místa činu jsou stejné jako vrahovy otisky z databáze otisků, kam byly vloženy pár měsíců předtím při zatčení vraha [47]. Od začátků 20. století je ve Spojených státech amerických identifikace na základě tisku prstu velmi důležitá. V roce 2012 měla podle svých slov FBI ve své databázi otisky prstů více než 104 milionů osob [16].

Výzkum v této oblasti je stále potřebný a systémy pro identifikaci je potřeba testovat i proti falzifikátům. Cílem této práce je zjistit, zda tvorba formy pro otisky prstů metodou leptání je vhodná pro výrobu falzifikátů. Pro tyto účely bude vytvořeno několik forem otisků prstů metodou leptání, z nich bude odlito několik falzifikátů, ty budou následně nasnímány a jejich kvalita bude ohodnocena pomocí navrženého a implementovaného algoritmu a již existujících programů. Argument navržený v této práci by měl porovnávat markanty ve dvou otiscích a podle nich zjistit podobnost dvou snímků.

V kapitole 2 jsou vysvětleny základní pojmy týkající se otisků prstů. Je zde také popsáno, jakým způsobem se otisky získávají a jak funguje rozpoznávání otisků. V kapitole 3 je popsáno jakým způsobem se otisky zpracovávají a vyhodnocují. Je zde popsán pojem kvalita otisku prstu a popsány metody vyhodnocení kvality otisku a metody porovnání svou otisků. Kapitola 4 se zabývá popisem tvorby formy pro falzifikáty a tvorbou samotných falzifikátů a jsou zde popsány materiály k tomu používané. V páté kapitole je popsán návrh porovnání dvou snímků. Je zde popsáno předzpracování, extrakce markantů a jejich porovnání. Šestá kapitola se zabývá tvorbou databáze použitou v této práci a implementací algoritmu navrženého v předchozí kapitole. V sedmé kapitole se nachází vyhodnocení navrženého algoritmu a porovnání s výsledky již existujících programů.

Kapitola 2

Základní údaje o otiscích prstů

Tato kapitola slouží k uvedení čtenáře do problematiky otisků prstů. Nejdříve je v této kapitole popsána biometrie obecně, protože spousta vlastností je společná pro všechny biometriky. Dále jsou popsány základní pojmy týkající se rozpoznávání v biometrii a následně detailnější pohled na otisky prstu, jejich klasifikaci a proces jejich snímání.

2.1 Úvod do biometrie

Biometrie je obor zabývající se mimo jiné měřením a vyhodnocováním biologických charakteristik živých organismů. Původ slova biometrie vychází z řeckých slov „bios“ označující život a „metron“ označující měření, dá se tedy přeložit jako „měření života“. Mezi jedinečné charakteristiky člověka patří například otisk prstu, oční duhovka nebo jeho DNA. Tyto charakteristiky mají několik vlastností, díky kterým lze zhodnotit jejich použití při ověřování identity člověka [20]. Těmito vlastnostmi jsou:

- Univerzálnost – tuto charakteristiku by měla mít každá osoba.
- Jedinečnost – žádné dvě osoby by neměly mít tuto charakteristiku stejnou.
- Trvalost – tato charakteristika by se neměla měnit v čase.
- Měřitelnost – charakteristika by měla být lehce měřitelná.
- Bezpečnost – nemělo by být lehké charakteristiku napodobit.
- Akceptovanost – lidé by měli být ochotni tuto charakteristiku poskytnout.
- Výkon – rychlost, robustnost a přesnost vyhodnocování.

Tento styl ověřování identity ale má i své nevýhody. To, že se tyto charakteristiky nemění v čase se dá zneužít, protože při vyzrazení těchto údajů nelze charakteristiku změnit jako je tomu u hesla. Lze také napadnout systém vykonávající porovnání, například podvrhnutím vstupní informace nebo podvrhnutím výsledku. Je proto nutné, aby byly systémy dostatečně zabezpečené.

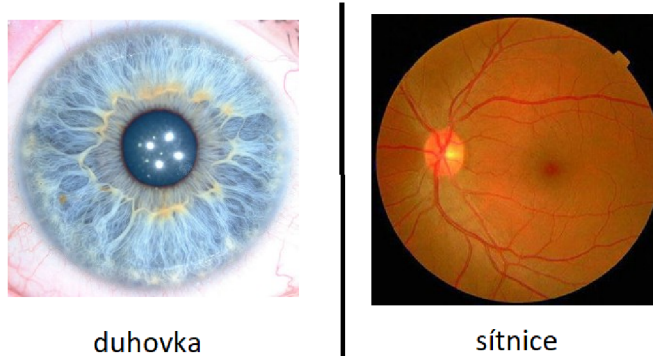
Z hlediska biometrie jsou důležité pojmy identifikace a verifikace. Verifikace je proces, při kterém zjišťujeme, zda porovnávaná osoba je opravdu ta, za koho se vydává (např. vložení uživatelského jména). Výsledkem je tedy rozhodnutí, zda je osoba rozpoznána nebo ne. Identifikace je určení identity osoby z databáze na základě vstupního otisku.

Výsledkem je tedy množina identit s přidělenou hodnotou skóre. Tyto hodnoty se dále mohou různě zpracovávat [26].

Nejpoužívanější charakteristiky jsou:

- DNA – neboli deoxyribonukleová kyselina je nositelem genetické informace člověka. Je to jednodimenzionální jedinečný kód, použitelný i identifikaci člověka. Jedinou známou výjimkou jsou dvojčata, ta mají DNA stejnou. DNA je používána k rozpoznávání osob hlavně v kriminalistice. Ke komerčním účelům je tato metoda identifikace nevhodná zejména kvůli časové náročnosti
- Obličej – toto je metoda možná nejlépe přijímána veřejností, zejména kvůli tomu, že sami lidé obvykle identifikují ostatní pomocí obličejových rysů. Při snímání obličeje navíc není nutná téměř žádná akce od rozpoznávané osoby. Problémem této metody je kompatibilita s měnícím se obličejem v důsledku stárnutí a různých obličejových výrazů. Při nekontrolovaném snímání lze senzory oklamat pomocí make-upu nebo dalších metod vedoucích k jinému vzhledu obličeje.
- Oko – v oku se nachází dvě velmi významné biometrické charakteristiky. Sítnice i duhovka mají jedinečnou strukturu a jsou okem viditelné. Duhovka je považována za jednu z nejrychlejších a nejspolehlivějších charakteristik člověka. Obě tyto charakteristiky vyžadují od uživatele, aby byl vzdálen od skeneru na určitou vzdálenost a aby se díval určeným směrem. Na obrázku 2.1 je vidět jak tyto charakteristiky vypadají.
- Podpis – tato metoda je možná nejznámější metodou k identifikaci člověka. Přestože vyžaduje od uživatele přímou interakci s papírem a tužkou, je uznávaný téměř ve všech odvětvích. Tato metoda je náchylná ke zfalšování, pokud je podvodník schopný může mít i expert problémy s rozpoznáním falzifikátu.
- Hlas – hlas je další velmi neinvazivní metoda rozpoznávání osoby. Není považován za příliš přesný při rozpoznávání ve velké databázi. Navíc kvalita nahrávky může být velmi ovlivněna mikrofonem zachycujícím hlas, okolím uživatele a jeho zdravotním a emočním stavem.

Další velmi využívanou metrikou jsou otisky prstů a dlaní. Tato práce se zabývá otisky prstu, takže na následujících řádcích budou popsány základní pojmy týkající se otisků prstů.



Obrázek 2.1: Obrázek sítnice a duhovky.

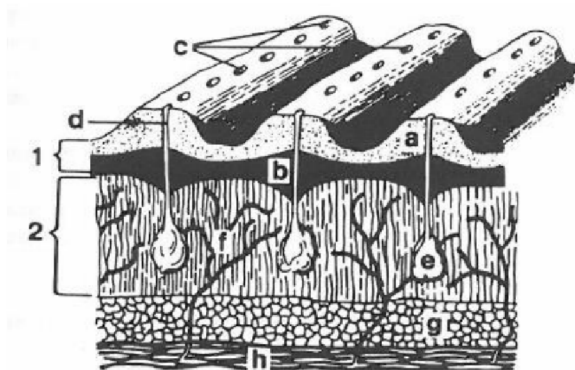
2.2 Papilární linie

Kůže je složena ze tří základních vrstev: pokožky, škáry a podkožního vaziva. Na obrázku 2.2 jsou tyto vrstvy vidět. Na hranici mezi pokožkou a škárkou se nachází papily, ty jsou zvláště kvůli zvětšení plochy pro snadnější vstřebávání živin [13] [43]. Papilární linie jsou tedy okem viditelné reliéfy na vnitřní straně dlaní a spodní části chodidla. Jejich struktura je dána strukturou hlubší vrstvy kůže, tím pádem je tělo schopno je při menším poškození zregenerovat do původního stavu [13]. Jsou vysoké přibližně 0,1 až 0,4 mm a široké 0,2 až 0,5 mm [12]. Jejich rozložení, výška i šířka je dáno nejen geneticky, ale i některými náhodnými jevy, pravděpodobnost, že na světě existují dvě osoby se stejnými otisky prstů je tedy extrémně malá. Zároveň jsou papilární linie v průběhu života relativně neměnné. Při poškození této hlubší struktury, ale dojde k nenávratnému poškození tvaru papilárních linií [12]. Vystouplým částem papilárních linií se říká hřebeny a nižším částem se říká údolí.

Pokožka (epidermis) je svrchní vrstvou kůže. Tvoří ochranou bariéru mezi tělem a okolím. Je tvořena vrstevnatým epitelem a neobsahuje žádné cévy. Je vyživována pouze difuzí ze škáry a okolním vzduchem. Buňky ve spodních vrstvách se neustále dělí a vytlačují ostatní buňky směrem k povrchu. Kvůli tomu se vrchní vrstvy pokožky neustále vzdalují od zdroje živin až nakonec odumírají a rohovatí [38].

Škára (dermis) je vrstva kůže skládající se pojivové tkáně. Je k pokožce připojena pomocí bazální membrány. Obsahuje množství nervových zakončení, vlasové folikuly, potní žlázy nebo mazové žlázy. Obsahuje také krevní cévy, které zároveň vyživují i spodní vrstvy pokožky.

Podkožní vazivo (hypodermis) je nejspodnější vrstvou kůže. Obsahuje tukové buňky, které slouží jako zásobárna energie. Jsou v nich také rozpuštěny vitamíny. Tato vrstva izoluje a chrání svaly. Tyto vrstvy jsou viditelné na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Obrázek řezu kůží z [36]. 1 - pokožka, 2 - škára, a - , b - papila, c - výstupy potní žlázy, d - kanálek potní žlázy, e - potní žláza, f - cévy, g - tukové buňky, h - podkožní vazivo.

2.3 Klasifikace otisků

Prostřednictvím papilárních linií se na pokožce vytvářejí různé obrazce a vzory. K identifikaci osoby pomocí jejich otisků je nutné jejich otisky porovnat a určit, zda jsou shodné nebo ne. K tomu je potřeba rozlišovat určitá místa v otiscích, pomocí kterých lze otisk



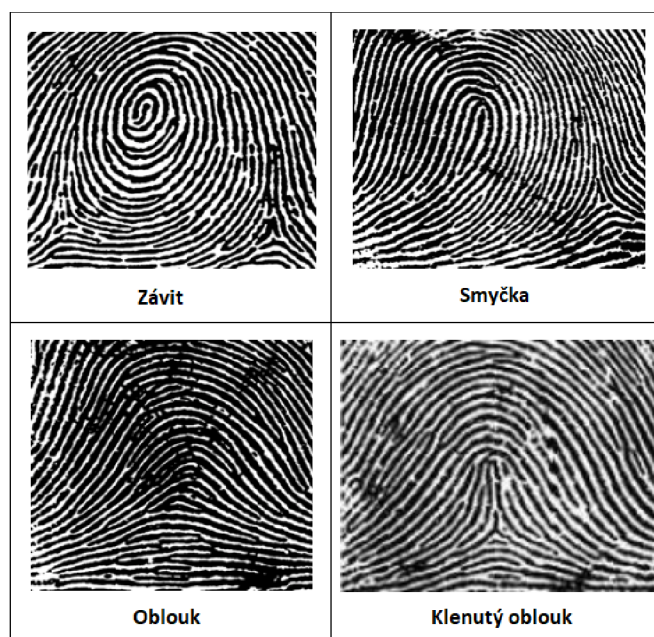
Obrázek 2.3: Základní markanty a singularity.

identifikovat. K tomu se využívají singulární body a markanty. Rozlišují se 2 hlavní typy singulárních bodů v otisku, kterým se říká delty a jádra. Jádro je střed otisku, nachází se v bodě prudkého otočení směru papilární linie o 180 stupňů nebo ukončení v uzavřené spirálovité smyčce. [12] Delta je bod, ze kterého vychází papilární linie do 3 různých směrů [12] (obrázek 2.3).

Pomocí počtu a vzájemné poloze těchto bodů lze rozdělit otisky do několika tříd. První takové rozdělení do 9 tříd publikoval v roce 1823 Jan Evangelista Purkyně [13]. V roce 1888 byly poprvé popsány markanty v rozsáhlé studii Francise Galtona [26]. Později také rozdělil otisky do tří základních tříd (oblouk, smyčka a závit) a ty dále rozdělil na podtřídy. Na něj v roce 1899 navázal Edward Henry, když se svými asistenty vytvořil systém rozdělující otisky na pět tříd [13]. Z tohoto systému vychází dnešní rozdělení tříd a podtříd [13] (obrázek 2.4):

- Left/Right loop (levá/pravá smyčka) – je složena z jednoho jádra a jedné delty. Je to nejčastěji se vyskytující třída – vyskytuje se asi u dvou třetin populace.
- Whorl (závit)– obsahuje 2 delty a 1-2 jádra, vyskytuje se téměř u třetiny obyvatel.
- Arch (oblouk) – neobsahuje žádné singulární body, vyskytuje se velmi řídce.
- Tented arch (klenutý oblouk) – obsahuje jednu deltu a jedno jádro, obvykle umístěné pod sebou. Také se nevyskytuje příliš často.

Tyto třídy se mohou dále dělit na další podtřídy, díky kterým se může velmi snížit náročnost rozpoznávacích algoritmů s velkou databází. Samotné třídy ale k rozpoznávání jednotlivých otisků nejsou dostatečné, proto se používají i další vlastnosti otisků, například markanty. Markanty jsou důležité body, ve kterých se papilární linie rozdělují/slučují. Někdy se nazývají Galtonovy detaily na počest F. Galtona, který je poprvé popsal a zjistil jejich neměnnost [26]. Dva základní typy markantů jsou:



Obrázek 2.4: Typy otisků z [34].

- Bifurcation (vidlice) – rozdělení jedné papilární linie na 2.
- Line ending (ukončení/ začátek) – ukončení/začátek papilární linie.

Kombinací těchto dvou markantů vzniká velké množství dalších markantů např.: dvojitá vidlice, trojitá vidlice, háček, můstek, zkřížení, očko nebo krátká čárka (obrázek 2.5). Pro účely rozpoznávání počítačem se však využívají pouze 2 základní typy, protože u ostatních je možnost častých chyb při rozpoznávání. U každého markantu lze také určit jeho orientaci vzhledem k horizontální linii. Každý markant je tedy popsán pomocí svého typu, souřadnic x a y a úhlu.



Obrázek 2.5: Různé typy markantů. Převzato z [25].

2.4 Proces snímání otisků prstů

Otisk prstu vzniká při kontaktu s nějakým povrchem. Kvalita výsledného snímku otisku se odvíjí už od samotného způsobu zisku. Dříve se využívala hlavně metoda válení – prst se namočil do vhodné tekutiny (např. barva) a přiložil na vhodný povrch (např. papír). Potom je vzniklý otisk naskenován nebo vyfocen. Tento typ zisku otisku se nazývá offline snímání [26]. Výhodou tohoto typu snímání je možnost zisku takzvaného váleného snímku, kdy je prst poválen po papíře a na ten se obtiskne celý otisk prstu „od nehtu k nehtu“. Získá se tím více informací než obyčejným přitisknutím prstu ke skeneru.

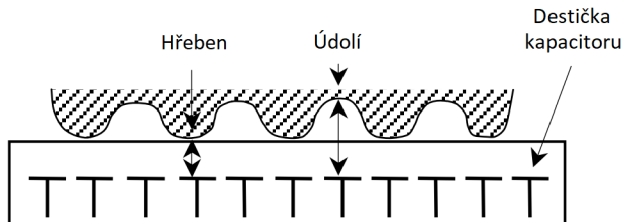
Dalším způsobem zisku otisku je sejmutí latentního otisku prstu. Naše potní žlázy neustále produkují pot, a ten vytváří na povrchu prstů tenkou vrstvu. Při kontaktu s nějakým povrchem se část této vrstvy na povrch přenese a zůstane na něm latentní otisk ve tvaru papilárních linií. Tato stopa je pouhým okem obvykle neviditelná, a k jejímu nalezení je potřeba použít speciální vybavení. Tuto metodu hojně využívají zejména kriminalisté k nalezení otisků na místě činu. Dnes je nejrozšířenější metoda zachycení otisku pomocí elektronického snímače. Tato metoda se nazývá live-scanning [26].

