



**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 Z RŮZNÝCH  
MATERIÁLŮ**

ANALYSIS OF FINGERPRINT SPOOFS MADE FROM VARIOUS MATERIALS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**VLADIMÍR SLÁMA**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ONDŘEJ KANICH, Ph.D.**

BRNO 2020

## Zadání bakalářské práce



Student: **Sláma Vladimír**  
Program: Informační technologie  
Název: **Analýza falzifikátů otisků prstů z různých materiálů**  
**Analysis of Fingerprint Spoofs Made from Various Materials**  
Kategorie: Bezpečnost

### Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se falzifikátů otisků prstů a biometrického rozpoznávání podle otisků prstů. Soustřeďte se na metody a postupy tvorby falzifikátů.
2. S využitím různých vhodných materiálů vytvořte sadu falzifikátů otisků. Falzifikáty nasnímejte s využitím dostupných senzorů (např. SecuGen, DinoLite).
3. Navrhněte metodu analýzy rozdílů mezi zdrojovým otiskem prstu a nasnímaného falzifikátu.
4. Implementujte navržený algoritmus z předchozího bodu.
5. Otestujte algoritmus z předchozího bodu na vytvořené databázi otisků z bodu 2. Pomocí vhodného algoritmu na zjištění kvality otisků prstů (např. Neurotechnology VeriFinger, NFIQ) dále analyzujte kvalitu falzifikátů.
6. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná rozšíření Vašeho řešení.

### Literatura:

- Dražanský, 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., Dražanský, 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.

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

Vedoucí práce: **Kanich Ondřej, Ing., Ph.D.**  
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.  
Datum zadání: 1. listopadu 2019  
Datum odevzdání: 28. května 2020  
Datum schválení: 31. října 2019

## Abstrakt

Tato práce se zabývá tvorbou falzifikátu otisků prstů z různých materiálů a dále návrhem a implementací algoritmu, který je analyzuje. Výroba je zaměřena především na falzifikáty vytvořené pomocí odlití z desky plošných spojů (DPS) či jiných forem. Pro tvorbu falzifikátů byly použity tyto materiály: Herkules, plastelína, Funny gummy, vosk, Moody putty a tekutý latex. Pro analýzu rozdílů mezi falzifikáty a reálnými otisky je použit Harrisův detektor a následný výpočet skóre neshody je proveden na základě nalezených bodů zájmu. Výsledky jsou porovnány s komerčním softwarem VeriFinger, který umí vypočítat míru shody dvou vzorků, přičemž ve většině případů se trend výsledků navrženého algoritmu s VeriFingerem shoduje.

## Abstract

The goal of the work is production of fingerprint spoofs from various materials and development of algorithm, that analyzes them. Production of fingerprint spoofs is based on casting using printed circuit board (PCB) and other molds. For fingerprint spoofs these materials were used: Herkules, plasticine, Funny gummy, wax, Moody putty and liquid latex. For analysis of the differences between spoof and the real fingerprint Harris detector was used and then the difference score is counted based on points of interests found. Results are compared with evaluation from VeriFinger software, that can measure matching score of two fingerprints. In most of the cases, the results have same trends when compared.

## Klíčová slova

otisky prstů, falzifikáty otisků prstů, výroba falzifikátů otisků prstů, senzory otisků prstů, Gaborův filtr, Harrisův detektor, analýza otisků prstů

## Keywords

fingerprint, fingerprint spoofs, production of fingerprint spoofs, fingerprint sensors, Gabor filter, Harris detector, fingerprint analysis

## Citace

SLÁMA, Vladimír. *Analýza falzifikátů otisků prstů z různých materiálů*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich, Ph.D.

# Analýza falzifikátů otisků prstů z různých materiálů

## Prohlášení

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

.....

Vladimír Sláma

28. května 2020

## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce doktoru Kanichovi za cenné rady a připomínky a za odbornou pomoc při psaní této práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Otisky prstů</b>	<b>3</b>
2.1	Kůže . . . . .	4
2.2	Vlastnosti papilárních linií . . . . .	6
2.3	Snímače otisků prstů . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Falzifikáty otisků prstů</b>	<b>11</b>
3.1	Metody tvorby falzifikátů otisků prstů . . . . .	11
3.2	Poškození otisků prstů pocházejících z falzifikátů . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Techniky zpracování obrazu</b>	<b>15</b>
4.1	Proces rozpoznání otisků prstů . . . . .	15
4.2	Detekce význačných bodů . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Tvorba databáze falzifikátů</b>	<b>21</b>
5.1	Výběr vhodných metod výroby . . . . .	21
5.2	Snímače použité v této práci . . . . .	21
5.3	Výroba pomocí odlitků . . . . .	23
5.4	Výroba pomocí leptání . . . . .	24
5.5	Snímání databáze . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Algoritmus analýzy rozdílů</b>	<b>33</b>
6.1	Návrh algoritmu . . . . .	33
6.2	Implementace algoritmu . . . . .	35
<b>7</b>	<b>Vyhodnocení</b>	<b>40</b>
7.1	Vyhodnocení vytvořených falzifikátů . . . . .	40
7.2	Vyhodnocení algoritmu . . . . .	44
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>46</b>
	<b>Literatura</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Obsah příloženého média</b>	<b>50</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Otisky prstů jsou díky své jedinečnosti jednou z nejpoužívanějších metod při autentizaci uživatele v biometrických systémech a zároveň jedním z klíčových prostředků při odhalování kriminální činnosti. Každý zdravý člověk je vybaven svojí jedinečnou sadou vzorů, kterou si nosí na svých prstech, na dlaních a na chodidlech. Touto sadou je vybaven od doby před narozením až do smrti. Tyto vzory se nazývají papilární linie a jsou po celý život prakticky neměnné. Jejich projekce v podobě daktyloskopických stop (nebo také otisků prstů) zanecháváme prakticky na všech místech a předmětech, kterých se dotýkáme. Díky papilárním liniím a současným moderním technologiím jsme schopni velmi rychle prokázat naši totožnost před počítačem, mobilním telefonem, nebo si odemknout dveře či nastartovat automobil.