2.4.1 Technologie snímačů otisků prstů

Dnešní skenery můžeme rozdělit na 2 kategorie. V první skupině jsou skenery, kde pro nasnímání otisku stačí prst přiložit na snímač a ten vytvoří celý snímek. Ve druhé je potřeba prst protáhnout skrz snímač. Tvoří se částečné snímky, které dohromady zformují výsledek. Senzory můžeme také rozdělit na kontaktní a bezkontaktní, podle nutnosti dotyku prstu a senzoru. V dnešní době existuje velké množství způsobů snímání otisků, ale téměř všechny se dají rozdělit do tří skupin: optické, polovodičové a ultrazvukové [26]. Optické senzory jsou detailně popsány v kapitole 2.4.2, protože optický senzor je v této práci využíván. Mezi polovodičové senzory patří:

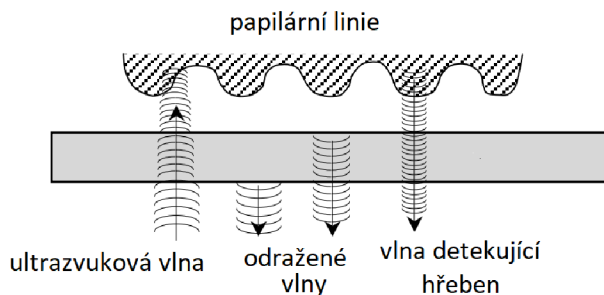
- Kapacitní – tyto senzory jsou mezi polovodičovými senzory nejrozšířenější. Senzor se skládá z velkého množství malých vodivých součástek, ty společně s přiloženým prstem vytvoří malé kapacitory, které vydávají elektrický náboj. Jeho síla závisí na vzdálenosti mezi prstem a destičkou. Tyto senzory snímají třidimenzionální prostor, proto nemohou být oklamány např. přiložením otisku vytisklém na papír. Důležitou součástí těchto senzorů je také oddělení povrchu senzoru od povrchu prstu. Tato vrstva nesmí být příliš tlustá, aby netvořila příliš velkou vzdálenost mezi prstem a senzorem ani příliš tenká, aby byla odolná mechanickému obroušení. Na obrázku 2.6 je znázorněno schéma kapacitního senzoru.
- Termální – tyto senzory jsou tvořeny pyroelektrickým materiálem, který vytváří proud na základě teplotních rozdílů. Hřebeny papilárních linií jsou v kontaktu se skenerem a vyzařují tak více tepla než vzdálenější údolí. Obvykle jsou elektricky nahřány na vyšší teplotu než prst, aby byl teplotní kontrast větší.
- Senzory s elektrickým polem – senzory založené na tomto principu se skládají z matice antén přijímajících elektrický signál a prstence, který vysílá signál sinusového průběhu. Prst se musí dotýkat prstence i matice antén zároveň. Elektrický signál prochází prstem a při průchodu škárou je pozměněn. Poté je nasnímán maticí a je seskládán dohromady.
- Piezoelektrické – piezoelektrické materiály po aplikování tlaku produkují elektrické napětí. Povrch senzoru je tvořen tímto materiálem. Síla napětí závisí na tlaku vyvi-

nutém na senzor. Protože údolí a hřebeny jsou v jiné vzdálenosti od povrchu senzoru, je vyvíjen i jiný tlak a tím pádem jiný náboj. Tyto senzory nejsou příliš efektivní a v praxi se téměř nepoužívají.



Obrázek 2.6: Schéma kapacitního senzoru z [26].

Ultrazvukové senzory jsou založeny na vysílání ultrazvukových vln proti prstu a přijímání vln odražených zpátky. U tohoto typu senzoru není nutný přímý dotyk prstu a senzoru. Vlny pronikají pod kůži a jsou tak velmi efektivní při odhalování falzifikátů [12]. Samotné snímání trvá několik vteřin, protože je nutné prst nasnímat z různých úhlů (senzor se pohybuje po kružnici). Bohužel tyto skenery jsou velmi nákladné a příliš velké, proto nejsou příliš využívány. Schéma senzoru lze vidět na obrázku 2.7.



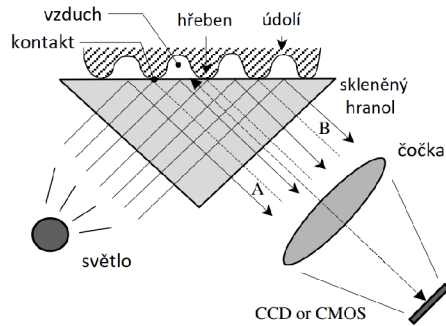
Obrázek 2.7: Schéma ultrazvukového senzoru z [26].

2.4.2 Princip optické technologie snímání

Tato technologie je v současné době nejpoužívanější. Je velmi jednoduchá, prst je přiložen na vrchní stranu průhledného hranolu a z jedné strany hranol nasvícen LED osvětlením [26]. V místech, kde se hřebeny papilárních linií dotýkají hranolu je procházející světlo rozptýleno do náhodných směrů nebo absorbováno. V místech, kde se nachází údolí a nic se tak hranolu nedotýká se světlo odráží, vychází z druhé strany hranolu a je pomocí čočky namířeno do CCD nebo CMOS senzoru. Místa kde senzor nezachytil žádné světlo se tedy nachází hřebeny. Takto nasnímaný obrázek je ale zkreslený. Na obrázku 2.8 můžeme toto zkreslení pozorovat. Paprsky A a B nemají stejnou délku, a proto dochází k deformaci výsledného snímku. Některé oblasti jsou protáhlé a některé jsou zmenšené. Toto lze vyřešit použitím optických čoček nebo pomocí softwaru.

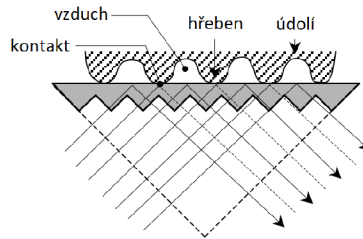
Tato technologie snímá třidimenzionální prostor a není tedy lehko oklamatelná jednoduchými falzifikáty. Nevýhoda této metody tkví v nemožnosti zmenšit senzor jako u některých ostatních technologií [26]. Při zmenšení optické cesty, tedy cesty mezi hranolem a senzorem,

se začnou objevovat závažné deformace snímku. Kvůli tomu není tato technologie vhodná k využití v zařízeních jako jsou mobilní telefony.



Obrázek 2.8: Schéma optického senzoru z [26].

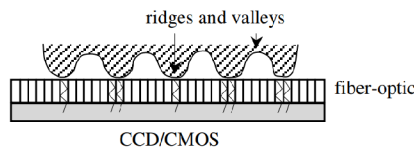
Ke zmenšení výsledného senzoru lze využít množství menších hranolů sousedících se sebou namísto jednoho velkého hranolu (viz obrázek 2.9). Díky tomu lze senzor zmenšit o něco více než obyčejný senzor s jedním hranolem [26].



Obrázek 2.9: Schéma optického senzoru s menšími hranoly z [26].

Další možností je využití optických vláken. Na obrázku 2.10 je vidět schéma takového senzoru. Prst je přikládán na jednu stranu destičky a na druhé straně je CCD/CMOS kamera snímající reziduální světlo prstu přenesené pomocí optických vláken. Elektro optické senzory jsou další variantou optických senzorů. Tyto senzory se skládají ze dvou základních vrstev. První vrstva obsahuje polymer, který po polarizaci dostatečným napětím vyzařuje světlo. Toto světlo je poté snímáno druhou vrstvou, složenou z fotodiód vsazených do skla a přeměněno na digitální obraz. Tyto vrstvy musí být těsně vedle sebe. Z pohledu miniaturizace jsou snímky vytvořené touto metodou stále příliš nekvalitní [26].

Možností získání otisku prstu je také sejmutí otisku pomocí velmi kvalitní kamery zaměřené na snímanou část prstu. Prst se tak nemusí dotýkat přímo senzoru, ale obvykle se přidává mechanismus zajišťující, že vzdálenost prstu je vždy přibližně stejná [26].



Obrázek 2.10: Schéma optického senzoru s menšími hranoly z [26].

Kapitola 3

Zpracování otisků prstů

V této kapitole je nastíněno, jakým způsobem se zpracovávají otisky prstů. Nejdříve je vysvětlen pojem kvality otisků prstů a jsou popsány jevy, které zhoršují tuto kvalitu. Dále jsou zde popsány existující programy na zjištění kvality otisku NFIQ a FiQiVi. V závěru kapitoly se nachází popis metod používaných při porovnávání otisků prstů.

3.1 Kvalita otisků prstů

Základním předpokladem pro úspěšné rozpoznání otisku prstu je kvalitní snímek otisku prstu. Neexistuje žádná oficiální definice kvality otisku, ale obecně se dá říct, že kvalitní snímek je takový snímek, ve kterém jsou od sebe dobře rozpoznatelné a odlišitelné vzory papilárních linií a lze z něj lehce vyčíst polohu a orientaci singularit a markantů. Kvalita vzorku se vztahuje k jeho výsledkům při rozpoznávání [23]. U snímků se špatnou kvalitou je větší pravděpodobnost špatného přiřazení, a naopak u snímku s dobrou kvalitou je vyšší pravděpodobnost, že bude správně rozpoznán.

V praxi si firmy obvykle zavádějí vlastní definice kvality. Celkově ale slouží všechny definice ke stejnému účelu, a to k určení nějakého skóre kvality, které se poté porovnává s prahovou mírou kvality. Když je skóre menší než prahová hodnota, snímek není přijat a je vyžadováno pořízení nového snímku. Takové snímky by totiž nemusely obsahovat dostatečné množství extrahovatelných rysů otisku, což by mohlo vést k chybnému rozpoznání [23]. Kvalita otisku pro automatické rozpoznávací systémy není lehce rozpoznatelná pouhým okem. Snímek, který má na první pohled ostře rozlišitelné hrany se může jevit jako kvalitní, ale ve skutečnosti nemusí obsahovat dostatečné množství informací pro rozpoznávací systém.

3.1.1 Jevy ovlivňující kvalitu otisků prstů

Okolí senzoru otisků prstů je častým faktorem snížené kvality snímku. Míra, s jakou tyto vlivy ovlivňují výsledný snímek byla experimentálně zjišťována v této práci [48]. Většine problémů se však dá celkem jednoduše předcházet.

- Znečištění snímací plochy – povrch skeneru může být znečištěn jak okolními vlivy, tak uživateli. Na výsledný snímek má velký vliv, když se mezi povrch prstu a snímače dostane například hlína nebo písek. Tekutiny či mastnota na senzoru může mít za následek tzv. mokřý otisk, který je popsán níže. Problémem je přirozená mastnota prstů, protože po sobě zanechává tzv. latentní otisk, který může rušit výsledný snímek, ale může být využit i k falšování identity [14]. Je proto dobré skener často čistit.



Obrázek 3.1: Příklady suchého, mokrého a zjizveného prstu. Převzato z [18].

- Povrch prstu – stav povrchu prstu je klíčový pro výsledný snímek otisku. Různé deformace (např.: jizvy, kožní onemocnění atd.) mohou učinit otisk nerozpoznatelným [14]. Důležité je také, aby prst byl čistý a neměl na sobě žádné látky, které by se projevíly na snímku. Určitým faktorem je také věk snímané osoby. Elasticita papilárních linií se s věkem zhoršuje. Vlhkost prstu je velmi důležitá. Vlhký prst se na snímku projeví velmi silnými, někdy až nerozeznatelnými papilárními liniemi. Takový otisk se nazývá mokrá otisk. Příliš suchý prst ale také není dobrý pro kvalitu snímku, protože papilární linie jsou pak špatně rozeznatelné a mohou splývat s okolím viz obrázek 3.1.
- Tlak – Uživatel nesmí na senzor příliš tlačit, ale také nesmí vyvinout příliš malý tlak. Při velkém tlaku může být snímek špatně rozeznatelný a při malém tlaku se zase nemusí sejmut celá oblast prstu.
- Osvětlení – vliv osvětlení se může projevit, když prst nezakryje celou plochu senzoru. Výsledný snímek má pak na nezakrytých stranách tmavší papilární linie [14].
- Elektromagnetické záření – Elektromagnetické záření má vliv hlavně na vnitřní části senzoru. Může dojít například ke špatnému zaostření otisku [14].
- Vibrace – vibrace mají špatný vliv zejména při větší míře vibrací, kdy může být výsledný otisk rozmazaný. Silné vibrace také mohou poškodit elektroniku v senzoru, což způsobí další nepřesnosti na snímku.
- Teplota – teplota má vliv na kvalitu obvykle pouze při použití termických senzorů, jinak se může projevit třeba prostřednictvím zvýšeného pocení prstu.

Vlivů je samozřejmě mnohem více, toto jsou však ty nejvýraznější se projevující na kvalitu otisku. Mezi další faktory ovlivňující kvalitu otisku patří různé poškození samotného prstu. To může být způsobeno fyzickým poškozením škrápy a tím pádem znemožnění opětovné regenerace papilárních linií. Takto se vytváří například jizvy viz obrázek 3.1. Další možností je, že pokožka prstu je napadena nějakou kožní chorobou, která narušuje papilární linie nebo že je dotýčný prst postižen nějakou kožní vadou [14]. Další skupinu jevů poškozujících kvalitu otisku představují akce uživatele přímo ovlivňující proces zachycení snímku. Do této skupiny patří například přiložení pouze malé části prstu, pohybování prstem při snímání nebo přiložení špatné části prstu.

3.1.2 Metody vyhodnocení kvality

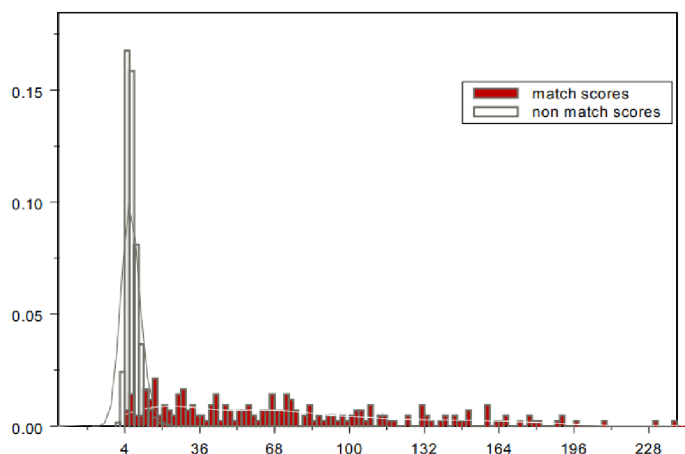
Existuje velké množství metod na určení kvality snímku. Obecně se rozdělují do tří skupin: metody určující kvalitu založené na lokálních rysech snímku, metody založené na globálních rysech a metody, které berou problematiku ohodnocení kvality jako klasifikační problém [1]. Metody založené na lokálních rysech obvykle rozloží snímek na stejně velké části a ty samostatně ohodnotí, poté je rozdělí do několika skupin podle jejich hodnocení a celková hodnota kvality se vypočítá z poměrového zastoupení bloků v jednotlivých kvalitách. Některé metody přiřazují blokům váhu založenou na jejich vzdálenosti od středu snímku, protože bloky nejbližší u středu by měly obsahovat nejspolehlivější informace [8]. Metody založené na globálních rysech se zaměřují na vlastnosti otisku z globálního měřítka. Snímek se rozdělí na několik stejných částí, z nich jsou extrahovány vlastnosti jako orientace nebo frekvence papilárních linií a ty jsou mezi sebou následně porovnávány. V kvalitním snímku budou přechody mezi sousedními bloky obvykle hladké [15]. Poslední skupina definuje kvalitu jako stupeň oddělení mezi rozloženími shody a neshody daného otisku [44]. Nejdříve jsou nalezeny markanty a ty jsou pak ohodnoceny podle své kvality. Celková kvalita je poté vypočítána z těchto hodnot.

3.1.3 NFIQ

National Institute of Standards and Technology (NIST) je výzkumné středisko v USA, zabývající se mimo jiné měřicími standardy. Mezi důležité projekty této společnosti patří také software NIST Fingerprint Image Quality (NFIQ). Tento software je určen k ohodnocení snímku otisku a určení jeho vhodnosti k dalšímu použití při rozpoznávání. NFIQ definuje kvalitu jako „prognózu výkonosti rozpoznávače prstů“ [45]. Tato definice se dá nejlépe pochopit z následujícího příkladu. Obrázek 3.2 znázorňuje histogram rozložení skóre otisků prstů 216 různých osob. Nachází se zde 216 match scores a 46440 non-match scores. Obvykle se tyto dvě rozložení překrývají, to znamená, že se některé otisky přiřadí ke špatné osobě, protože jejich skóre shody s touto osobou je větší než skóre s osobou, které otisky opravdu patří. Z toho se tedy dá vyvodit, že skóre by mělo znázorňovat stupeň oddělení těchto dvou rozložení. Kvalita vzorku X_i se tedy definuje porovnáním match score se všemi non-match scores a získaná velikost je přímo úměrná jejich rozdílu [49]:

$$q(X_i) = \frac{S_m(X_i) - E(S_n(X_{ij}))}{\delta(S_n(X_{ij}))} \quad (3.1)$$

Kde $S_m(X_i)$ je match score vzorku X , $E(S_n(X_{ij}))$ je průměrná hodnota hodnoty všech non-match scores vzorku X , a $\delta(S_n(X_{ij}))$ je směrodatná odchylka všech non-match scores. Podle těchto hodnot rozdělil NIST na základě pozorování otisky do pěti tříd zobrazených v obrázku 3.3. Podle výzkumů NIST nemá smysl dělit kvalitu otisků do více než 8 tříd, protože ani rozpoznávací systémy velmi citlivé na kvalitu otisku se s tímto rozdělením nezlepšovaly. Naproti tomu systémům, které na kvalitu otisku nejsou příliš citlivé stačily třídy pouze tři.



Obrázek 3.2: Příklad rozložení match a non-match score. Převzato z [49]

Při určování kvality snímku, ale obvykle nemáme k dispozici podobnou databázi, proto NIST vytvořil algoritmus, který přiřadí k otisku jednu třídu na základě jeho vlastností. To se provedeno tak, že se nejdříve vytvoří vektor rysů otisku a ten je potom pomocí neuronové sítě přiřazen do jedné ze skupin kvality. Nejdříve se vytvoří čtyři dílčí mapy, ze kterých se vytvoří finální mapa kvality. Tyto mapy jsou: mapa orientace, mapa malého kontrastu, mapa nejasného směru a mapa vysokého zakřivení. Mapa orientací přiřadí každému bloku orientaci od 0° do 179° pomocí Diskrétní Fourierovy transformace. Mapa malého kontrastu odděluje části snímku, na kterých se nachází otisk a od částí kde není otisk rozeznatelný. Detekuje také rozmazané či nejasné části snímku. V těchto oblastech se později nehledají markanty. Mapa nejasného směru označuje oblasti, kde nebylo možné určit orientaci a bylo nutné ji spočítat podle okolních bloků. Mapa vysokého zakřivení označuje bloky, kde se orientace prudce mění, a výsledek tak nemusí být spolehlivý. Finální mapa obsahuje informace všech dílčích map a obsahuje hodnoty od 0 do 4, kde 0 označuje pozadí otisku a 4 označuje velmi kvalitní blok.

Následně se v otisku hledají markanty. Algoritmus pro hledání markantů není příliš striktní, a tak je nalezeno spoustu falešných markantů. Následně se spočítá kvalita markantů, sestávající se ze dvou částí. První část je kvalita bloku, ve kterém se markant nachází a druhá se spočítá na základě stupňů šedi v okolí markantu. Toto okolí je určeno na 11 px. Vysokou kvalitu má markant, nacházející se v oblasti s vysokým kontrastem, která je definovaná pomocí střední hodnoty stupně šedi v okolí hodnoty 127 a směrodatné odchylky větší nebo rovné 64 [49]. Nakonec byl vytvořen vektor rysů otisku, ten obsahuje 11 složek: počet bloků s kvalitou větší než 0, celkový počet markantů, počet markantů s kvalitou větší než 0,5, počet markantů s kvalitou větší než 0,6, počet markantů s kvalitou větší než 0,75, počet markantů s kvalitou větší než 0,9, počet markantů s kvalitou větší než 0,9, procentuální podíl bloků s kvalitou 1 ze všech bloků popředí, procentuální podíl bloků s kvalitou 2 ze všech bloků popředí, procentuální podíl bloků s kvalitou 3 ze všech bloků popředí a procentuální podíl bloků s kvalitou 4 ze všech bloků popředí. Výsledné přiřazení ke stupni kvality je provedeno pomocí neuronové sítě natrénované na 3400 otiscích prstu. Tyto otisky byl vybrány tak, aby rovnoměrně obsahovaly všechny typy otisků [49].

Q	QUALITY	RANGE
5	špatná	$[0, W^{-1}(0.75)]$
4	dostatečná	$(C^{-1}(0.75), C^{-1}(0.05)]$
3	dobrá	$(C^{-1}(0.05), C^{-1}(0.2)]$
2	velmi dobrá	$(C^{-1}(0.2), C^{-1}(0.6)]$
1	excelentní	$(C^{-1}(0.6), C^{-1}(1)]$

Obrázek 3.3: Rozdělení kvalit podle NFIQ. Převzato z [49].

3.1.4 FiQiVi

FiQiVi je program určený k ohodnocení kvality snímku otisku prstu. Tento program umožňuje kromě hodnocení kvality také zobrazení otisku nebo zobrazení kvality snímku v jednotlivých segmentech. Umožňuje zobrazení hodnot jednotlivých metrik v těchto segmentech. Výsledkem programu je celková kvalita snímku uvedená v procentech a další sedm dílčích hodnot kvalit v jednotlivých segmentech. Se snímky lze pracovat buď po jednom, nebo ve větším množství, přičemž v tomto režimu se výsledky zapíší do souboru ve formátu .csv. Součástí programu je také program NFIQ, takže lze obě metody porovnávat přímo. Následuje zkrácený popis algoritmu této aplikace, který byl převzat z [33].

Určení výsledné kvality se podobně jako u NFIQ odvíjí od několika dílčích metrik. Nejdříve je snímek upraven na požadovanou velikost a formát barev. Poté je snímek rozdělen na bloky velikosti 12×12 , jejichž kvalita se spočítá pomocí okna velikosti 28×28 , okno tedy přesahuje o osm pixelů na každou stranu. Problém okrajových bloků je řešen jejich ignorováním, protože tyto bloky obvykle neobsahují důležité informace, ale spíše pozadí. Poté jsou u bloků porovnávány distribuce šedi a podle nich se určí, zda patří k otisku, nebo zda jsou považovány za pozadí. Pokud okno bloku obsahuje alespoň 25 různých odstínů šedi, je označen za část otisku. Kvalita je následně spočítána pouze pro bloky, které jsou součástí otisku a pro bloky, které jsou na hranici otisku je kvalita spočítána pomocí okolních bloků, protože by jejich spočítaná kvalita byla zkreslena pozadím. Dále je určená orientace bloků. Ta se počítá otáčením oken bloků kolem svého středu o 10 stupňů. Takto je získáno 18 různých otočení, pro která jsou spočítány sumy pixelů ve vertikálním směru. Pro správně otočený blok by vektor takto získaných 28 hodnot měl odpovídat sinusoidě, čímž simuluje přechody mezi hřebeny a údolími. Jako orientace bloku je tedy vybrán takový úhel, pro který je tato reprezentace nepřesnější. Také je spočítána jistota, se kterou byla tato orientace zjištěna, ta je poté použita jako jeden z faktorů při hodnocení kvality bloku. Orientované okno je rozděleno na čtyři části a u každé části je získán vektor reprezentující přechody hřebenů a údolí v dané části bloku. U každé části se spočítá její frekvence pomocí diskrétní Fourierovy transformace. Jejich podobnost určuje kontinuitu přechodů frekvence v bloku. Jako další se vypočítá poměr mezi hřebeny a údolími v okně. K tomu je použita lineární regrese, která rozdělí vektor bloku na hřebeny a údolí. Poměr bloku by se měl blížit poměru 1:1, jinak se nejspíš jedná o mokrý či suchý otisk. Poslední metrikou je kontrast bloku, ten je spočítán jako rozdíl průměrů 5 % nejvyšších a nejnižších hodnot okna. Aby byl kontrast 100 % musí tento rozdíl dosahovat alespoň hodnoty 70.

Výsledná kvalita bloku se pak určí jako minimum ze spočítaných kvalit: jistoty orientace, překrývání distribucí barev podle lin. regrese, poměru hřebenů a údolí, kontinuity frekvence v rámci bloku, kontinuity orientace s okolními bloky a rozsahu orientací. Kvalita celého otisku je pak spočítána jako průměr všech kvalit bloků, patřících k otisku.

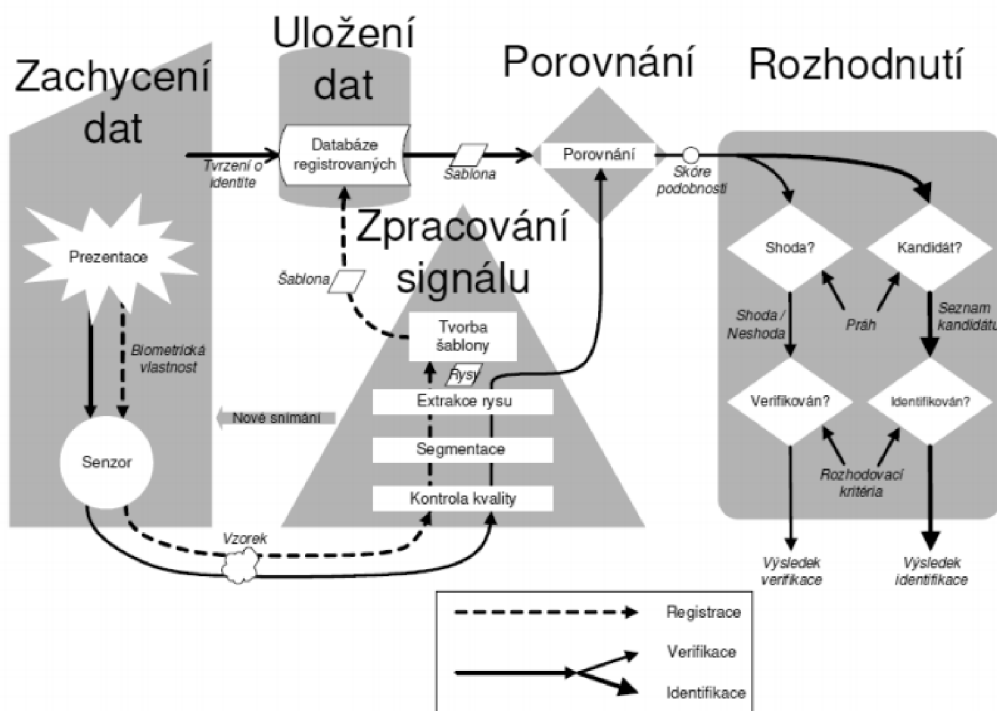
3.2 Postup porovnání otisků prstů

K porovnání dvou otisků prstu se obvykle využívají automatické systémy. Funkci takového systému lze obecně shrnout pomocí abstraktního modelu, jak ho ukazuje obrázek 3.4. Model je rozdělen na 5 samostatných modulů, i když v praxi bývá běžné spojit tyto moduly do jedné aplikace [7].

První část slouží k zachycení dat, to v tomto případě znamená nasnímáním otisku prstu pomocí senzoru nebo nahrání již předem vytvořeného snímku. Výstupem je nasnímaný otisk reprezentovaný například formátem WSQ. V případě, že systém slouží k verifikaci, je vstupem také určité tvrzení o identitě, které slouží k omezení vybraných šablon použitých k porovnávání otisku [7].

Další část zpracuje vstupní snímek a výsledkem je buď šablona, která bude uložena do databáze a později využívána k porovnávání nebo množina rysů, které se dále porovnávají s již vytvořenými šablonami. V této části se jednotlivé systémy liší, ale obvykle se ve všech systémech provádí úkony jako kontrola kvality, segmentace a extrakce rysů [7]. Kontrola kvality porovnává skóre kvality s prahovou hodnotou a v případě nízké kvality snímek zahodí a požaduje nový. Segmentace slouží k zjištění, ve které části snímku se nacházejí biometrické vlastnosti prstu, dochází tedy k ořezání pozadí snímku. Extrakce rysů je lokalizace a identifikace jednotlivých rysů použitých danou metodou k porovnávání. Například nalezení polohy, typu a orientace markantů. Před extrakcí rysů dochází obvykle k předzpracování obrazu, aby byly rysy co nejlépe rozpoznatelné. To obnáší například normalizaci, kdy jsou hodnoty pixelů upraveny tak aby všechny byly v požadovaném rozsahu, nebo doplnění papilárních linií pomocí Gaborových filtrů v místech, kde je obraz špatně nasnímán. Skeletonizace je ztenčení papilárních linií na tloušťku 1 pixelu bez přerušení. Z takto ztenčených papilárních linií lze mnohem lépe detekovat markanty.

Modul pro uložení dat je v podstatě databáze všech šablon registrovaných v daném systému. Tyto šablony mohou obsahovat dodatečné informace o identitě osoby, které patří určitý otisk. Porovnávací modul porovná vstupní otisk s jednotlivými šablonami a pro každou šablonu určí skóre podobnosti. Modul pro rozhodování rozhoduje na základě přijatých skóre o výsledku. Při verifikaci jde o rozhodnutí ano či ne a u identifikace jde obvykle o určení identity osoby z množiny uchazečů [7]. U biometrických systémů pro porovnání otisků prstů se rozlišují tři hlavní metody. A to porovnání založené na: Korelaci, tvaru papilárních linií nebo na markantech.

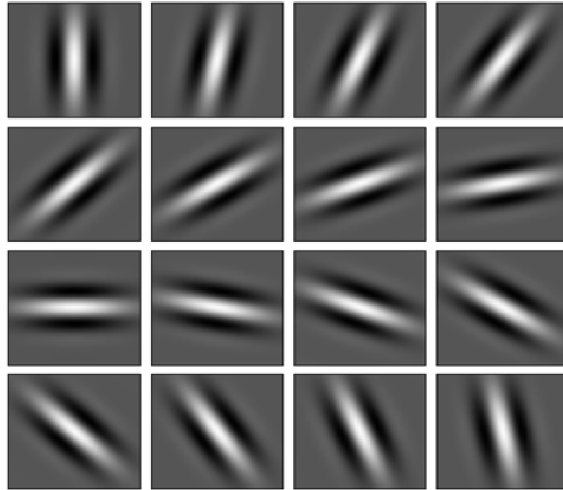


Obrázek 3.4: Schéma biometrického systému, převzato z [7].

3.2.1 Předzpracování

Některé snímky otisků prstů mají díky různým vlivům horší kvalitu, proto se obvykle před zpracováním otisku provede úprava snímku. Náplní předzpracování snímku tak je upravit snímek do podoby, kde jsou papilární linie zřetelně rozeznatelné a nerušené okolním šumem. Pro většinu metod rozpoznávání je vhodné, aby měl výsledný snímek pouze dvě barvy, kvůli snadnému oddělení hřebenů od údolí. Různé metody pro předzpracování snímku otisku prstu jsou popsány a ohodnoceny v [40].

K úpravě otisků se obvykle využívají Gaborovy filtry. To jsou lineární filtry určené k zjištění, zda jsou v nějakém bloku obrázku linie s určitou frekvencí a daným směrem. To znamená, že aplikováním filtru na určitou část snímku s danou orientací a frekvencí lze zvýraznit papilární linie nacházející se v této části a odstranit šum. Pro efektivnější zjištění těchto vlastností se obrázek nejdříve normalizuje. To znamená, že se snímek nejdříve převede na šedotónový obrázek a poté se upraví intenzita šedi jednotlivých pixelů tak, aby byl histogram rozložení stupňů šedi v určitém rozmezí. Poté se snímek rozdělí na stejně velké bloky a pro každý blok se vypočítá jeho orientace a frekvence. Dále se pomocí těchto vlastností dají určit bloky ve kterých nemá smysl filtraci provádět, ať už protože neobsahují informace o otisku nebo protože mají špatně rozlišitelné papilární linie a mohlo by tak dojít ke zkreslení výsledného otisku. Proto je vytvořena maska otisku, která rozděluje bloky na vhodné pro filtraci a nevhodné pro další úpravy. Následně lze upravit Gaborovy filtry podle vlastností jednotlivých bloků a aplikovat je na tyto bloky [17]. Příklad Gaborova filtru je vidět na obrázku 3.5.

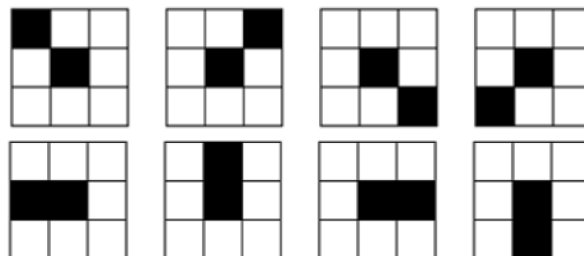


Obrázek 3.5: Příklad Gaborova filtru s různými orientacemi. Převzato z [41].

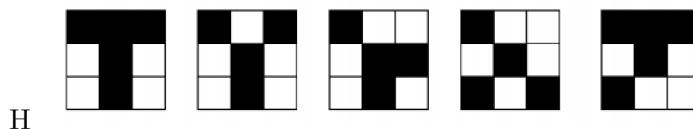
3.2.2 Extrakce markantů

Extrakce markantů je důležitou součástí při porovnávání otisků prstů. Pro úspěšné porovnání dvou otisků je nutné nalézt co největší počet markantů, aby bylo možné tyto markanty porovnávat. Ovšem je nežádoucí, aby byly detekovány markanty na místech, kde ve skutečnosti nejsou. Proto je nutné používat robustní algoritmus a případné nedostatky se pokusit odstranit. Většina metod hledání markantů pracuje s binarizovaným obrazem, kvůli snadnějšímu rozpoznání konce linií. Proto je nejdříve nutné provést nad snímkem binarizaci. Každý pixel je převeden buď na černou nebo na bílou barvu. To, na kterou barvu je převeden určuje práh, když je stupeň šedi pixelu větší než tento práh, je pixel přebarven na černou, jinak je přebarven na bílou barvu. Takto upravený snímek je dále upraven skeletonizací. Tento krok zmenší šířku hřebenů na šířku jednoho pixelu, což usnadňuje práci při rozeznávání markantů.

V takto připraveném snímku lze nyní detekovat markanty. Tato detekce probíhá buď porovnáváním bloků o velikosti 3×3 pixelů s předpřipravenými šablonami, nebo metodou *crossing number*. Při porovnávání s šablonami je porovnávané okolí srovnáváno s maskami jednotlivých markantů. Příklady šablon jsou viditelné na obrázcích 3.6 a 3.7. Druhá zmíněná metoda zkoumá okolí každého pixelu, který je součástí hřebenu. Spočítá kolikrát přechází hodnota z černé na bílou, tím získá počet linií vycházejících z daného pixelu. Podle této hodnoty lze určit, zda se jedná o markant a případně jeho typ.