S rozmachem takových metod, které jsou schopny nás jednoznačně identifikovat, se najde vždy snaha, jak tuto jednoznačnost podkopat, nebo narušit. Existují proto techniky, které mají za cíl zanechat daktyloskopické stopy na místě, na kterém se dotyčná osoba nenacházela a stejně tak existují i techniky, jak autentizovat i neoprávněnou osobu ke vstupu do nějakého z výše popsaných systémů. Je známo několik způsobů, jak si obstarat a vyrobit falešný obraz papilárních linií jiného člověka, ovšem každá z těchto metod s sebou nese jistá úskalí, která si v následujících kapitolách popíšeme. Tyto modely papilárních linií v závislosti na vlastnostech jednotlivých materiálů, ze kterých jsou vyrobeny, a také v závislosti na kvalitě prostředků, s jejichž pomocí byly získány, vykazují určité rysy a poškození průběhu papilárních linií, které se na zdravých prstech, ani na jejich otiscích neobjevují. Cílem práce je tvorba databáze falzifikátů otisků prstů z vybraných materiálů, neboť jde o problematiku nedostatečně prozkoumanou, ale velmi důležitou. Práce se též zabývá tvorbou algoritmu pro analýzu této nasnímané databáze.

V druhé kapitole se seznámíme s otisky prstů z obecného pohledu, s jejich vlastnostmi, třídami otisků prstů, k čemu a jak se obvykle využívají. Ve třetí kapitole se seznámíme s falzifikáty otisků prstů. Představíme si obecné postupy a principy, jak je vyrobit a ukážeme si vlastnosti (poškození), které otisky prstů vykazují a proč. Ve čtvrté kapitole jsou vysvětleny techniky zpracování obrazu, které se v souvislosti s otisky prstů běžně používají. Pátou kapitolou začíná praktická část a samotné jádro této práce. Popíšeme si vybrané metody a materiály, které byly použity k tvorbě databáze falzifikátů otisků prstů. Představíme si senzory otisků prstů a jejich fyzikální vlastnosti. V šesté kapitole si blíže popíšeme algoritmus, který byl použit k analýze nasnímané databáze. Sedmá kapitola pojednává o vyhodnocení vytvořené databáze falzifikátů a o vyhodnocení použitého algoritmu. Osmou kapitolou je závěr, který shrnuje výsledky, kterých bylo v této práci dosaženo.

## Kapitola 2

# Otisky prstů

Než se začneme zabývat falzifikáty otisků prstů a jejich analýzou, je potřeba se seznámit s problematikou otisků prstů obecně, jejich vlastnostmi a důvodem proč vznikají.

Otisk prstů (též daktyloskopická stopa) je kresba vytvořená projekcí papilárních linií, kterou lidé zanechávají na předmětech, kterých se dotkli nebo je drželi v ruce. Tato skutečnost se v dnešní době velmi hojně využívá při odhalování trestné činnosti, neboť daktyloskopické stopy se mohou nacházet na nejrůznějších místech, souvisejících s trestnou činností: [15]

- Typicky například na dveřích, oknech, stěnách a jiných částech, které tvoří celkové prostředí ve kterém k trestnému činu došlo.
- Na nástrojích, prostředcích či zbraních, které byly použity k provedení trestného činu (páčidlo, kleště, dopravní prostředek, písemnost, střelná zbraň apod.).
- Na odcizených věcech.
- Na těle osoby, která se stala předmětem útoku. Tyto daktyloskopické stopy, obzvlášť pokud jsou zanechány na přeživší osobě, mají poměrně krátkou životnost. Tato osoba rovněž svými potními žlázami vylučuje pot, který původní stopu odstraní. U zemřelých osob jsou pak daktyloskopické stopy výrazně trvalejšího charakteru, neboť mrtvé tělo nevylučuje pot.
- Na věcech pachatele, kde se naopak mohou nacházet otisky oběti.

Dále se otisky prstů běžně používají k autentizaci uživatele. Například v podobě čteček otisků prstů u dveří, kdy uživatel přiloží prst na čtečku a tato porovná otisk se svou databází otisků prstů, které jsou způsobilé ke vstupu. Podobný princip je využit při autentizaci uživatele například u mobilního telefonu, nebo počítače.

Otisky prstů jsou na předmětech zanechávány z důvodu přítomnosti papilárních linií a potních žláz. Papilární linie jsou útvary přítomné na prstech, dlaních a chodidlech. Vyskytují se pouze u člověka a některých primátů a mají podobu vyvýšených reliéfů. Základem oboru, který se zabývá otisky prstů – daktyloskopie, jsou tři daktyloskopické zákony [4] [9] [15] [16]:

- **Jedinečnost** – na světě neexistují dva lidé, kteří by měli totožnou strukturu papilárních linií. Dosavadní kriminalistická praxe i matematika tento zákon potvrzuje. Možných kombinací tvarů papilárních linií může existovat v řádu vysokých desítek

miliard, což znamená, že pravděpodobnost výskytu dvou naprosto stejných tvarů papilárních linií je blízká nule. Dokonce i jednovaječná dvojčata, která mají shodnou DNA jsou nositeli různých papilárních linií na svých prstech a dlaních.

- **Neměnnost** – Papilární linie se v průběhu života nemění. U jedinců se vytvářejí ještě před narozením, přibližně v 7. měsíci vývoje plodu. S výjimkou kožních onemocnění a poškození zůstávají prakticky neměnné, pouze se zvětšují (ovšem relativní vzdálenost markantů, jejich skladba a sled zůstávají stále stejné). Kůže v pokročilém věku může též vrásnět.
- **Trvalost** – Jelikož je horní vrstva kůže neustále obnovována, nelze papilární linie příliš snadno odstranit nebo poškodit. Trvalé poškození vzniká až v důsledku poškození zárodečné vrstvy kůže, což je poměrně drastický zákrok.