Obrázek 3.6: Příklad masek pro markanty typu zakončení. Převzato z [39].

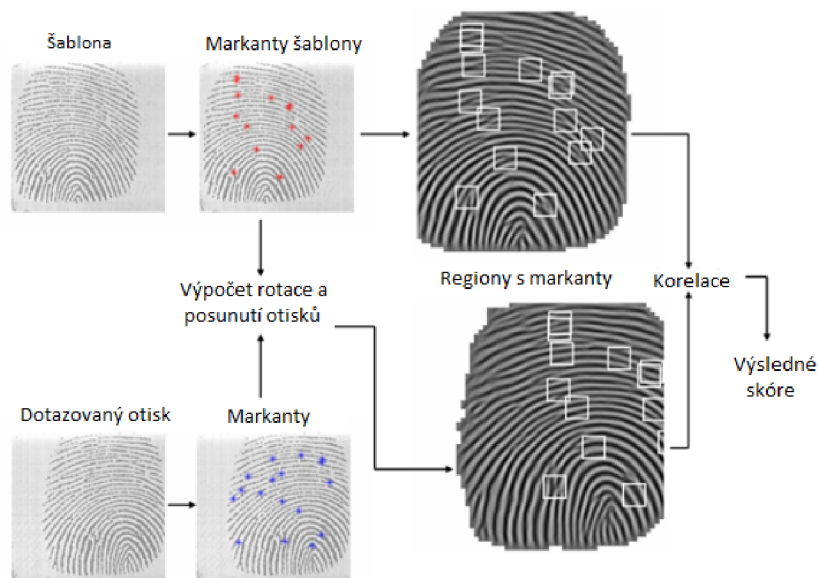


Obrázek 3.7: Příklad masek pro markanty typu vidlice. Převzato z [39].

Další možností je hledat markanty v šedotónovém snímku a postupovat jednotlivými liniemi podle jejich orientace, dokud nenarazí na větvení či konec této linie [46].

3.2.3 Porovnání založené na korelaci

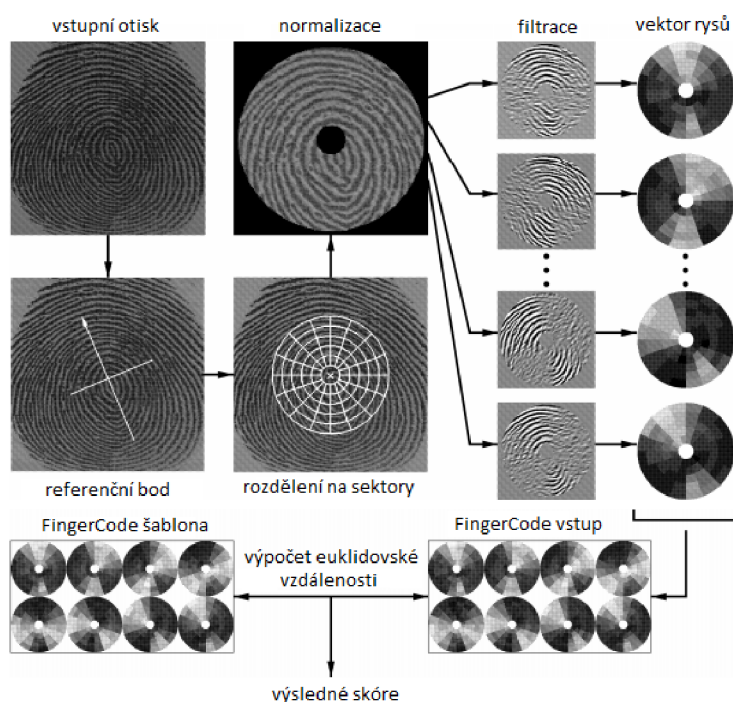
Tato metoda porovnává umístění markantů a singularit. Využívá se toho, že porovnávaný otisk je oproti svému protějšku pouze posunut a otočen o neznámé hodnoty. Nejprve se vypočítá hrubý odhad natočení mezi porovnávanými otisky. To se obvykle dělá pomocí extrahovaných markantů nebo singularitních bodů [26]. V metodě navržené v [24] se porovnávají pole orientací jednotlivých otisků. Tím se výrazně sníží výpočetní náročnost algoritmu, protože se poté počítá pouze s natočením v určitém rozmezí kolem tohoto odhadu. Poté je nutné vybrat vhodné oblasti pro porovnání. Tyto bloky musí obsahovat dostatečné množství markantů a musí být v co nejlepší kvalitě. Proto jsou vybírány bloky, které mají vysokou kvalitu v obou porovnávaných snímcích zároveň [24]. Ze zkoumaného otisku se tedy vybere malé okno, které se s různými natočeními porovnává s větším oknem ze stejného místa v šabloně. Na základě úspěšnosti porovnání se určí skóre podobnosti. Výsledek je potom založen na skóre všech porovnávaných segmentů [31]. Tento algoritmus je znázorněn na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Metoda porovnání otisků pomocí korelace. Převzato z [29].

3.2.4 Porovnání založené na tvaru papilárních linií

Někdy může být kvalita otisků špatná a extrakce markantů je tedy složitá, proto se porovnávají různé vlastnosti papilárních linií. Tyto algoritmy spočívají v porovnávání vlastností jako tvar, hustota nebo velikost papilárních linií. Asi nejrozšířenější metodou z této oblasti je metoda FingerCode [5]. Extrakce rysů touto metodou se sestává ze tří kroků: Výběr referenčního bodu, filtrace okolí referenčního bodu pomocí banky Gaborových filtrů, a nakonec spočítání vektoru rysů z přefiltrovaných obrázků [5]. Referenční bod je bod, jehož okolí bude reprezentovat celý otisk prstu. Je tedy důležité, aby ve všech otiscích stejného prstu byl vybrán stejný bod [19] [5]. Vektor rysů se skládá ze směrodatných odchylek. Vektor rysů jednoho prstu má 640 hodnot, protože je použito osm Gaborových filtrů s různou orientací a okolí referenčního bodu je rozděleno na 16 sektorů. Nevýhodou této metody je, že nefunguje správně pokud nejsou otisky ve stejném úhlu. Tomu se dá předcházet při pořízení samotného snímku nebo tím že se vytvoří kopie vstupního otisku s různým natočením a z těch se poté počítá vektor rysů znovu [5]. Na obrázku 3.9 je znázorněn systém implementující metodu FingerCode.



Obrázek 3.9: Schéma FingerCode převzaté z [19].

3.2.5 Porovnání založené na markantech

Poslední skupina metod porovnávání je založená na porovnávání markantů. Tyto metody porovnávání jsou nejrozšířenější. Spočívají v extrakci markantů z obou otisků, důležitý je zejména typ, poloha a orientace markantů. K rozpoznávání je možné použít pouze vzdálenost markantů, kvůli snížení náročnosti algoritmu [4]. Nejdříve je sestaven seznam všech markantů, poté jsou mezi všemi markanty spočítány jejich euklidovské vzdálenosti. Seznamy těchto vzdáleností jsou pak porovnávány tak, že každá vzdálenost se spáruje pouze jednou, není tedy možné přiřazení jedné vzdálenosti z prvního snímku k více než jedné vzdálenosti

z druhého snímku. Výsledek je závislý na počtu stejných vzdáleností. Tato metoda je ale velmi závislá na předzpracování snímku, protože každé posunutí markantu jí může uškodit. V [9] je navržen algoritmus, který nejdříve vybere ze snímků pár markantů, jeden z každého snímku, které by si měly odpovídat a snaží se z nich vytvořit stromovou strukturu v okolí těchto markantů. Výsledné skóre závisí na velikosti sestavených stromů. Je možné vytvořit i více stromů v jednom otisku. Obecně se u těchto metod nejdříve vytvoří takzvaná biomerická šablona, což je vlastně síť úseček spojujících jednotlivé markanty. Poté se hledá pár otisků, u kterého dochází k největší shodě šablon. Při tvorbě šablon dochází ke značnému zjednodušení otisku, je tedy nemožné sestavit z nich znovu původní obraz, což je velmi výhodné z hlediska bezpečnosti [51].

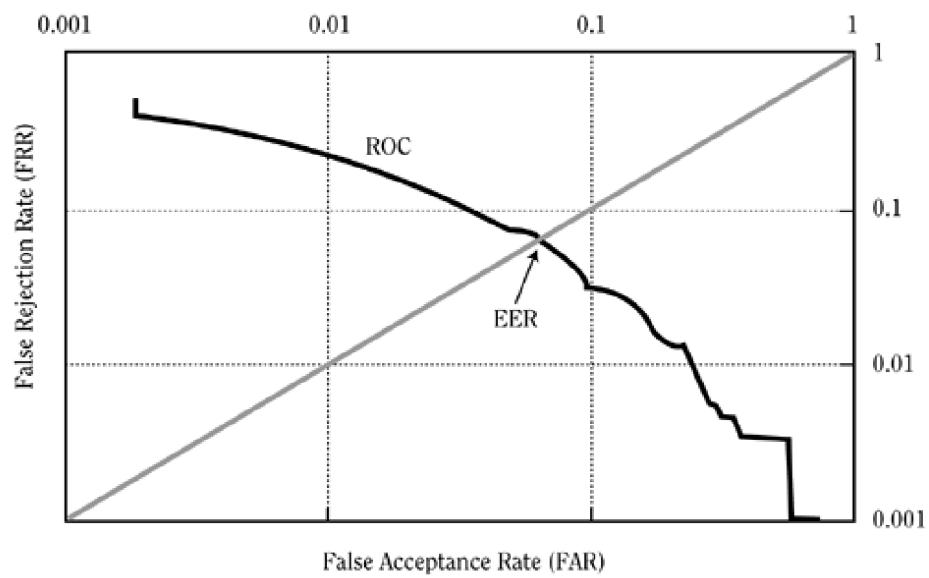
3.3 Vyhodnocení shody otisků prstů

K porovnání otisků a jejich podobnosti se obvykle využívá porovnávací skóre. To je hodnota v rozmezí 0 až 1 nebo 0 až 100, vyšší hodnota udává vyšší pravděpodobnost, že zkoumané otisky jsou stejné. Porovnávací skóre se porovnává s prahovou hodnotou, když je skóre větší, mohou být otisky považovány za shodné. Výsledek závisí na způsobu práce systému, tedy zda systém identifikuje nebo verifikuje [26]. Vyhodnocení může dopadnout čtyřmi různými způsoby:

- True positive – otisk je správně rozpoznán jako shodný.
- True negative – otisk je správně rozpoznán jako odlišný.
- False positive – otisk je špatně označen jako shodný, ale ve skutečnosti jsou otisky odlišné.
- False negative – otisk je špatně označen jako odlišný, ale ve skutečnosti jsou otisky shodné.

V praxi je obvykle nežádoucí hlavně chybné označení otisku za shodný, protože to znamená umožnění přístupu neoprávněné osobě. False negative zase na uživatele nepůsobí příliš komfortně a v krajních případech může vzbuzovat i nedůvěru k použitému systému. Pomocí těchto pojmů se dále definují koeficienty False acceptance rate (FAR) - chybné přijetí nebo False rejection rate (FRR) - chybné zamítnutí [42]. FAR udává šanci, že se nesprávný otisk vyhodnotí kladně. Počítá se jako poměr počtu neprávne přijatých otisků a počtu všech odlišných otisků. FRR je šance na zamítnutí správného otisku. Je to poměr počtu nesprávně zamítnutých otisků a počtu správných otisků. Tyto míry lze upravovat změnou prahové hodnoty [13].

Tyto koeficienty mohou sloužit jako hledisko pro kvalitu a přesnost porovnávacího systému. V ideální aplikaci se tyto křivky neprotínají, je tedy možné rozlišit všechny otisky se 100 % pravděpodobností. Jinak je bod jejich protnutí nazývá Equal Error Rate (EER) [42]. Tento bod slouží porovnání dvou aplikací. Tyto hodnoty se obvykle znázorňují pomocí Detection Error Tradeoff grafu (DET) znázorněného v obrázku 3.10 [22].



Obrázek 3.10: Příklad DET grafu převzatého z [22].

Kapitola 4

Falzifikáty a syntetické otisky prstů

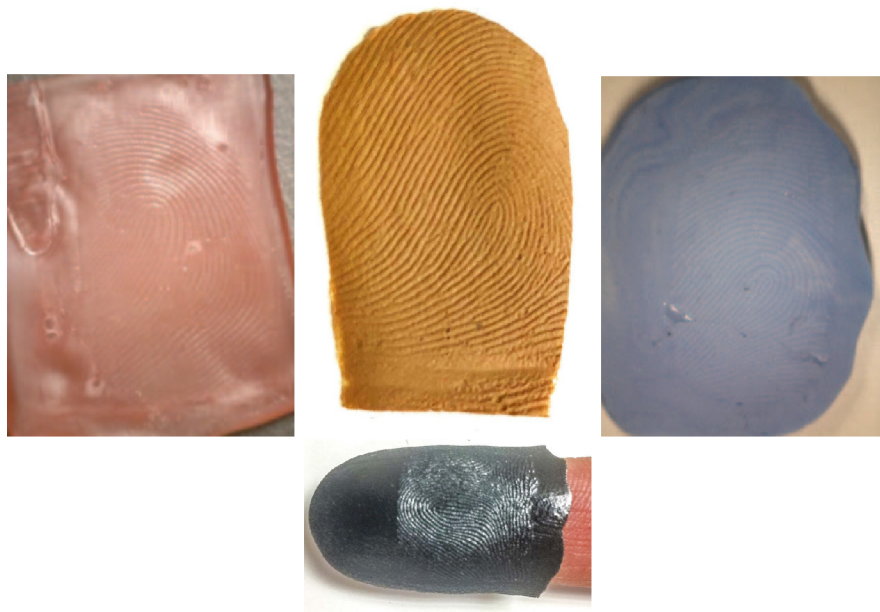
Výroba falzifikátů je v biometrii velmi důležitá. Se zvyšující se kvalitou a bezpečností systémů roste i kvalita falšování přístupů. To se projevuje jak napadáním samotného systému pomocí softwaru, tak falšováním identity pomocí různých falzifikátů. Navržené systémy se tak musí neustále zlepšovat a zvyšovat tak jejich bezpečnost. Je proto potřeba testovat navržené systémy proti falšování identity pomocí napodobenin, v našem případě napodobeninou otisku prstu. Systémy se obvykle snaží detekovat pravost vzorku pomocí zjištění, zda je testovaný vzorek živá tkáň nebo pouze umělá napodobenina. Tomuto procesu se říká detekce živosti [13] [10]. Tato kapitola se zabývá způsoby výroby falzifikátu otisku prstu. Jsou zde popsány metody výroby formy a různé materiály použité k výrobě falzifikátu samotného. V závěru kapitoly jsou popsány syntetické otisky a způsob jejich výroby, protože zjednodušeně řečeno syntetické otisky jsou vlastně falzifikáty snímku otisku prstu vytvořené pomocí softwaru.

4.1 Tvorba falzifikátu

Falzifikáty otisků prstů se dají vytvořit mnoha způsoby. Nejrozšířenějším způsobem je výroba „gumového prstu“, který imituje papilární linie své předlohy [28]. Další možností je vytvoření falzifikátu pomocí 3D tiskárny a správného materiálu. Speciální metodou oklamání systému je vytvoření pozmeněného otisku simulací různých deformací prstu přímo na vlastním prstu. Tato metoda neslouží k oklamání systému, aby si myslel že vzorek patří jiné určité osobě, ale k zamaskování vlastní identity [50].

Kvalita falzifikátu se odvíjí už od samotné předlohy pro falzifikát. Dobrý falzifikát by měl imitovat papilární linie originálního otisku prstu. Je důležité, aby se na falzifikát přenesly nejen linie, ale i detaily jako jsou markanty či singulární body. Nejdříve je nutné získat snímek otisku prstu, který má být imitován. K tomu lze využít například metody popsané v kapitole 2.4. Tyto snímky se dají upravit a vylepšit pomocí různých technik předzpracování k dosažení lepších výsledků v následné výrobě falzifikátu. Pomocí vzniklé předlohy je následně vytvořen falzifikát. Buď se nejdříve vytvoří forma a z té se vytvoří napodobenina prstu, nebo je falzifikát vytvořen přímo, použitím 3D tiskárny.

Při použití 3D tiskárny je nutné nejdříve namodelovat 3D povrch prstu. K tomu se používá generický 3D tvar prstu a na něj se namapuje získaný 2D vzorek otisku. Tím se na povrchu prstu vytvoří papilární linie, které se později vytisknou v tiskárně. Výsledný otisk je ještě nutné chemicky očistit, aby se odstranil podpůrný materiál použitý při tisku [3].



Obrázek 4.1: Příklad falzifikátů z různých materiálů. Zleva: vosk, latex, silikon dole je falzifikát z 3D tiskárny. Obrázky převzaty z [21] [28] [3].

Pro vytvoření falzifikátu pomocí formy je nejdříve vhodným způsobem vytvořena forma a z je v závislosti na použitém materiálu vytvořena napodobenina prstu.