Pot je v důsledku přítomnosti potních žláz na papilárních liniích vytvářen prakticky neustále, byť v malém množství. Proto když se osoba dotkne předmětu, nebo jiné osoby, zanechá na těchto stopu potu, vytvarovanou podle přítomných papilárních linií. [15]

Kromě zanechání potních stop existují ovšem i jiné způsoby, jak mohou vznikat daktyloskopické stopy. Jedním z nich je vtisknutí reliéfu papilárních linií přímo do látek, či materiálů, které jsou schopny plastické deformace tlakem. Dále do materiálů, které mění své fyzikální vlastnosti vlivem teploty (čokoláda, parafin, máslo), případně do látek, které jsou měkké a po vtisknutí reliéfu tvar zachovají (pečetní plastelína, keramická hlína). Celá skupina těchto stop se nazývá pojmem *plastické daktyloskopické stopy*. [15]

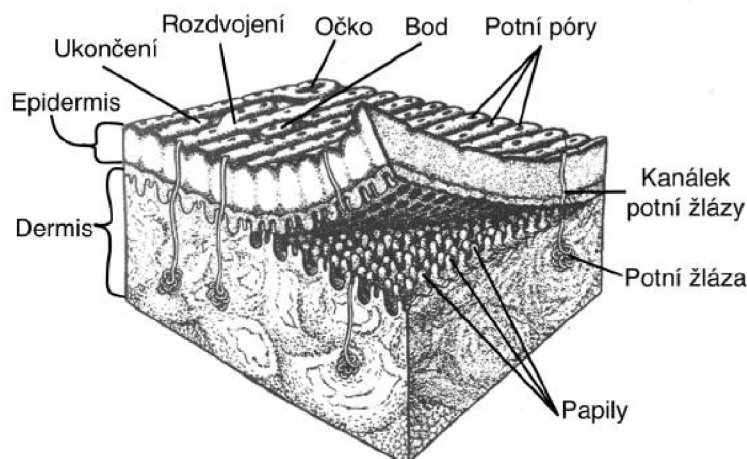
Další možností, jak může vzniknout daktyloskopická stopa je, že se na papilární linie přenesou látka z povrchu daného předmětu, či materiálu a tím dojde k porušení povrchové struktury onoho materiálu. To lze pozorovat například u lepicí pásky, kde se působením vlhkosti může malé množství lepu rozpustit a zůstat na vyvýšeninách papilárních linií. Stejným principem může vzniknout otisk též na jiných látkách a površích, které mají lepicí vlastnosti. Jde například o krev, nátěr barvy, lepidla a další. Tyto stopy se nazývají *odvrstvené daktyloskopické stopy*. [15]

Posledním druhem otisků z tohoto hlediska jsou stopy vzniklé v důsledku zmíněné předchozí daktyloskopické stopy. Tedy že na papilárních liniích ulpí látka, která je posléze přenesena jinam a pokud byl látky dostatek, zanechá *navrstvený otisk* papilárních linií na místě. [15]

## 2.1 Kůže

Abychom mohli do dané problematiky proniknout ještě více, je vhodné si představit i problematiku samotné kůže z hlediska biologického. Kůže plní několik pro lidské tělo zásadních funkcí a skládá se z několika vrstev o kterých si nyní povíme více.





Obrázek 2.1: Řez kůží na prstu (převzato z [4]).

### 2.1.1 Pokožka (epidermis)

Hlavní funkcí pokožky je, aby tvořila pevnou a odolnou bariéru před vnějšími vlivy. Pokožka se neustále obnovuje a je tvořena z pěti vrstev. Nejspodnější vrstvou je *bazální* (též spodní) vrstva epidermis (*stratum basale*), ve které se neustále vytvářejí nové buňky kůže a jsou dále posouvány k vyšším vrstvám.

Společně s vrstvou *ostnitých buněk* (*stratum spinosum*) vytvářejí tzv. *zárodečnou vrstvu* (*stratum germinativum*). Vrstva ostnitých buněk získala svůj název podle ostnů, které se nacházejí na buňkách. Tyto ostny mají za cíl zabránit vniknutí bakterií.

Ostnité buňky dále ztrácejí své ostny ve *vrstvě zrnitých buněk* (*stratum granulosum*) a stávají se plošší. Zaniká zde jádro, dochází k vytváření proteinu *keratinu* a jsou zde rozlišitelné malé známky rohovatění. Následuje *vrstva jasných buněk* (*stratum lucidum*), která slouží k ochraně. Nachází se pouze na dlaních rukou a na chodidlech. Je tvořena zploštělými a značně zrohovatělými buňkami bez patrných jader. Vrstva sestávající z odumřelých buněk se nachází na samém vrcholu, vně a má přímý kontakt s okolím. Nazývá se *rohová*, nebo *zrohovatělá vrstva* (*stratum corneum*) a buňky jsou zde připraveny postupným odpadáváním (loupáním) opustit kožní systém. [2] [4]

### 2.1.2 Škára (dermis)

Škára je nejtlustější vrstva kůže, vznikají zde právě papilární linie, které se pak promítají do vrstev epidermis. Jak již bylo zmíněno výše, pokud dojde k hlubokému poškození, nebo popálení, budou papilární linie poškozeny. Aby bylo možné poškodit papilární linie trvale, je potřeba narušit rozhraní zárodečné vrstvy kůže a škáry. Nicméně jizvy, které takto vzniknou, zůstanou trvale mezi papilárními liniemi a budou mít také svůj charakteristický tvar, pomocí kterého půjde prst identifikovat. Díky škáře a přítomnosti elastanu a kolagenu je kůže pružná a odolná.