4.1.1 Materiály používané k tvorbě falzifikátu

Při výběru materiálu k výrobě falzifikátu je důležité, jakým způsobem bude výsledný falzifikát snímán. Materiál obvykle musí být elastický, aby bylo možné ho na snímač přitlačit. Je taky vhodné, aby byl falzifikát použitelný více než jednou, kdyby senzor vyžadoval opětovné přiložení, z toho důvodu nejsou deformovatelné materiály příliš efektivní při oklamání dotykových senzorů. V [21] jsou různé materiály pro falzifikáty testovány a ohodnoceny podle různých kritérií. Jako nejlepší materiály pro výrobu falzifikátů se jevíly:

- Vosk – tento materiál měl nejlépe hodnocený poměr kvality a skóre. V [21] byly použity vosky určené pro zubaře. Vosk se nahřeje a přitlačí se do formy, po vychladnutí je možné ho z formy sejmout.
- Tekutý latex – latexové otisky sice podle NFIQ neměly vysokou kvalitu, ale ukázalo se, že k falšování identity je vhodný, protože dosahuje vysoké přesnosti vzhledem k originálnímu otisku prstu. Pro vytvoření falzifikátu se tekutý latex nalije do formy, kde se nechá na několik hodin vyschnout.
- Silikonová pasta – silikon měl velmi slušné výsledky, což je způsobeno i tím, že je lehké s ním pracovat. Silikonová pasta je tvořena z dvou komponent. Po jejich smíchání vznikne pasta, která se přitlačí na formu a po přibližně deseti minutách ztuhne.

V 3D tiskárnách se využívají speciální materiály podobné gumě [3]. Tyto materiály mají podobnou elasticitu a tvrdost jako má kůže na konečcích prstů.

4.2 Výroba formy

Výroba formy je důležitou součástí procesu tvorby falzifikátu. Je dobré, aby forma byla z pevného materiálu, aby bylo možné ji použít opakovaně a nedocházelo k jejímu opotřebení. Způsoby výroby formy se tak dají rozdělit na dva způsoby: Odstraněním materiálu z povrchu formy nebo vytvarováním materiálu podle prstu.

Tvarování formy pomocí prstů spočívá v přitlačení prstu na povrch použitého materiálu. Tím se v něm vytvoří struktura odpovídající papilárním liniím prstu. Pro tuto metodu lze použít například tvarovatelný plast, který je při zahřátí lehce tvarovatelný, ale po vychladnutí je tvrdý jako normální plast. Lze využít i materiály používané k výrobě falzifikátu jako třeba silikonová pasta [28]. Nevýhodou takto vytvořených forem ale je, že odlití falzifikátu nemusí být tak snadné jako u forem vytvořených jinými metodami, jejich okolí totiž může být deformované, což může ztížit odstraňování falzifikátů.

Při tvarování formy odstraněním materiálu je z destičky z vhodného materiálu odstraňován materiál v místech, kde se v originálním otisku prstu nachází hřebeny papilárních linií. K tomu se dá využít mechanické odstranění například rytím pomocí pevného hrotu, či laseru. Tímto způsobem lze upravit i pevnější materiály jako například různé kovy. Potom je výsledná forma velmi odolná a při opatrném zacházení může vydržet velmi dlouho. Tato metoda je limitována přesností nástrojů použitých k rytí.

Materiál se dá z destičky odstranit i chemickou cestou. Tímto způsobem se vyrábí například desky plošných spojů v elektronice. Při této metodě se obvykle nejprve na povrch leptané desky nanese vrstva chránící desku v místech, kde se nebude leptat a poté je deska ponořena do roztoku v němž se odleptá nechráněná část destičky. Tato metoda je velmi přesná a při použití moderních technologií k nanesení ochranné vrstvy lze dosáhnout vysokého stupně detailu [35].

4.2.1 Výroba formy odleptáváním

Výroba formy pomocí leptání je velmi podobná leptání plošných spojů [37]. Zde se obvykle používají cuprexitové destičky, což jsou vlastně sklolaminátové destičky plátované měděnou fólií. Forma vyrobená z tohoto materiálu je dostatečně odolná k opakovanému používání. Je však nutné s ní zacházet opatrně, protože měď je možné z destičky obrousit. Na očistěnou destičku se nanese ochranná vrstva. Toho se dá dosáhnout pomocí fotolitografie nebo nanesením odolné vrstvy například lihovkou či voskem. Tyto metody jsou však nepřesné, proto se v praxi využívá hlavně fotolitografie.

Ta spočívá v nanesení fotocitlivé vrstvy na destičku. Tato vrstva se poté odstraní v místech určených k leptání. Toho lze docílit nasvícením pod UV světlem po dostatečně dlouhou dobu. Po osvětlení je nutné desku ponořit do vývojky. Vývojka je roztok, který reaguje s fotocitlivou vrstvou pouze v místech, kde byla nasvícena a odstraní ji. Tím odhalí místa, která na desce budou později leptána. Jako vývojka se často používá roztok hydroxidu sodného ($NaOH$) [32] nebo specializované roztoky přímo určené k vyvíjení obrazu.

Z toho vyplývá, že k vytvoření otisku je potřeba zakrýt místa, která budou ve výsledném falzifikátu hrát roli údolí, a naopak místa kde jsou hřebeny je potřeba osvětlit. Proto je potřeba použít snímky otisků prstů, kde jsou invertované barvy (snímky jsou černobílé). Takto upravené snímky je dobré vytisknout na průhlednou fólii nebo na papír a poté nastříkat papír speciálním sprejem na zprůhlednění.

Po odstranění fotocitlivé vrstvy se destička ponoří do leptacího roztoku. V tomto roztoku se obnažená měď odstraní a vytvoří se tím na povrchu destičky prohlubně ve tvaru hřebenu

papilárních linií [32]. K leptání se obvykle používá roztok chloridu železitého ($FeCl_3$) nebo chlorovodík (HCl). Po vyjmutí je ještě potřeba z destičky odstranit ochrannou vrstvu. Ta se dá odstranit například pomocí lihu.

4.3 Syntetické otisky prstů

Syntetické otisky jsou otisky uměle vytvořené počítačem. Tyto metody se využívají hlavně ke generaci velkého množství otisků bez nutnosti odebírat tyto otisky z reálných osob, čímž výrazně snižuje náklady na testování rozpoznávacích systémů [12]. K ohodnocení systému jsou někdy potřeba i desítky či stovky tisíc otisků, protože je nutné spočítat velmi malé pravděpodobnosti chybného určení. Takto velké databáze se jen velmi těžko dají nasnímat, a i kdyby se to povedlo, bylo by to extrémně časově a finančně náročné [26].

Některé programy nabízí vytváření otisků podle předem zadaných specifikací (např.: počet a velikost žizev, šum snímku, hustota papilárních linií nebo typ otisku). Lze tak z vytvořených otisků sestavit databázi otisků velmi podobných reálným otiskům. Rozdíl mezi reálným otiskem a synteticky vytvořeným otiskem je viditelný na obrázku 4.2.

Syntetické otisky mají velmi široké využití. Osvědčily se například v oblasti trénování konvolučních neuronových sítí, které se v poslední době těší velké oblibě, při testování bezpečnostních systémů nebo už při kontrolování algoritmů při vývoji. U syntetických otisků je k dispozici perfektní otisk neboli *master fingerprint* (vysvětleno v kapitole 4.3.1), a tak přesně víme kolik markantů se v něm nachází a známe jejich polohu.

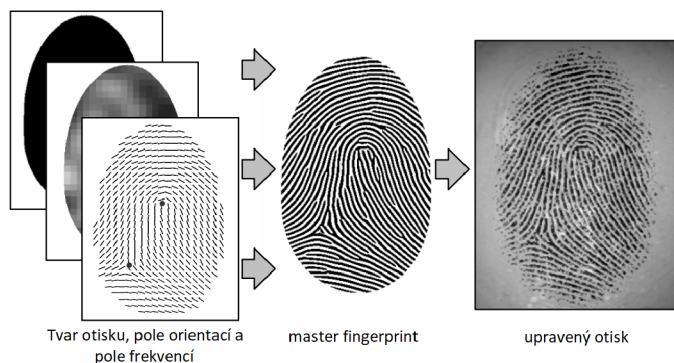
Existují dva základní přístupy ke generování syntetických otisků [26]. Prvním je *Physical ridge pattern* přístup, kde se algoritmus snaží napodobit mechanismy formace papilárních linií v průběhu embryonálního rozvoje člověka. Druhý přístup se nazývá *Statistical ridge pattern* [26]. Tyto modely se snaží realisticky napodobit otisky prstů bez imitace reálných mechanismů. Vychází z empirické analýzy, kterou byly získány statistická data hlavních charakteristik otisků.



Obrázek 4.2: Rozdíl mezi reálným a syntetickým otiskem. Převzato z [21]

4.3.1 SFinGe

Otisky použité v této práci byly vygenerovány metodou SFinGe (Synthetic Fingerprint Generation) [6]. Tato metoda byla vytvořena na univerzitě v Bologni jako jedna z prvních metod k vytvoření syntetického otisku. SFinGe využívá statistickou metodu vytváření otisků. Postup generování je velmi podobný postupu úpravy otisku prstu nebo hledání markantních bodů. Tyto postupy obvykle najdou tvar otisku ve snímku, spočítají jeho pole orientací a pole frekvencí. SFinGe tento postup obrátila a na základě těchto vlastností gene-



Obrázek 4.3: Schéma systému SFinGe z [6].

ruje takzvaný *master fingerprint*. Ten se potom různě deformuje přidáním okolního šumu, jizev či různým natočením. Tímto způsobem může vzniknout více různých snímků jednoho otisku. Tyto části postupu jsou znázorněny v obrázku 4.3.

Tvar otisku je založen na vizuálním pozorování mnoha tvarů otisků prstů. V aplikaci ho lze ovlivnit pěti parametry, které řídí velikost čtyřech eliptických oblouků a jednoho obdélníku. K vytvoření pole orientací je nejdříve náhodně zvolena třída otisku a poté se náhodně vygenerují singulární body. Ty musí splňovat podmínky vybrané třídy. Podle těchto vlastností se následně vytvoří pole orientací. Pole frekvencí je náhodně vygenerováno, ale protože podle empiricky získaných dat nelze frekvenci určit naprosto náhodně, musí se ještě dále upravit. Některé specifické oblasti otisku jako například oblast nad nejsvrchnější smyčkou mají nižší frekvenci. Proto je pole podle těchto statistik upraveno a poté je vyhlazeno podle svého okolí. Poté se již vygeneruje vzorová struktura s náhodně rozprostřenými markanty a tím vznikne *master fingerprint*.

Kapitola 5

Návrh porovnání rozdílů mezi otisky prstů

V této kapitole je popsán můj návrh analýzy dvou otisků prstů. Analýza rozdílů je velmi podobná porovnávání otisků, proto je navržený algoritmus rozdělen na dvě části: předzpracování a porovnání rozdílů otisků.

5.1 Předzpracování snímku

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.2.1, předzpracování snímku je důležitou součástí práce s otisky. V této práci byla použita metoda úpravy snímku otisku prstu inspirovaná L. Hongem v [17]. Tato metoda využívá Gaborovy filtry s různým natočením a frekvencí ke zvýraznění papilárních linií a odstranění šumu. Výsledek této úpravy je vidět na obrázku 5.1. Postup úprav je následující:

- Normalizace,
- odhad masky snímku,
- výpočet lokálních frekvencí,
- filtrace.

5.1.1 Normalizace

Cílem normalizace obrazu je úprava intenzity šedi tak, aby byl histogram rozložení odstínů šedi v určitém rozmezí. Každý pixel snímku je tedy upraven podle následující rovnice:

$$G(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}} & \text{pro } I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}} & \text{jinak} \end{cases} \quad (5.1)$$

, kde: $G(i, j)$ je intenzita barvy pixelu na souřadnicích i, j , $I(i, j)$ je původní stupeň šedi, M je střední hodnota a VAR odchylka hodnoty šedi v celém snímku. M_0 a VAR_0 jsou střední hodnota a odchylka v normalizovaném obrázku [17]. Normalizace slouží ke zmenšení odchylky stupně šedi v údolích a hřebenech, což umožní dalším krokům předzpracování efektivnější práci. Normalizace také zvětší kontrast mezi hřebenem a údolími.

5.1.2 Odhad masky snímku

Ke snížení výpočetní náročnosti algoritmu je odhadnut přibližný tvar otisku prstu ve snímku. Tomuto tvaru se říká maska a je vytvořena s použitím standardní odchylky stupně šedi v bloku. Ta je porovnána s prahovou hodnotou a pokud je odchylka větší, je blok označen jako součást otisku. Výpočet orientace a frekvence se provádí pouze na blocích, které náleží k otisku [4].

5.1.3 Výpočet lokální orientace

Orientace papilárních linií je přirozená vlastnost v každém bodě otisku prstu, která se nemění [17]. Určuje orientaci hřebenů a údolí v daném bodě. Orientace se počítá pro bloky stejné velikosti (zde použity bloky velikosti 16×16 pixelů). Pro každý pixel bloku se nejdříve spočítá gradient osy x a y pomocí vhodného operátoru. K tomu se dá využít například Sobelův operátor, který je vhodný pro výpočetně slabší stroje, nebo složitější Marr-Hildreth operátor [17]. Poté se vypočítá orientace celého bloku $\theta(i, j)$ pomocí následující rovnice:

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v), \quad (5.2)$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} (\partial_x^2(u, v)\partial_y^2(u, v)), \quad (5.3)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{V_y(i, j)}{V_x(i, j)} \right) \quad (5.4)$$

Kvůli přítomnosti šumu, markantů a jiných rušivých elementů není tato hodnota úplně přesná, je vhodné ji upravit pomocí filtru dolní propust. Tato úprava také vyhladí velké přeskoky mezi sousedními bloky podle zadané velikosti filtru (zde použito okolí 5×5 bloků).

5.1.4 Výpočet lokální frekvence

Přechod mezi hřebenými a údolními papilárních linií lze vnímat jako sinusoidu tvořenou stupněm šedi ve snímku [17]. Tato sinusoida je nakloněná podle orientace daného bodu. Jelikož už známe orientaci jednotlivých bloků můžeme s její pomocí vypočítat i frekvenci tohoto bloku. Bloky jsou otočeny podle své orientace, tak, aby byly papilární linie vertikálním směrem a je spočítán počet a umístění vrcholů hřebenů ve směru kolmém na jejich orientaci. V takto orientovaném snímku lze spočítat počet lokálních vrcholů na ose X a s jejich pomocí vypočítat frekvenci papilárních linií.

$$F(i, j) = \frac{1}{T} \quad (5.5)$$

, kde T je průměrný počet pixelů mezi dvěma vedlejšími vrcholy. Frekvence bloku musí spadat do určitého rozmezí, jinak je blok označen jako blok, kde nelze zjistit frekvenci. Ve snímku, který má 500 dpi spadá toto rozmezí na $[1/3, 1/25]$ [17]. Poté je stejně jako v minulém kroku provedena filtrace dolní propustí k vyhlazení přechodů mezi jednotlivými bloky.

5.1.5 Gaborova filtrace

Finální úprava probíhá pouze na blocích označených maskou jako součást otisku, ostatní jsou rovnou nabarveny na bílo. K vytvoření Gaborova filtru jsou potřeba 3 parametry, frekvence sinusoidy, natočení filtru a velikost. Frekvence a orientace bloku už byla spočítána v předchozích krocích, zbývá určit velikost filtru. Ta ovlivňuje robustnost filtru, čím větší filtr, tím lépe bude odstraňovat okolní šum, ale zároveň je více náchylný k vytvoření falešných linií [17]. Naopak příliš malý filtr nebude efektivní při odstraňování šumu, ale není u něj tak pravděpodobné, že vytvoří falešnou linii. Je proto dobré vybrat kompromis mezi těmito variantami. Rovnice obecného filtru je:

$$h(x, y : o, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_o^2}{\delta_x^2} + \frac{y_o^2}{\delta_y^2} \right] \right\} \cos(2\pi f x) \quad (5.6)$$

$$x_o = x \cos o + y \sin o \quad (5.7)$$

$$y_o = -x \sin o + y \cos o \quad (5.8)$$

, kde o je orientace filtru, f frekvence a δ_x a δ_y určují velikost filtru.

5.1.6 Binarizace

Po odstranění šumu a zvýraznění linií lze ze snímku jasně vyčíst tvar papilárních linií. Binarizace převede snímek do tvaru ve kterém jsou pouze dvě barvy – černá a bílá. Protože v různých oblastech snímku jsou rozdílné kontrasty, probíhá tento krok v blocích, ne nutně stejné velikosti jako v předchozích krocích. Hodnota stupně šedi všech pixelů v bloku je porovnávána s prahovou hodnotou a podle toho, jestli je menší, nebo větší je nastavena na bílou nebo černou. Prahová hodnota je vypočtena jako průměrná hodnota stupně šedi v daném bloku.

5.1.7 Skeletonizace

K dalším krokům úpravy snímku otisku prstu patří skeletonizace. Tento krok zmenší šířku hřebenů na tloušťku jednoho pixelu, což usnadňuje práci při rozeznávání markantů. Zeštíhlení linií probíhá opakovaným aplikováním morfologického operátoru eroze, který vždy odstraní ze všech objektů vrstvu širokou jeden pixel, dokud není čára pouze jeden pixel široká. Při tomto procesu se nesmí přerušit žádné existující propojení objektu. Jakmile se žádný již pixel ve snímku nezmění je nalezena kostra snímku. Výsledek úprav je vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Úprava snímku. Zleva: původní snímek, snímek upravený Hongovou metodou, kostra otisku.