Škára rovněž obsahuje tzv. *kapiláry*, což jsou malé žilky a nervová zakončení, díky kterým vnímáme bolest, teplo a chlad. S rostoucím věkem škára ztrácí svou původní pružnost. [2]

### 2.1.3 Podkožní vazivo (tela subcutanea)

Nejhlubší vrstva kůže, která je tvořena řídkým vazivem a tukem. Tvoří izolační vrstvu, další ochrannou vrstvu a v neposlední řadě si v tukové vrstvě tělo ukládá přebytky energie. Z hlediska otisků prstů nejméně důležitá vrstva. [2]

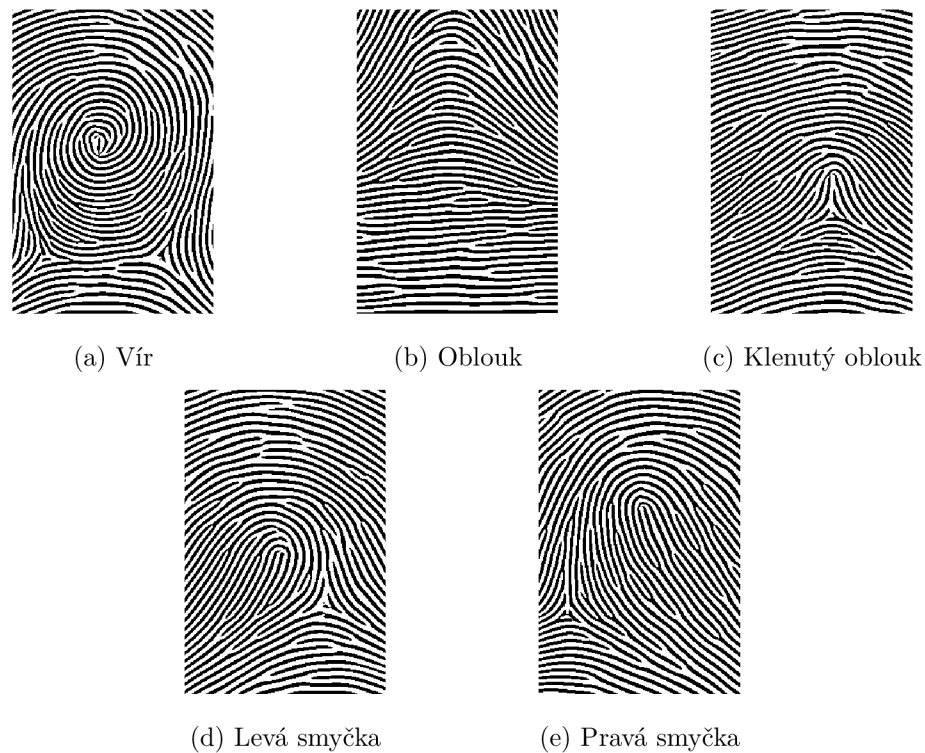
## 2.2 Vlastnosti papilárních linií

Papilární linie, jak už bylo zmíněno výše, jsou malé reliéfy, které mají výšku 0,1-0,4 mm a šířku 0,2-0,7 mm. Vystouplé linie se nazývají *vyvýšeniny* a mezery mezi nimi se nazývají *prohlubně*. [4] [15]

### 2.2.1 Klasifikace

Otisky prstů lze rozřazovat do kategorií podle vlastností, které jednotlivé otisky vykazují. Tento systém rozřazování se nazývá klasifikační systém. Hlavním důvodem jeho vzniku byla potřeba nemuset prohledávat celou databázi otisků, pokud je hledána shoda mezi nalezenou stopou a právě touto databází. Tyto databáze mohou obsahovat i několik milionů vzorků a najít v nich shodu, porovnáváním se všemi by bylo prakticky nemožné. Proto je vhodné stanovení menších skupin, do kterých lze jednotlivé otisky v databázi, a poté i posuzované stopy, rozřadit. Tyto skupiny se nazývají třídy. Počet tříd, do kterých se otisky dělí se různí. Původní Galton-Henryho klasifikace dělila otisky prstů do tří tříd a to oblouk, smyčka a vír. Rozšířená Galton-Henryho klasifikace, která se v současnosti používá nejhojněji, dělí otisky do těchto pěti tříd [4] [15]:

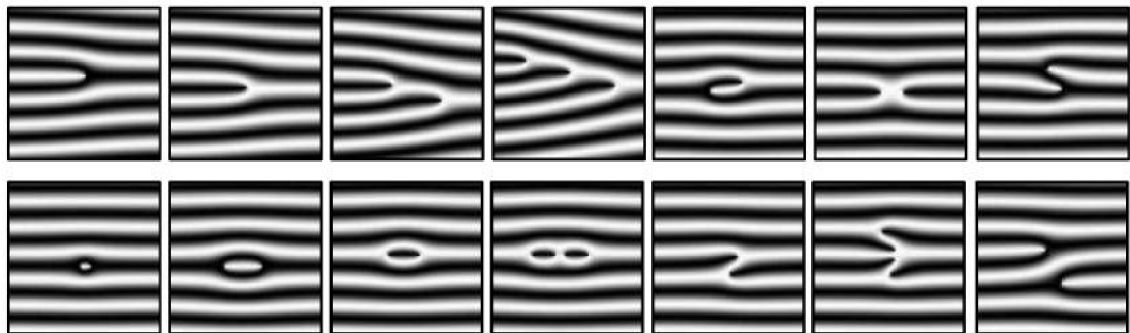
- Oblouk (obr. 2.2a),
- klenutý oblouk (obr. 2.2b),
- vír (obr. 2.2c),
- levá smyčka (obr. 2.2d),
- pravá smyčka (obr. 2.2e).