5.2 Porovnání snímků

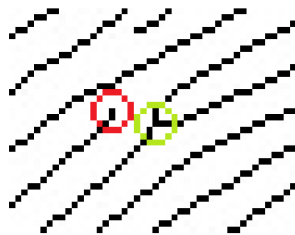
Porovnání rozdílů mezi snímky bude založené na metodě rozpoznávání snímků pomocí markantů. Algoritmus nejprve najde markanty v obou upravených snímcích k tomu použije algoritmus inspirovaný metodou *crossing number* zmíněnou v kapitole 3.2.2. Poté začne hledat markanty, které se nachází v obou otiscích. Toho docílí párováním hran, které symbolizují dvojici markantů v jednom otisku. Úspěšně spárovaná hrana znamená nalezení dvojice markantů, které se nachází v obou otiscích. Takto vznikne seznam všech markantů, které byly nalezeny v obou otiscích. Porovnáním s původním seznamem markantů každého otisku tak získáme seznam markantů, které jsou považovány za pravé a seznam markantů, které jsou považovány za falešné, tedy vzniklé při špatném snímání, úpravě snímku, či přímo při tvorbě falzifikátu.

5.2.1 Vytváření hran

Markanty jsou rozpoznávány na základě skenování okolí pixelů. Pokud je pixel součástí linie (je černý) prozkoumá se jeho osm okolních pixelů. Počet pixelů, které jsou také součástí linie udává typ pixelu:

- 1 - pixel je vyhodnocen jako zakončení/začátek linie.
- 2 - pixel je vyhodnocen jako součást linie, není to tedy markant.
- 3 – pixel je vyhodnocen jako vidlice.
- 4 a více – pixel je nejspíš součástí složitějšího typu markantu (například křížení).

Pro účely této práce nebyly pixely ze 4. kategorie využívány, protože se počítá pouze se dvěma typy markantů. Tato metoda je schopná detekovat markanty velmi spolehlivě, občas ale detekuje i falešné markanty. Je proto vhodné tyto markanty odhalit a odstranit. Nejvýraznějším problémem je detekce okrajů otisku jako markantů, proto je každý markant typu zakončení, který je na okraji otisku odstraněn ze seznamu markantů. Při předzpracování snímku se občas linie rozpojí, proto jsou markanty typu zakončení, které jsou příliš blízko u sebe ignorovány. Dalším problémem je detekce vidlic na přilehlých pixelech. Když jsou detekovány vidlice, proběhne porovnání polohy s ostatními vidlicemi a pokud je vzdálenost s některou menší než dva pixely, není tento markant přidán na seznam. Na obrázku 5.2 jsou



Obrázek 5.2: Detekce markantů. Červené kolečko označuje ukončení, zelené označuje vidlici.

vidět detekované markanty, u vidlice je navíc vidět, že jako vidlice by mohlo být označeno více pixelů v sousedství již označeného, ale jsou příliš blízko.

Každý markant je reprezentován svou polohou ve snímku, orientací získanou z pole orientací zjištěného při předzpracování snímku a typem. Následně jsou vytvořeny hrany mezi každou dvojicí markantů. Tyto hrany obsahují informace o svých dvou koncových bodech – markantech, euklidovskou vzdálenost mezi nimi a úhly mezi jejich spojnicí a orientací jednotlivých markantů. Pomocí těchto informací lze porovnávat hrany bez ohledu na natočení otisku, protože jejich vzdálenost ani úhly mezi spojnicí a markantem se nemění.

5.2.2 Hodnocení spárovaných/nespárovaných markantů

Pravděpodobnost, že se dvě hrany z různých otisků vyhodnotí jako shodné existuje i když nejsou otisky ze stejného prstu. Když ale porovnáme i sousední hrany těchto již spárovaných hran, pravděpodobnost nalezení další shody v rozdílných otiscích exponenciálně klesá. Díky tomu lze vytvořit skóre, podle kterého lze říci, zda jsou otisky shodné. Při porovnávání hran je brán zřetel na vzdálenost, úhly a typy markantů. Všechny tyto vlastnosti musí spadat do určitého rozmezí. Protože jsou otisky zadávány pod velmi podobným úhlem, je jasné, že markanty, které by se měly spárovat, musí být na přibližně stejné pozici ve snímku. Proto je porovnávána i poloha, i ta musí spadat do určitého rozmezí. Mějme markant $M = (x, y, o, t)$, kde x a y jsou souřadnice markantu, o je orientace markantu a t je jeho typ. Dále mějme $H_1 = (M_1, M_2, d_1, a_1, a_2)$ a $H_2 = (M_3, M_4, d_2, a_3, a_4)$, kde M jsou markanty hrany, d je vzdálenost markantů a nakonec a jsou úhly ke spojnicí jednotlivých markantů. Pak mohou dvě hrany být označeny za shodné, pokud splňují podmínky:

$$M_1.t = M_3.t \wedge M_2.t = M_4.t \quad (5.9)$$

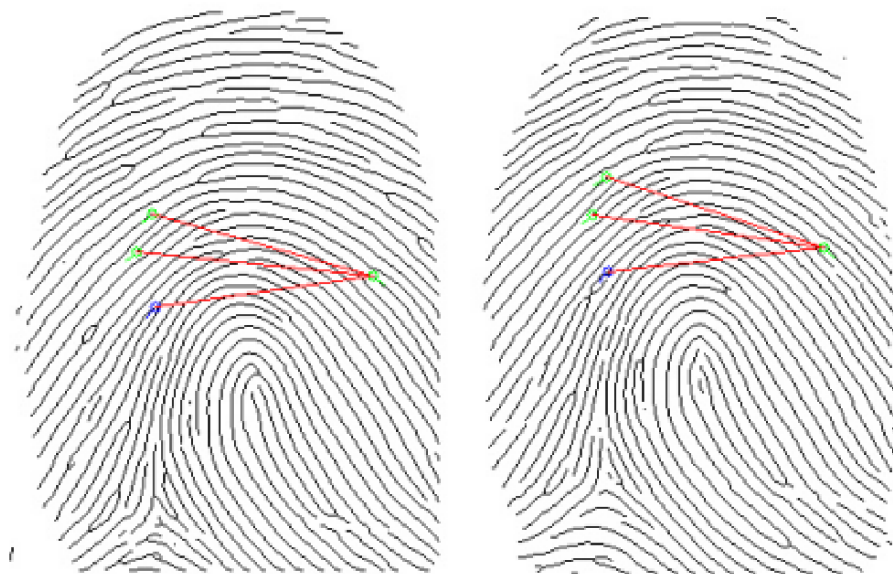
$$d_1 - d_2 < z \quad (5.10)$$

$$|a_1 - a_3| < w \wedge |a_2 - a_4| < w \quad (5.11)$$

, kde z je práh rozdílu mezi délkami hran a w je práh rozdílu mezi jednotlivými úhly. Na obrázku 5.3 je vidět výsledek spárování tří shodných hran.

Nejdříve se mezi sebou porovnají všechny hrany a u spárovaných hran poté dochází k procházení všech hran vycházejících z markantů jedné hrany s hranami vycházejících z markantů druhé hrany. Pokud je nalezen shodný pár, je na něm toto porovnání provedeno znovu. Při každé další sousední hraně se zvětšuje skóre. Hodnota, o kterou se zvětšuje je dána počtem již spárovaných hran v řadě. Pokud byly spárovány alespoň čtyři řady za sebou, přičte se hodnota 2^n , kde n je počet spárovaných hran, jinak se přičte hodnota 1. Díky porovnávání byl získán seznam všech markantů v obou snímcích, seznam spárovaných markantů a seznam markantů, které nebyly vyhodnoceny jako shodné s žádným jiným

markantem. Tyto data lze využít k analýze falzifikátu. Protože první z porovnávaných otisků je vždy otisk, který sloužil jako předloha při vytváření druhého, je žádoucí, aby v tomto otisku bylo procento spárovaných markantů co nejvyšší.



Obrázek 5.3: Ukázka tří úspěšně spárovaných hran. Modré kruhy označují vidlice, zelené ukončení.

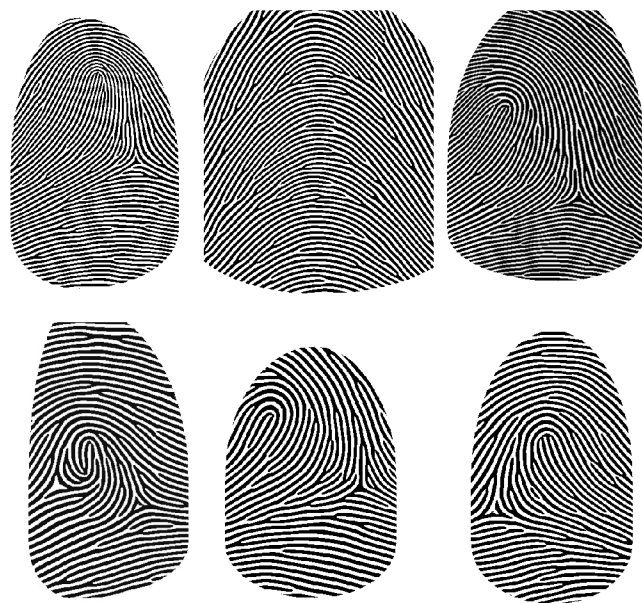
Kapitola 6

Tvorba databáze a implementace algoritmu

V této kapitole je popsáno, jakým způsobem vznikala databáze otisků, pomocí kterých byly následně vytvořeny formy a falzifikáty. Dále je zde popsána implementace navrženého algoritmu a způsob jeho využití. K otestování navrženého algoritmu a analyzování falzifikátů je potřeba vytvořit reprezentativní množství falzifikátů. K tomu jsem vytvořil dvě skupiny otisků. Do první bylo nasnímáno šest mých vlastních otisků a do druhé bylo vygenerováno šest otisků pomocí programu SFinGe. Otisky z první skupiny byly nasnímány v co nejlepších podmínkách a snímky byly dále upraveny pomocí Hongovy metody. Tyto snímky jsou zobrazeny v obrázku 6.1. Snímky z druhé skupiny byly vygenerovány jako perfektní otisky (master fingerprint), tedy bez efektů, které by rušily kvalitu otisku jako jsou jizvy, šum nebo natočení. Otisky byly generovány tak, aby byla skupina rozmanitá. Mezi vygenerovanými otisky tak jsou otisky s vysokým počtem markantů, ale i otisky s nízkým počtem, některé otisky také mají zvýšenou hustotu papilárních linií a některé naopak sníženou. Zároveň byly vygenerovány všechny základní třídy otisků. Tyto otisky jsou vidět na obrázku 6.2.



Obrázek 6.1: Reálné otisky po úpravě Hongovou metodou.



Obrázek 6.2: Syntetické otisky vytvořené pomocí programu SFinGe.

6.1 Tvorba forem

Metoda výroby forem byla daná zadáním, proto zbývá zvolit postup. Zvolil jsem postup, který se používá i při leptání desek plošných spojů, protože materiály používané při tomto postupu jsou lehce dostupné. Jako materiál pro formy byl vybrán cuprexit. Tento materiál je lehce dostupný na internetu i v obchodech s elektronickými součástkami. Mnou použité destičky na sobě již měly fotocitlivou vrstvu, takže bylo potřeba destičku nasvítit a posléze vyvinout.

Po několika pokusech jsem došel ke zjištění, že nasvicování po dobu pěti minut stačí, protože po uplynutí této doby jsem již nepozoroval žádné změny. Jako zdroj UV světla byla použita obyčejná UV lampa na nehty Esperanza EBN001W SAPHIRRE [2]. Získané otisky jsem invertoval a vytiskl na průhlednou fólii. Z ní byly vystříhány otisky, které potom byly použity při nasvicování. Tyto kusy fólie byly zatíženy pomocí čirého kusu skla používaného v biologii při mikroskopování. Bylo testováno i přilepení okrajů fólie pomocí lepicí pásky. Obě metody mají podobné výsledky, ale z důvodu lehčí manipulace jsem nakonec upřednostnil sklíčko.

Po nasvícení následuje vývoj obrazce na destičce. K vývoji otisků jsem použil 1,5 % roztok hydroxidu sodného. Při vývoji se dá použít i menší koncentrace, ale z důvodu co nejpřesnější replikace výsledků byl použit nezředěný roztok. Doba, kdy byla destička ponořena ve vývojce byla ze začátku přibližně 30 vteřin. S opakovaným vyvíjením se ale roztok znečišťuje a doba po kterou se musí destička nechat ponořená se zvětšuje. Pro dostatečné odstranění fotocitlivé vrstvy nestačí jen, aby byly otisky na destičce zřetelně viditelné. Je potřeba počkat o něco déle, aby došlo k úplnému odstranění vrstvy a nejen povrchovému. Když je destička ve vývojce, je potřeba s nádobou nebo destičkou trochu pohybovat, aby se k destičce dostal nenasycený roztok. Je důležité nenechat destičku ve vývojce příliš dlouho, aby nedošlo k odstranění fotocitlivé vrstvy i v místech, kde nebyla destička osvětlena. Po

vyndání destičky z vývojky je potřeba destičku důkladně očistit vodou a poté do sucha utřít, aby nedocházelo ke zředění leptací kapaliny.

K leptání byl použit roztok chloridu železitého ($FeCl_3$). V tom se destička nechá po dobu přibližně pěti minut. I zde se čas prodlužuje v závislosti na znečištění roztoku. V průběhu několika vteřin po vložení destičky do leptací kapaliny začala být viditelná reakce. Odleptaná měď se usazovala na povrchu destičky, proto je nutné s destičkou pohybovat, aby se k obnaženým místům stále dostával leptací roztok a nebyl blokován usazenou mědí. Jako efektivní se mi osvědčilo položit destičku na kapalinu nasvícenou stranou dolů, tak aby se destička nepotopila, ale plavala na hladině. Díky tomu odleptaná měď odplave dolů a k destičce se tak dostává roztok bez problémů. Při tomto způsobu je však nemožné kontrolovat stav destičky, takže byl tento způsob používán hlavně ze začátku leptání a poté byla destička obrácena a ponořena celá, aby bylo možné kontrolovat, zda je leptání již hotovo. Po vyndání z leptacího roztoku je potřeba desku opláchnout ve vodě a důkladně odstranit zbytky chloridu.

Následně byly opatrně odstraněny zbytky fotocitlivé vrstvy pomocí lihu. Celý proces probíhal za šera v uzavřené místnosti bez oken, aby nebyla světlocitlivá vrstva na destičce rušena denním světlem ani světlem žárovek. Obě použité kapaliny jsou běžně k dostání v obchodech s elektrickými součástkami, nebo na internetu. Ani hydroxid sodný, ani chlorid železitý by se neměly dostat do styku s kůží, proto jsem při práci s nimi používal gumové rukavice při manipulaci s destičkou vhodné nástroje, například platovou pinzetu. Ze začátku jsem experimentoval s menšími destičkami a jedním otiskem. Po několika provedených experimentech byla na jednu destičku vyleptána vždy celá jedna skupina otisků. Vznikly tak dvě formy o šesti otiscích viditelné na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3: Formy vytvořené metodou leptání. Vlevo syntetické otisky, vpravo reálné.

6.2 Vytvoření databáze falzifikátů

K otestování formy je potřeba vytvořit dostatečně velký počet falzifikátů. Je potřeba otestovat formu, zda se dá využívat opakovaně a kdyby bylo testováno jen pár falzifikátů, byly by výsledky značně zkreslené tím jak se falzifikáty zrovna povedou.

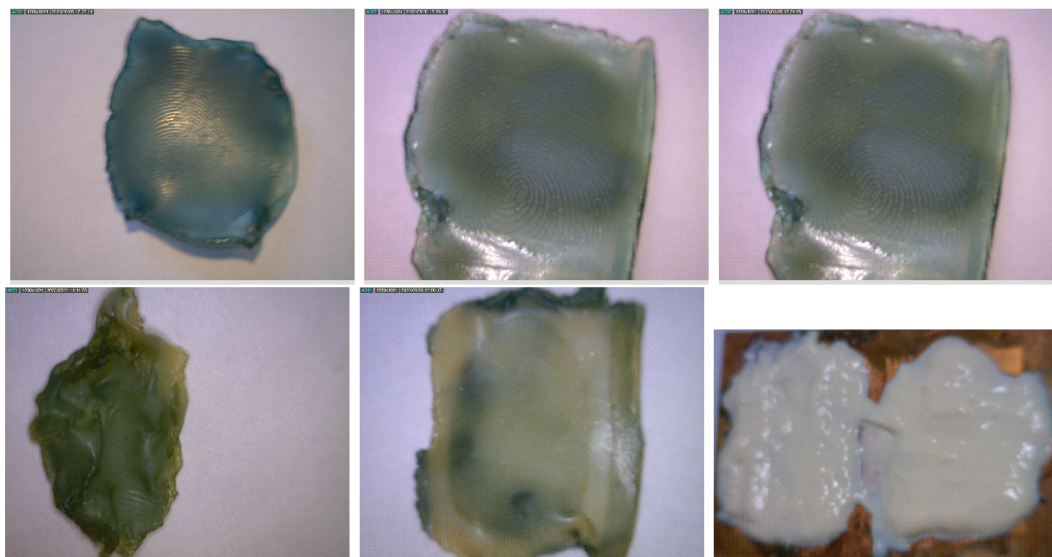
6.2.1 Výroba falzifikátů

K výrobě falzifikátů byl vybrán tekutý latex, protože byl podle [21] vybrán jako nejvhodnější materiál pro tvorbu falzifikátů. Navíc je levný a snadno dostupný. Vyzkoušel jsem i některé modelovací hmoty, ale nebyl jsem schopen vzniklý otisk nasnímat, aniž by se o senzor zdeformoval.