Obrázek 2.2: Třídy otisků prstů.

### 2.2.2 Markanty

Poté, co je porovnávaný otisk zařazen do třídy, je už databáze, ve které se hledá shoda, výrazně menší. Samotné prohlášení za shodu je možné uskutečnit až na základě *lokálně významných bodů*, tzv. *markantů*. Za markant lze považovat jakoukoliv změnu v průběhu papilární linie. Na základě jejich přítomnosti, rozmístění a velikosti se otisky prstů identifikují. Markantů je poměrně velké množství – řádově několik desítek, ale pro úvod do problematiky stačí představit základní typy. Ty další jsou pak odvozeny z těchto základních typů. Na obrázku 2.3 je přehled čtrnácti základních typů markantů. Zleva horní řádek: *ukončení*, *jednoduchá vidlička / rozdvojení*, *dvojitá vidlička*, *trojitá vidlička*, *hák*, *křížení*, *boční kontakt*; dolní řádek: *bod*, *interval*, *jednoduchá smyčka*, *dvojitá smyčka*, *jednoduchý most*, *dvojitý most*, *průsečná linie*. [4] [15]



Obrázek 2.3: Přehled základních typů markantů (převzato z [4]).

U běžných přístupových systémů se používají k identifikaci pouze dva typy markantů a to ukončení a vidlička. Důvod je ten, že detekce těchto jednoduchých tvarů je především výpočetně jednoduchá. Při vyhledávání složitějších markantů by neúměrně narůstala výpočetní náročnost, což je nežádoucí.

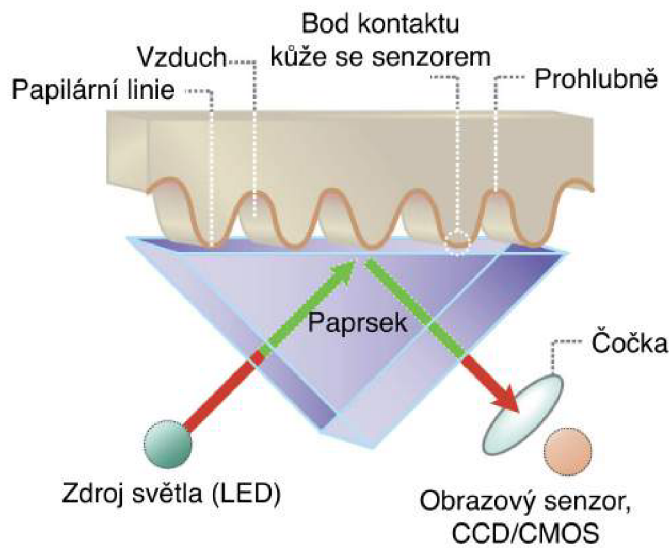
## 2.3 Snímače otisků prstů

V biometrických systémech (přístupová zařízení, mobilní telefony, laptopy) používáme pro sejmутí otisku prstu snímače otisků prstů. Jediný případ, kde stále převládá použití starších technologií, jsou daktyloskopické karty, které se později načítají do elektronické podoby pomocí scanneru. Rozlišení snímačů se pohybuje od 250 po 1000 ppi a snímací plocha by podle FBI měla být alespoň  $1 \times 1$  palec (1 palec = 2,54 cm), standardně je však menší. Snímač otisků prstů na mobilním telefonu iPhone 6 je kruhovitý, má průměr přibližně 9 mm a má rozlišení 500 ppi. Daktyloskopické systémy pro uložení rolovaných otisků pak mohou mít až  $10 \times 6$  cm. Počet bitů pro zakódování barvy je u šedotónových snímků obvykle 8 bitů, ale existují i 3 bitové senzory. Další parametry, které nás u snímačů zajímají jsou geometrická přesnost (míra geometrického zkreslení sejmутého otisku oproti skutečnosti) a kvalita obrazu. [2] [3] [4]

Jak už bylo výše zmíněno, existuje spousta parametrů, podle kterých lze vybrat správný senzor. Technologií, které se pro snímání používají je celá řada a další dále vznikají. Následuje přehled nejpoužívanějších a nejznámějších. K dalším novějším technologiím se pak například řadí technologie E-field, či MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). [2] [3] [4]

### 2.3.1 Optická technologie

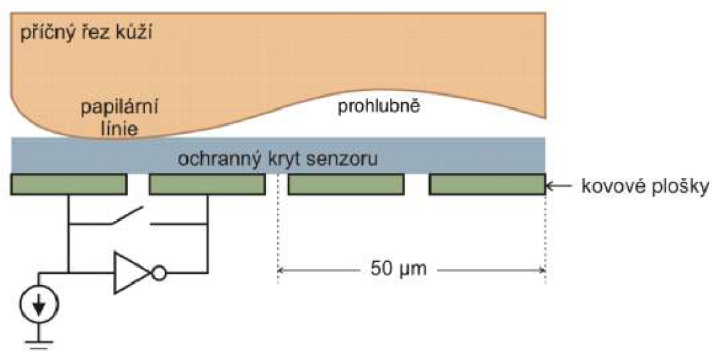
Jeden z nejjednodušších principů, jak lze otisk sejmout. Zdroj světla, typicky LED, osvětluje povrch prstu, který je přiložen na krycí sklo senzoru a kamera pak obraz nasnímá. Existují i bezkontaktní optické senzory, které dokážou sejmout trojrozměrný obraz. V případě náhrady krycího skla průhledným válečkem získáme optický průtahový senzor. Princip funkce optického senzoru znázorňuje obrázek 2.4. Nevýhodou optických senzorů je jejich zástavbová velikost, i když v tomto ohledu v posledních letech díky moderním technologiím udělaly tyto senzory značný pokrok. Ještě v devadesátých letech minulého století mohl takový senzor mít  $15 \times 8 \times 15$  centimetrů, dnes se bavíme třeba o rozměrech  $5 \times 2 \times 5$  centimetrů, nicméně pro zástavbu do mobilního zařízení je taková senzor stále nevhodný. Výhodami optických senzorů pak jsou cena, přijatelné rozlišení a velikost snímací plochy. [2] [3] [4] [14]



Obrázek 2.4: Znázornění optické technologie snímačů otisků prstů (převzato z [14]).