Tekutý latex byl opatrně nalit do forem a rozetřen tak, aby vyplnil všechny části otisku a jeho vrstva nebyla příliš tlustá. Při příliš tlusté vrstvě vysychá latex příliš dlouho, při příliš malé vrstvě je pak velmi obtížné odstranit latex z formy, aniž by se při tom poničil otisk. Ke snadnější manipulaci je možné vytvořit z latexu na okraji falzifikátu část, za který je pak možné falzifikát z formy odloupnout. Latex je nutné nechat vyschnout, doba schnutí je závislá na tloušťce latexu na formě, ale pro jistotu jsem vždy nechal latex schnout alespoň 24 hodin. Při odstraňování latexu z formy jsem nejprve pomocí párátko, nebo podobného

nástroje odloupl všechny okraje, a poté jsem pomocí zmíněného okraje falzifikát odloupl. Při manipulaci s latexem je důležité, aby se sám sebe nikdy nedotýkal, protože je velmi lepkavý. Dotyk latexu s latexem obvykle vyústil v deformaci falzifikátu, protože je velmi těžké od sebe povrchy odlepit, aniž by byly poškozeny. V průběhu testování jsem narazil na dva druhy tekutého latexu, první byl řídký a druhý byl hustší a strukturou připomínal spíše pastu. Řidší typ latexu se při tvorbě falzifikátů používal mnohem lépe, proto jsem hustší latex naředil pomocí destilované vody, aby se struktura více přiblížila prvnímu jmenovanému. Na obrázku 6.4 je zobrazen latex nanesený na dva otisky formy a jsou zde vyfocené některé povedené falzifikáty a příklad zdeformovaného falzifikátu.

Takto bylo vytvořeno sedm sad falzifikátů, celkem tedy 84 falzifikátů. Z toho některé se zdeformovaly při sloupávání z formy, protože latex se sám se sebou při kontaktu rychle slepí. Falzifikáty z latexu je nutné nasnímat brzy po sejmutí z formy, protože neustále vysychají a přibližně po dalších 24 hodinách jsou již příliš lepkavé pro další práci, natož pro snímání senzorem.



Obrázek 6.4: Ukázka výsledných falzifikátů. Ve spodní řadě jsou zleva: zdeformovaný falzifikát a falzifikát s vysokým počtem bublin a ukázka latexu rozetřeného na formě.

6.2.2 Snímání falzifikátů

Získané falzifikáty byly nasnímány pomocí optického senzoru ZKTeco ZK9500 a softwaru k němu dodaného [52]. Společnost ZKTeco Europe je mezinárodní společnost zabývající se výrobou a vývojem biometrických zařízení. Senzor ZK9500 snímá otisky prstů bez kontroly jejich živosti s rozlišením 500 dpi. Je k němu volně dostupný software, díky kterému je možné ho používat [52]. Při samotném snímání se jako velký problém ukázalo, že falzifikáty nejsou ve všech místech stejně tlusté a některá místa tak nebyla vůbec nasnímána. V některých místech bylo nutné zatlačit na falzifikát více a byly tak nasnímány i části, které neobsahovaly papilární linie. Někdy je také vidět, že papilární linie nejsou dostatečně vysoké a na snímku se projeví i jejich pozadí. Při snímání některých falzifikátů jsem použil pevnou destičku velikosti snímání oblasti, abych zatlačil na falzifikát stejnou silou ve všech částech, někdy pomohlo použití houbičky na make-up. Každý falzifikát byl nasnímán několikrát. Zjistil jsem, že když je falzifikát tenký, skoro až průhledný, je nasnímán nejlépe, jinak se silně

projeví pozadí a otisk je špatně rozeznatelný. V tabulce 6.1 jsou vidět počty falzifikátů a snímků u jednotlivých otisků. Otisky jsou očíslovány tak, že čísla 1-6 odpovídají reálným otiskům a čísla 7-12 odpovídají otiskům syntetickým. Na obrázku 6.5 jsou vidět příklady povedených a nepovedených snímků falzifikátů. Celkem bylo vytvořeno 73 falzifikátů, které bylo možné nasnímat. Z každého falzifikátu vzniklo 1 až 3 snímky, podle toho jak dobře se snímky povedly. Celkem bylo pořízeno 164 snímků.

Tabulka 6.1: Tabulka počtu falzifikátů a jejich snímků.

Číslo otisku	Počet falzifikátů	Počet snímků
1	5	11
2	7	19
3	7	18
4	6	15
5	6	13
6	6	14
7	5	9
8	5	10
9	6	13
10	6	10
11	7	14
12	7	18



Obrázek 6.5: Příklady snímků vzniklých z falzifikátů. Nahoře jsou povedené snímky, dole nepovedené.

6.3 Implementace

V této části je podrobně vysvětleno jakým způsobem byl implementován algoritmus navržený v kapitole 5.

6.3.1 Výběr implementačního jazyka - Python

Existuje velké množství programovacích jazyků a navržený algoritmus by šlo zrealizovat téměř v každém z nich. Na základě faktorů důležitých pro tuto práci jako je například práce s obrázky a na základě mých vlastních preferencí jsem vybral jazyk Python 3.

Python je v poslední době velmi populární programovací jazyk. Původní verze pythonu vznikla v roce 1991 a byla vytvořena Guido van Rossumem. V současné době je vyvíjen jako open-source jazyk společností Python Software Foundation. Velkou roli při vývoji tohoto jazyka hrála přehlednost kódu i proto byl inspirován jazykem ABC, který sloužil pro výuku programování. Python je interpretovaný a vysokoúrovňový programovací jazyk, má dynamické typování a podporuje takzvaný „garbage collection“. Podporuje také objektově orientované programování. Poslední a zároveň aktivní řadou pythonu je Python 3. V tomto projektu byla použita verze 3.7. Pro tento projekt je tento jazyk ideální, protože umožňuje jednoduchou práci s obrázky díky velkému množství volně dostupných knihoven. Jazyky jako c++ či c jsou pro tento účel zbytečně komplikované. Tyto jazyky by byly vhodné v případě optimalizace rychlosti programu.

6.3.2 Popis implementace

K úpravě snímků byl částečně použit program, který vytvořil Utkarsh Deshmukh [11]. Program byl použit v souladu s licenčními podmínkami autora. Tento program je inspirován metodou popsanou v [17]. K vytvoření masky snímku jsem použil vlastní algoritmus, kde nepoužívám porovnávání s předem vytvořenými shluky, ale porovnává standardní odchylku stupně šedi ve snímku s prahovou hodnotou. Ta byla experimentálně určena na 0,1. Nedejte tak místa v otisku, která jsou špatně definovaná, ale pouze oddělí bloky, v nichž se nachází otisk od pozadí. K tomu jsem přidal vlastní algoritmus pro vypočítání lokálních orientací snímku. Ten ke spočítání gradientu jednotlivých os používá Sobelův operátor z knihovny cv2, poté pomocí rovnice 5.2 spočítá orientace.

Výsledkem je upravený snímek, téměř bez šumu. Na takto upravený snímek aplikuji po blocích binarizaci pomocí porovnávání standardní odchylky stupně šedi celého bloku s hodnotou jednotlivých pixelů popsaného v sekci 5.1.6. Na černobílý obrázek je potom aplikována skeletonizace.

Z upravených snímků je následně extrahována šablona pomocí funkce *get_template*. Ta nejdříve najde markanty ve snímku a poté odstraní markanty považované za falešné. Způsob hledání těchto markantů je popsán v kapitole 5.2.1. Markanty jsou reprezentovány samostatnou třídou *minutia*. Obsahují informace o své poloze, typu markantu a své orientaci v prostoru. Po vytvoření hran se uloží také seznam všech hran, kterých jsou součástí.

Dále jsou vytvořeny hrany mezi všemi markanty, ty byly popsány již v sekci 5.2.1. Hrany jsou reprezentovány jako třída *edges*. Počet hran je zredukován pomocí maximální povolené délky hran. Navíc má každý markant maximální počet hran, kterých může být součástí. Tyto omezení slouží ke snížení výpočetní náročnosti algoritmu. Mezi hranami následně probíhá porovnávání. Pro vyhodnocení je nutné použít určité hodnoty, ty byly na základě provedených experimentů nastaveny takto: rozdíl úhlů dvou markantů, aby byly považovány za shodné musí být menší než 7° , rozdíl délky dvou hran, aby byly považovány za musí být menší než 15 pixelů a rozdíl vzdálenosti markantu v prvním snímku od markantu v druhém snímku nesmí být větší než 30 pixelů.

Dvojice hran vyhodnocených jako shodné (podle rovnice 5.9) se poté rekurzivně prochází a vytváří se z nich strom hran, které se nachází v obou otiscích. Na základě hloubky vytvořených stromů se přičítá skóre, to se exponenciálně zvyšuje s druhou mocninou na

základě hloubky vytvořeného stromu. Všechny markanty, které nejsou součástí stromu jsou považovány za falešné, protože nebyl nalezen jejich protějšek v druhém otisku.

Vstupem programu jsou dva snímky otisku prstu a výstupem jsou počty markantů a počty nespárovaných markantů, k tomu je spočítáno skóre určující, jak moc podobné si snímky jsou. Tato čísla budou dále analyzována v kapitole 7. K otestování databáze byl vytvořen speciální mód aplikace, který pomocí adresářové struktury projde všechny snímky a porovná je s jejich originálem. Výsledky jednotlivých porovnání se vypíší ve formátu xls do specifikovaného souboru. Je možné si nechat vyobrazit rozmístění všech nalezených markantů a všech spárovaných markantů a hrany, u kterých byly spárovány alespoň čtyři hrany najednou.

V programu byly využity zejména knihovny cv2 a scikit-image pro práci s obrázky, dále byly také využity knihovny NumPy a matplotlib.

Kapitola 7

Vyhodnocení

V této části jsou zhodnoceny získané snímky. Ty jsou nejdříve hodnoceny mnou vytvořeným programem a poté je zjištěna jejich kvalita pomocí programu FiQiVi a NFIQ. Na konci kapitoly se pak zhodnotí dosažené výsledky.

7.1 Vyhodnocení pro vytvořený algoritmus

Při vyhodnocování výsledků falzifikátů pro navržený algoritmus jsem vybral nejdůležitější metriky, které budou sledovány. Tyto metriky jsou: dosažené skóre snímku, poměr spárovaných markantů z originálu a počet nespárovaných markantů ve falzifikátu. U skóre je požadována co nejvyšší hodnota, stejně jako u poměru spárovaných markantů. Počet nespárovaných markantů z falzifikátu je vlastně počet markantů, které jsou nežádoucí, protože vznikly při snímání/vytváření markantů. Tyto data jsou vidět v tabulce 7.1. Při tvoření těchto tabulek byl u každého falzifikátu hodnocen pouze snímek s nejlepším poměrem spárovaných markantů. U některých falzifikátů data chybí, protože tyto falzifikáty byly příliš nekvalitní pro snímání.

Tabulka 7.1: Tabulka hodnocení jednotlivých otisků podle vytvořeného programu.

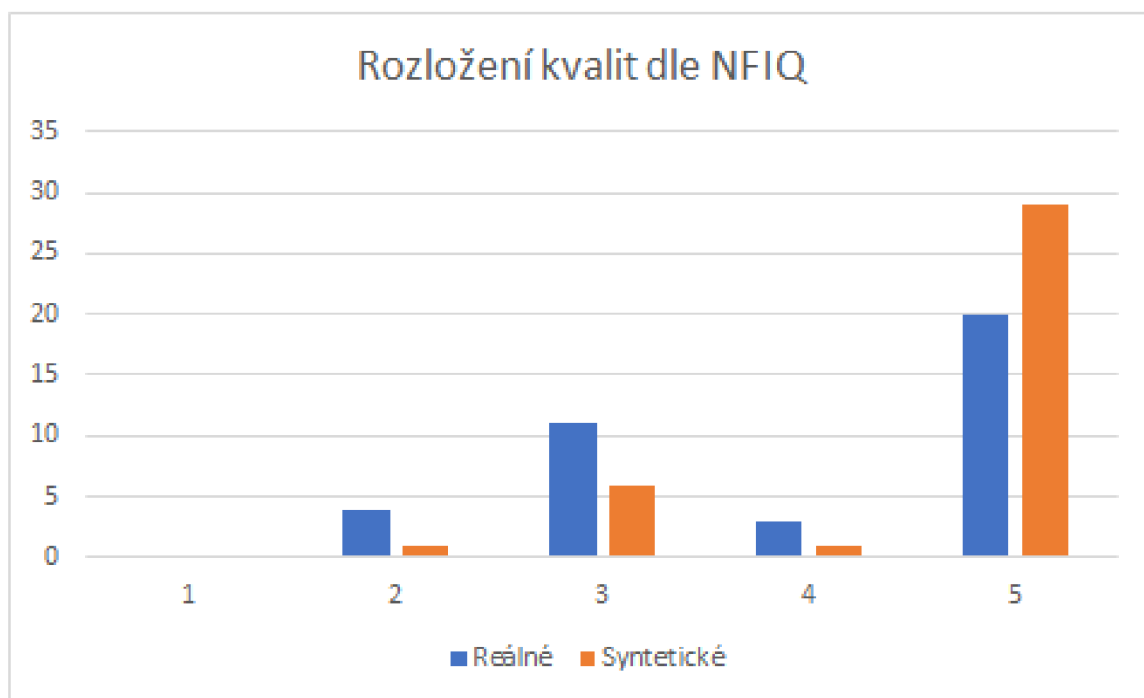
Otisk	Poměr originálních m.		Poměr falešných m.		Skóre
	Nejvyšší	Průměr	Nejnižší	Průměr	
1	90	67	60	67	217
2	81	57	66	70	230
3	88	65	64	65	192
4	85	59	58	68	889
5	89	60	48	64	912
6	79	50	55	63	298
7	85	69	63	59	424
8	68	46	52	60	938
9	88	64	57	69	390
10	87	57	69	77	191
11	84	65	71	71	674
12	93	64	67	75	153

Z této tabulky vyplývá, že nejlepší vytvořené falzifikáty podle spárovaných markantů dosahovaly velké podobnosti se svými předlohami. Tyto hodnoty jsou však značně nepřesné,

protože se v mnoha snímcích vyskytovalo velké množství falešných markantů. To je způsobeno hlavně různou tloušťkou latexových falzifikátů, díky ní se vytvoří ve snímku části, které je nutné pro nasnímání přitlačit silněji a tím pádem jsou okolní části přitlačeny příliš. Čím více je ve snímku falzifikátu falešných markantů, tím větší šance, že se najde hrana, která je podobná. Nejvyšší průměrnou hodnotu poměru originálních markantů dosahoval otisk č. 7., naopak nejmenší hodnotu dosahoval otisk č. 8. Hodnota skóre, pro kterou lze tvrdit, že jsou snímky shodné byla dle experimentů určena na přibližně 500. Je tedy vidět, že z hlediska této metriky není metoda příliš úspěšná. Skóre přes 500 dosáhlo ze všech falzifikátů pouze 12.

7.2 Vyhodnocení pomocí FiQiVi a NFIQ

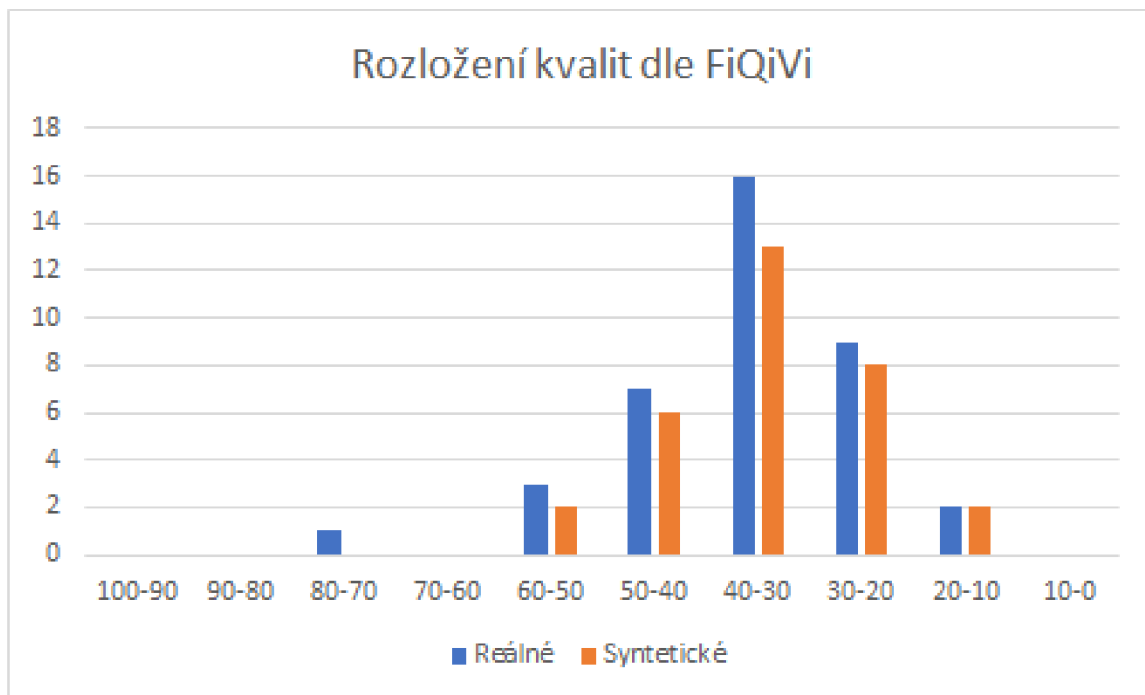
FiQiVi i NFIQ jsou již existující programy, které hodnotí kvalitu snímků. Jejich výsledky nejsou založeny na porovnání originálu a falzifikátu. NFIQ hodnotí kvalitu snímku přiřazením do jedné ze tříd 1 až 5. Na histogramu na obrázku 7.1 můžeme vidět, že snímky ani z jedné skupiny obvykle nedosahují příliš dobré kvality. Pro tento i následující graf byly použity vždy nejlepší snímky každého falzifikátu. Většina snímků byla zařazena do třídy 5, což je jediná třída, která znamená, že snímky nejsou vhodné k porovnávání. Jak již ale bylo zjištěno v [21], nemusí to nutně znamenat, že falzifikáty jsou nekvalitní. Pro srovnání, originální otisky byly většinou přiřazeny do skupiny 1 a některé do skupiny 2.