### 2.3.2 Kapacitní technologie

U kapacitní technologie se senzor skládá z 2D pole malých vodivých plošek (okolo 100 000 na jednom senzoru), na kterých je nalepena vrstva oxidu křemičitého, která zároveň kryje a zároveň slouží jako dielektrikum. Hustota těchto plošek musí být větší než hustota papilárních linií. Přiložením prstu vzniknou nad plochami těchto plošek kondenzátory, jednou elektrodou se stává papilární linie prstu v místě dotyku a druhou elektrodou je ploška, které se papilární linie dotýká. Výsledkem je hodnota, která odpovídá překryvu plochy vodivé plošky. V závislosti na vzdálenosti vznikají místa s různou kapacitou (podle papilárních linií) a z nich je pak tvořen obraz. Princip fungování kapacitních senzorů lépe znázorňuje obrázek 2.5. Výhodou kapacitních senzorů je jejich zástavbová velikost, je proto vhodné je použít například u mobilních telefonů a laptopů. Na druhou stranu není možné mít kapacitní senzor s větší plochou. Zde může být otázkou, zda je snímací plocha dostatečná k jednoznačné identifikaci jedince. [2] [3] [4] [14]



Obrázek 2.5: Znázornění kapacitní technologie snímačů otisků prstů (převzato z [14]).

### 2.3.3 Ultrazvuková technologie

Ultrazvukový senzor vysílá akustický signál proti prstu a zároveň přijímá vlny odražené z povrchu prstu. Rozdíl v kmitočtu mezi vlnami odraženými od papilárních linií a od údolí je užit ke změření vzdálenosti a tím k získání obrazu. Používané frekvence jsou od 20 kHz po několik GHz. Ultrazvukové senzory se vyznačují vysokou přesností, ale nejsou příliš rozšířené kvůli jejich vysoké ceně a velkým zástavbovým rozměrům. Navíc snímání trvá několik sekund a snímání je problematické při nízkých teplotách. [2] [3] [4] [14]

### 2.3.4 Elektrooptická technologie

Senzor založený na elektrooptické technologii sestává ze čtyř vrstev:

- Izolační vrstva,
- koaxiální vrstva,
- fosforová, světlo emitující vrstva,
- základní vrstva.

Přítlak prstu způsobí pomocí koaxiální vrstvy vyzařování světla ve fosforové vrstvě. Pod základní vrstvou se nachází optický senzor, který snímá výsledný obraz. [2] [3] [4] [14]

### 2.3.5 Tlaková technologie

Senzor sestává ze tří vrstev – dvě vodivé vrstvy oddělené jednou vrstvou nevodivou, typicky gelem. Papilární linie kladou vyšší tlak na horní vrstvu než prohlubně. To vede ke spojení obou vodivých vrstev v místech dotyku papilárních linií. Výsledkem jsou různé hodnoty proudu. Nevýhodou je nízká kvalita snímků. [2] [3] [4] [14]

### 2.3.6 Termická technologie

Termická technologie využívá faktu, že papilární linie vyzařují více tepla, než prohlubně mezi nimi. Pyroelektrická buňka snímá tepelné vyzařování a na základě teploty generuje příslušný proud. [2] [3] [4]

## Kapitola 3

# Falzifikáty otisků prstů

V této kapitole se seznámíme s falzifikáty otisků prstů a technikami, jak je vyrobit. Falzifikát otisku prstu je méně, či více zdařilá napodobenina papilárních linií na skutečném prstu, případně napodobenina celého prstu, nesoucí tyto papilární linie. Jako falzifikát otisku prstu lze rovněž označit stopa, která byla vytvořena touto napodobeninou papilárních linií. Pachatel si jej obvykle vytváří za účelem snahy zanechat otisky prstů nevinné osoby na místě činu. Může za tím být pokus o svalení viny na jinou osobu, vyhnutí se identifikaci, snaha o narušení vyšetřovacího procesu, nebo o neoprávněné vniknutí do biometrického systému. Je více způsobů, jak požadovaného efektu docílit. [1]

Dalším nežádoucím jevem, který se v souvislosti s otisky prstů vyskytuje je falšování důkazů, které je typicky spojeno s policisty. Nejde o vytváření falešných otisků prstů v pravém slova smyslu, nýbrž se obvykle spíše jedná o stopy záměrně odebrané na jiném místě bez interakce se skutečným původcem těchto otisků a posléze označené, jako odebrané na místě činu. V historii je známo několik takových případů. [1]

Obecně jsou však poměrně vzácné výše zmíněné případy, kdy se pachatel snaží zanechat cizí otisky na místě činu, neboť obvykle je pro pachatele prioritou především jejich vlastní nedopadení, kterého lze poměrně snadno dosáhnout nošením rukavic. Tím lze snadno zamezit zanechání otisků prstů na nežádoucím místě, neboť pot se přes např. latexové rukavice nedostane. [1]

### 3.1 Metody tvorby falzifikátů otisků prstů

Druhů falešných otisků je více. Liší se náročností výroby, cenou či kvalitou celkového výsledku. Především se však liší technikou, jakou byl získán originální obraz papilárních linií a jakou byl falzifikát vyroben. V současnosti nejzajímavější metodou je tisk falešných daktyloskopických stop na upravené inkoustové tiskárně, která dokáže tisknout náplní z aminokyselin. O tradičnějších metodách výroby falešných otisků prstů si povíme krátce v následujících řádcích. [1]