Obrázek 7.1: Histogram rozložení reálných a syntetických otisků dle NFIQ.

Porovnávání pomocí FiQiVi víceméně potvrdilo výsledky NFIQ. Na histogramu na obrázku 7.2 je vidět rozdělení výsledků seskupených do tříd po deseti procentech. Většina otisků byla hodnocena mezi 20 a 40 %, což není proti originálům, které měly vždy hodnocení v rozmezí 90 až 100 % příliš dobrý výsledek. Je vidět, že snímky reálných otisků

dosahují o něco lepší kvality než syntetické. Nejlepší výsledek měl otisk č. 6 se skóre 73 %, což už se dá považovat za slušný výsledek.



Obrázek 7.2: Histogram rozložení reálných a syntetických otisků dle FiQVi seskupených po 10-ti procentech.

Toto hodnocení bylo nejspíše způsobeno tím, že snímky latexu nebyly vždy nasnímány celé a byly na nich vidět části, které ke snímku již nepatřily nebo byly nasnímány i údolí otisku a tím pádem byl špatný kontrast otisku. Špatná kvalita otisků může být způsobena také tím, že latexové falzifikáty vytvářejí dojem vlhkého otisku. Zároveň jak již bylo řečeno u hodnocení NFIQ to, že je kvalita snímku špatná automaticky neznamená, že není podobný svému originálu.

V tabulce 7.2 jsou vidět nejlepší dosažené výsledky a průměrné hodnocení jednotlivých otisků. Nejlépe dopadl otisk číslo 6. Ten měl nejvyšší dosažené skóre od FiQVi i od NFIQ a zároveň měl nejlepší průměrné skóre FiQVi. Naopak nejhůře dopadl otisk číslo 9, který měl 2. nejnižší maximální skóre a nejnižší průměrné skóre.

Tabulka 7.2: Tabulka hodnocení jednotlivých otisků podle FiQiVi a NFIQ.

Otisk	FiQiVi		NFIQ
	Nejvyšší	Průměr	Nejlepší
1	45	32,8	3
2	57	29,8	2
3	48	31,9	2
4	46	30,5	3
5	55	35,2	2
6	73	41,5	2
7	36	27,0	5
8	59	40,5	2
9	32	22,8	4
10	52	35,2	3
11	30	25,8	3
12	52	28,1	3

7.3 Shrnutí výsledků

Podle dosažených výsledků je vidět, že tato metoda není ideální. Většina snímků měla špatnou kvalitu a i podle navrženého algoritmu se snímky jeví jako nepřesné. Pomocí vizuální kontroly některých snímků jsem zjistil, že pomocí leptání v domácích podmínkách je téměř nemožné přenést na formu dostatečný detail pro vytvoření kvalitního falzifikátu. I když se snímek jeví jako povedený, velké množství markantů bylo zkrácených. Některé zakončení se spojily s vedlejší papilární linií a vytvořily tak vidlici a podobně. Porovnání originálu a takto zdeformovaného otisku je vidět na obrázku 7.3. Zejména ve vrchní části snímku jsou viditelné markanty, které v originálu vůbec nejsou.



Obrázek 7.3: Porovnání otisku č. 6. Vlevo originál, vpravo snímek falzifikátu.

Kapitola 8

Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit a analyzovat falzifikáty vzniklé z formy vytvořené metodou leptání. K tomu byla nejdříve v práci vysvětlena základní teorie týkající se otisků prstů, byly vysvětleny základy zpracování otisků prstů a hodnocení jejich kvality. Následně byl prostudován postup vytváření forem pomocí metody leptání. Dále byly prozkoumány způsoby a materiály, které se dají použít k vytvoření falzifikátů.

V praktické části byly nejdříve vytvořeny dvě sady forem, které se poté použily k vytvoření falzifikátů. Jedna sada obsahovala šest reálných otisků a druhá sada šest otisků vytvořených synteticky. Tyto otisky byly zvoleny tak, aby mezi nimi byly zastoupeny všechny třídy otisků a aby byly rozmanité co se týče hustoty papilárních linií a markantů. Následně z těchto otisků byly vytvořeny formy na cuprexitové desce. K výrobě leptáním bylo použito světlocitlivé vrstvy, vývojky v podobě hydroxidu sodného a k leptání byl použit chlorid železitý. Z forem bylo vytvořeno sedm sad falzifikátů, které byly nasnímány pomocí optického senzoru. Jako materiál pro tyto falzifikáty by vybrán tekutý latex.

Ke zhodnocení získaných snímků byl navržen program k porovnání rozdílů mezi dvěma otisky. K předzpracování snímků byla použita metoda navržená L. Hongem. Samotná analýza je založena na hodnocení markantů. Spočívá v nalezení markantů, které se nachází v obou otiscích. Markanty se párují na základě hran tvořených dvěma markanty. Tím je získáno skóre podobnosti dvou otisků, počty nalezených markantů v otiscích a poměr markantů, kterým byl nalezen jejich protějšek. Nakonec byly snímky ohodnoceny pomocí tohoto programu a pomocí již existujících programů, čímž byly splněny všechny body zadání.

Celkem bylo v průběhu práce vytvořeno 73 falzifikátů a z nich bylo pořízeno 164 snímků. Pořízené snímky měly podle NFIQ i FiQiVi většinou špatnou kvalitu a ani podle navrženého algoritmu nedosahovaly příznivých výsledků. Nejlepších výsledků dosahoval otisk číslo 6, protože měl průměrně nejkvalitnější snímky a měl téměř nejlepší poměr falešných markantů ve snímku. Naopak nejhorší byl otisk č. 9. Syntetické otisky měly celkově horší výsledky než reálné. Hustota papilárních linií některých syntetických otisků byla vysoká a linie se tak někdy propojily.

Možná vylepšení této práce vidím ve vylepšení předzpracování obrazu. Na této části závisí následné hledání a porovnávání markantů, proto je důležité, aby bylo předzpracování co nejpřesnější a nevytvářelo falešné markanty. Další možností je detekovat ve snímku místa s horší kvalitou a tato místa nebrat v potaz, protože obsahují velký počet falešných markantů.

Literatura

- [1] ALONSO-FERNANDEZ, F., FIERREZ, J., ORTEGA-GARCIA, J. et al. A Comparative Study of Fingerprint Image-Quality Estimation Methods. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2007, sv. 2, č. 4, s. 734–743.
- [2] ALZA A.S.. Esperanza EBN001W SAPHIRRE - UV lampa na nehty. *UV lampa na nehty / Alza.cz*. Dostupné z: <https://www.alza.cz/beauty/esperanza-ebn001w-saphirre-d5240967.htm>.
- [3] ARORA, S. S., CAO, K., JAIN, A. K. et al. Design and Fabrication of 3D Fingerprint Targets. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2016, sv. 11, č. 10, s. 2284–2297.
- [4] BARMAN, S., CHATTOPADHYAY, S., SAMANTA, D. et al. An Efficient Fingerprint Matching Approach Based on Minutiae to Minutiae Distance Using Indexing with Effectively Lower Time Complexity. In: *2014 International Conference on Information Technology*. 2014, s. 179–183.
- [5] BIANCHI, T., TURCHI, S., PIVA, A. et al. Implementing FingerCode-based identity matching in the encrypted domain. In: *2010 IEEE Workshop on Biometric Measurements and Systems for Security and Medical Applications*. IEEE, 2010, s. 15–21. ISBN 9781424463022.
- [6] BIOLAB. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://biolab.csr.unibo.it/Home.asp>.
- [7] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN ISO/IEC 19795-1: Informační technologie – Testování a hodnocení výkonnosti biometrik. Technická zpráva, Český normalizační institut*. Praha, 2007.
- [8] CHEN, Y., DASS, S. C. a JAIN, A. K. Fingerprint Quality Indices for Predicting Authentication Performance. In: KANADE, T., JAIN, A. a RATHA, N. K., ed. *Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, s. 160–170. ISBN 978-3-540-31638-1.
- [9] CHEN, Z. a KUO, C. H. A topology-based matching algorithm for fingerprint authentication. In: *Proceedings. 25th Annual 1991 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology*. 1991, s. 84–87.
- [10] CHUGH, T., CAO, K. a JAIN, A. K. Fingerprint Spoof Buster. 2017.
- [11] DESHMUKH, U. *Utkarsh-Deshmukh/Fingerprint-Enhancement-Python*. Feb 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://github.com/Utkarsh-Deshmukh/Fingerprint-Enhancement-Python>.

- [12] DRAHANSKY, M. *Hand-based biometrics : methods and technology*. First published. London: The Institution of Engineering and Technology, 2018. IET book series in advanced biometrics. ISBN 978-1-78561-224-4.
- [13] DRAHANSKÝ, M. *Biometrie*. 1. vyd. Brno: M. Drahanský, 2011. ISBN 978-80-254-8979-6.
- [14] DRAHANSKÝ, M. *Fingerprint recognition technology*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. ISBN 978-3-844-33007-6.
- [15] EYUNG, L., XUDONG, J. a WEIYUN, Y. Fingerprint quality and validity analysis. In: *Proceedings. International Conference on Image Processing*. 2002, sv. 1, s. I–I.
- [16] FBI. *IAFIS*. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20120921125141/http://www.fbi.gov/about-us/cjis/fingerprints_biometrics/iafis/iafis/.
- [17] HONG, L., WAN, Y. a JAIN, A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. IEEE. 1998, sv. 20, č. 8, s. 777–789. ISSN 0162-8828.
- [18] HRISTO, A. Finger Print Orientation Field. *Finger Print Orientation Field*. Dostupné z: <http://hristoalexiev.blogspot.com/p/computer-vision.html>.
- [19] JAIN, A., PRABHAKAR, S., HONG, L. et al. FingerCode: A filterbank for fingerprint representation and matching. In: Leden 1999, sv. 2, s. 193 Vol. 2. ISBN 0-7695-0149-4.
- [20] JAIN, A. K., BOLLE, R. M. a PANKANTI, S. *Biometrics: personal identification in networked society*. 1999. 2nd Print. Springer Verlag, 2002. ISBN 0387285393.
- [21] KANICH, O., DRAHANSKY, M. a MEZL, M. Use of creative materials for fingerprint spoofs. In: *2018 International Workshop on Biometrics and Forensics (IWBF)*. IEEE, 2018, s. 1–8. ISBN 9781538613665.
- [22] KARNOWSKI, J. Detection Error Tradeoff (DET) curves. Sep 2015. Dostupné z: <https://jeremykarnowski.wordpress.com/2015/08/07/detection-error-tradeoff-det-curves/>.
- [23] LI, S. Z. a JAIN, A., ed. Fingerprint Quality. In: LI, S. Z. a JAIN, A., ed. *Encyclopedia of Biometrics*. Boston, MA: Springer US, 2009, s. 509–509. ISBN 978-0-387-73003-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_949.
- [24] LINDOSO, A., ENTRENA, L., LIU JIMENEZ, J. et al. Correlation-Based Fingerprint Matching with Orientation Field Alignment. In: LEE, S.-W. a LI, S. Z., ed. *Advances in Biometrics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, s. 713–721.
- [25] LIŠKOVÁ, P. *Daktyloskopie*. ADOC.TIPS [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://adoc.tips/daktyloskopie-identifikaci-mrtvol-nezname-totonosti-pokud-je.html>.
- [26] MALTONI, D., MAIO, D., JAIN, A. K. et al. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York, NY: Springer New York, 2003. Springer Professional Computing. ISBN 9780387215877.

- [27] MARCEL, S., LI, S. Z. a NIXON, M. S. *Handbook of Biometric Anti-Spoofing: Trusted Biometrics under Spoofing Attacks*. 2014. vyd. London: Springer London, 2014. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. ISBN 9781447165231.
- [28] MATSUMOTO, T., MATSUMOTO, H., YAMADA, K. et al. Impact of Artificial "Gummy" Fingers on Fingerprint Systems. *Datenschutz und Datensicherheit*. Duben 2002, sv. 26.
- [29] MCMILLAN, P. Local Correlation-based Fingerprint Matching. *SlideServe*. Nov 2014. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/phelan-mcmillan/local-correlation-based-fingerprint-matching>.
- [30] MILLER, W. *The Social History of Crime and Punishment in America*. SAGE Publications, 2012. SAGE reference. ISBN 9781412988766. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=tYME6Z35nyAC>.
- [31] NANDAKUMAR, K. a JAIN, A. Local Correlation-based Fingerprint Matching. In: 2004, s. 503–508.
- [32] NOVÁK, V. *Leptání plošného spoje v domácích podmínkách*. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://blog.venca-x.cz/leptani-plosneho-spoje-v-domacich-podminkach/>.
- [33] ORAVEC, T. *Metodika měření kvality otisků prstu*. Brno, CZ, 2018. Diplomová práce.
- [34] PACKARD, K. *Your Life Purpose is in Your Fingerprints*. Dec 2019 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://academyofhandanalysis.org/your-life-purpose-is-in-your-fingerprints/>.
- [35] PRECISION MICRO. *Chemical Etching Process: How Chemical Etching Works*. Mar 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.precisionmicro.com/the-photo-etching-process/>.
- [36] RIBEIRO, C. S., LEAL, F. a JEUNON, T. *Skin Anatomy, Histology, and Physiology*. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-20250-1.
- [37] RIEDEL, J. *Chemické frézování přesné leptání kovových materiálů*. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:5157/chemicke-frezovani-presne-leptani-kovovych-materialu>.
- [38] ROOK, A. *Rook's Textbook of Dermatology*. SAGE Publications, 2012. ISBN 9781412988766.
- [39] RUTTKAY, M. *Biometrická identifikace otisku prstu*. Brno, CZ, 2015. Bakalářská práce.
- [40] SANDIP, S. P. a ZOPE, P. H. Selective review of fingerprint enhancement, classification and matching techniques. In: *2015 IEEE Bombay Section Symposium (IBSS)*. 2015, s. 1–6.
- [41] SHAH, A. Through The Eyes of Gabor Filter. *Medium*. Medium. Jun 2018. Dostupné z: https://medium.com/@anuj_shah/through-the-eyes-of-gabor-filter-17d1fdb3ac97.

- [42] SIVARAM, M., YUVARAJ, D., MEGALA, G. et al. Biometric Security and Performance Metrics: FAR, FER, CER, FRR. In: *2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*. 2019, s. 770–772.
- [43] STRAUS, J. *Kriminalstická technika*. SAGE Publications, 2012. ISBN 9781412988766.
- [44] TABASSI, E. a WILSON, C. L. A novel approach to fingerprint image quality. In: *IEEE International Conference on Image Processing 2005*. 2005, sv. 2, s. II–37.
- [45] TABASSI, E. a GROTHOR, P. Fingerprint Image Quality. In: LI, S. Z. a JAIN, A., ed. *Encyclopedia of Biometrics*. Boston, MA: Springer US, 2009, s. 482–490. ISBN 978-0-387-73003-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_52.
- [46] TELGAD, R. a DESHMUKH, P. Computer Aided Technique for Finger Print Image Enhancement and Minutiae Extraction. *International Journal of Computer Applications*. Srpen 2013, sv. 75, s. 9–15.
- [47] TEWARI, R. K. a RAVIKUMAR, K. V. *History and development of forensic science in India*. SAGE Publications, 2012. ISBN 9781412988766.
- [48] TUČ, D. *Testování vlivů prostředí na snímače otisků prstů*. Brno, CZ, 2005. Bakalářská práce.
- [49] WILSON, C. L. a WATSON, C. I. Fingerprint Image Quality. *Fingerprint Image Quality*. Dostupné z: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=905710.
- [50] YOON, S., FENG, J. a JAIN, A. K. Altered Fingerprints: Analysis and Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2012, sv. 34, č. 3, s. 451–464.
- [51] ZHAO, D., SU, F. a CAI, A. A Hierarchical Fingerprint Matching Method Based on Rotation Invariant Features. In: *Advances in Biometric Person Authentication: 5th Chinese Conference on Biometric Recognition, SINOBIOOMETRICS 2004, Guangzhou, China, December 13-14, 2004. Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, sv. 3338, s. 498–505. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 9783540240297.
- [52] ZKTECO. *ZK9500*. Jul 2019 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://zkteco.eu/products/biometrics/usb-scanner/zk9500>.