#### 3.1.1 Razítka

Na základě fotografie papilárních linií prstu, nebo daktyloskopické stopy, která byla někde zanechána, si lze nechat vyrobit razítko, které nese kopii papilárních linií prstu. Pro úspěšné použití této metody je potřeba zanechat i stopu potu, kterou obvykle papilární linie prstů vylučují, čehož se dá snadno docílit s pomocí potu z čela. Zanechané stopy ovšem vykazují jiné rozložení a množství potu, než je přirozené pro skutečný otisk prstu. [1]

### 3.1.2 Odlití kopírovaného prstu s následným zrcadlovým odlitím

Výhodou odlití je především rychlost opatření formy. Je zde však nutná přímá interakce subjektu. Tyto formy, vzhledem k použitým materiálům, často nejsou trvalé, ale slouží pouze pro tvorbu jednoho falzifikátu, pak je potřeba vyrobit novou formu. Principem této techniky je nejdříve si vyrobit formu, která nese zrcadlově převrácený tvar papilárních linií. Následně se podle této formy vytvoří odlitek prstu. Volba vhodného materiálu jak formy, tak odlitku má vliv na výslednou kvalitu vyrobených otisků. Vhodným materiálem pro výrobu odlitku je například bílé silikonové lepidlo, latex, želatina, vosk, nebo plastelína.

Pokud chceme vyrobit falešný otisk touto metodou a nemáme dostupný skutečný prst, máme situaci značně ztíženou. Nejdříve je nutné získat daktyloskopickou stopu skutečného prstu. Způsob, jak ji aplikovat v co nejvyšší kvalitě může být tisk na laserové tiskárně na folii a odlitek pak vyrobit z vhodného materiálu. [1]

### 3.1.3 Leptání

Leptání je metoda příbuzná s metodou předchozí (podkapitola 3.1.2). Nejdříve je nutné si opatřit snímek papilárních linií kopírovaného prstu. Ten je potřeba invertovat a vytisknout na průhlednou folii. Vytisknutá vrstva invertovaných papilárních linií zabrání expozici fotosenzitivní vrstvy ultrafialovému světlu. Exponovaná část je odleptána a na místě zůstane pouze obraz papilárních linií z mědi, který stejně, jako v předchozích technikách, použijeme jako formu pro odlití falešného prstu. [1]

Alternativně je možné nechat výrobu na profesionální firmě, která se zabývá výrobou desek plošných spojů. To nám zajistí vysokou kvalitu otisků. Ve chvíli, kdy je k dispozici deska, probíhá přenášení otisků podobně jako v případě odlití, ale máme zde daleko širší možnosti. Deska plošných spojů je totiž daleko odolnější. Díky tomu lze i poměrně vysokým tlakem aplikovat materiály a následně je přenést na požadované místo. [1]

### 3.1.4 Přenos daktyloskopické stopy z jednoho povrchu na jiný

Další známou technikou tvorby falešného otisku prstu, lépe řečeno tvorby výsledné falešné stopy, je přenesení samotné daktyloskopické stopy, která byla někde zanechána. Toho lze dosáhnout pomocí lepivého materiálu, jako je například lepící páska nebo daktyloskopická fólie, která je přímo určena ke snímání daktyloskopických stop. Na tento materiál stopu zachytíme a poté nanese na jiné místo. Při tomto zákroku se obvykle ztratí část potu i přenášené informace. Výsledky těchto pokusů proto nebývají příliš kvalitní. [1]

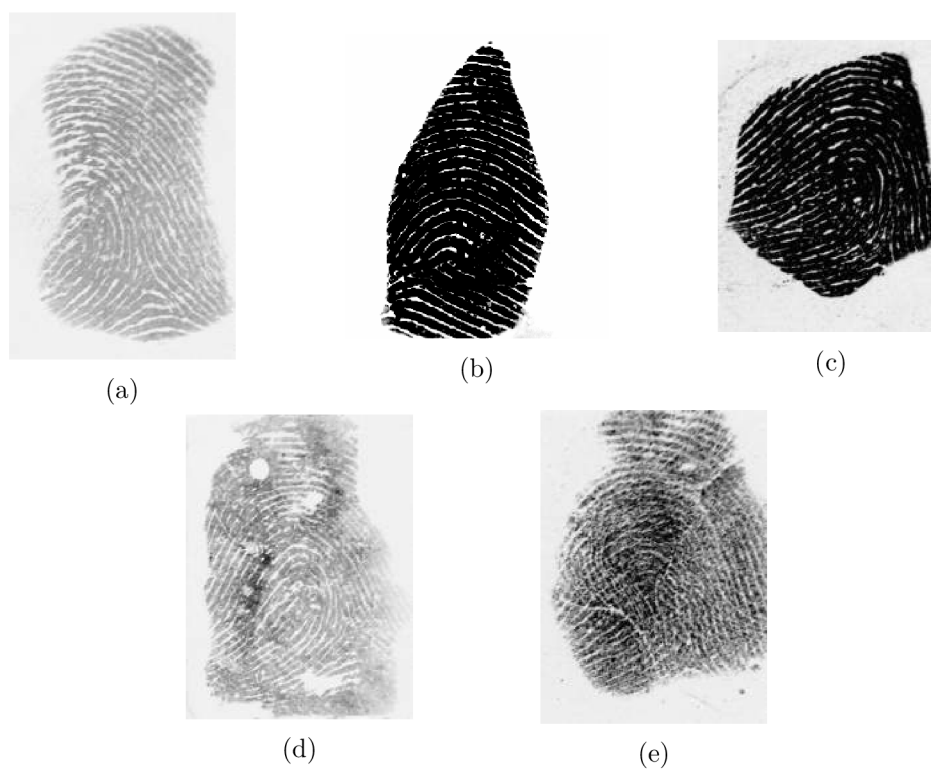
## 3.2 Poškození otisků prstů pocházejících z falzifikátů

Falešné otisky prstů zanechané falzifikátem vykazují znaky, které se u skutečných otisků prstů neobjevují. Obvykle vznikají z důvodu nedokonalosti materiálů, kterými se pachatel snaží tento otisk nanést. Pokud je na otisku prstu nalezen jeden, nebo více takovýchto znaků, je na zvážení, zda tento otisk prstu není falešný. Znaky, které falešné otisky vykazují jsou následující (obrázky často ukazují více znaků najednou, ale je vždy vybrán takový, u kterého je daný znak nejzřetelnější) [1]:



Hlavní znaky:

- Šum kolem samotného otisku v místech, kde se nenachází papilární linie (obrázek 3.1a).
- Celkový tvar otisku který neodpovídá přirozenému tvaru prstu (obrázek 3.1b).
- Ostrý obrys otisku, buď částečně, nebo po celém obvodu. Falešné papilární linie jsou na hranicích tohoto falešného otisku useknuty. Na hranicích pravého otisku prstu papilární linie pozvolna mizí (obrázek 3.1c).
- Chybějící část papilárních linií nebo části, které mají značně horší viditelnost ve srovnání s okolními liniemi (obrázek 3.1d).
- Rozmazané nebo zkreslené papilární linie v místech, kde to neodpovídá přirozenému tlaku prstu na povrch (obrázek 3.1e).



Obrázek 3.1: Hlavní znaky falzifikátů.

Zvláštní znaky pozorované na falešných otiscích (pokud je otisk dostatečně zřetelný):

- Vzduchové bubliny nebo jiné kazy, způsobené materiálem, kterým byl otisk nanesen. Volbou vhodných materiálů se pravděpodobnost výskytu tohoto znaku snižuje (obrázek 3.2a).
- Chybějící potní žlázy. Stejně jako u bodu výše – existují materiály s detailním rozlišením, které dokážou zreplikovat a přenášet i otisk malých potních žláz (obrázek 3.2b).

- Velmi úzké prohlubně ve srovnání s vyvýšeninami, nebo různá šířka v rámci jednoho otisku (obrázek 3.2c).



(a)



(b)



(c)

Obrázek 3.2: Zvláštní znaky falzifikátů.

## Kapitola 4

# Techniky zpracování obrazu

Abychom mohli s nasnímaným otiskem jakkoliv dále pracovat, je potřeba jej zpracovat a získat z něj informace, které pro další práci a analýzu s ním potřebujeme. Existuje více možných přístupů, jak s otiskem pracovat. Některé přístupy si v této kapitole představíme.

### 4.1 Proces rozpoznání otisků prstů

V současné době se otisky prstů prosadily jako nejpoužívanější metoda biometrického rozpoznávání. Důvodem je, že je uživateli široce akceptována. Otisky prstů mají také vysokou biometrickou entropii, tzn. jsou vhodné pro rozlišení velkého počtu uživatelů a technologie má poměrně vysokou spolehlivost. Navíc dnešní technologie dovolují mít snímače přijatelných rozměrů, které jsou buď externě připojeny, nebo jsou přímo součástí zařízení. Není problém mít zabudovanou čtečku otisků prstů přímo v mobilním telefonu, v čipové kartě, na externím paměťovém médiu, či na klice od dveří a na spoustě dalších míst. [4]

Existuje několik technologií, které umožňují snímání otisků prstů. Liší se v ceně, nárocích na zástavbu, dále například v rozlišení či v možnosti detekce živosti. Ta se používá k zamezení použití falzifikátů otisků prstů.

V biometrickém systému, který pracuje s otisky prstů se setkáváme se dvěma fázemi – fáze registrační a fáze verifikační. V registrační fázi uživatel typicky musí několikrát přiložit prst (případně protáhnout v případě průtahových čteček), aby vznikla co nejkvalitnější šablona. Při porovnávání stačí pouze jedno sejmutí, ale rozptyl výsledků může být poměrně velký a proces porovnávání proto není příliš jednoduchý a před samotným porovnáváním je potřeba otisk zpracovat, což zahrnuje několik fází, které jsou znázorněny na obrázku 4.1. [4]



Obrázek 4.1: Jednotlivé fáze zpracování otisku prstů (převzato z [4]).

Výsledné extrahované markanty identifikovaného otisku jsou s použitím vhodného algoritmu porovnávány s extrahovanými markanty z registrovaného otisku. Pro porovnání a analýzu otisků prstů se lze zaměřit i na jiné metody k nalezení klíčových bodů, které by například pro falzifikáty mohly být vhodnější, vzhledem k možnosti velkého poškození daných snímků. [4]

#### 4.1.1 Předzpracování

Nasnímaný otisk obvykle obsahuje šum a nežádoucí prvky, kterých je potřeba se co nejlépe zbavit. Za šum lze pokládat všechny nadbytečné prvky, které nemají vztah ke kresbě papilárních linií. Kvalita otisku prstů je dána způsobem kontaktu prstu (či falzifikátu) s plochou snímače otisků prstů a vnějšími vlivy, které při snímání panují. Uvedené prvky přímo ovlivňují výslednou kvalitu rozpoznávání otisků prstů. Cílem předzpracování otisků prstů je zvýraznit kresbu papilárních linií a odstranit nežádoucí šumy, aby bylo dále možné nalézt dané body zájmu. Jako předzpracování otisků prstů lze brát více technik. Mezi tyto se řadí převod snímku na šedotónový, normalizace, binarizace, Gaborova filtrace, či ztenčení. Tyto techniky mají za cíl vylepšení kvality daného otisku. [4] [15]

#### 4.1.2 Binarizace

Binarizace je základním krokem, který se používá téměř při každém zpracování otisků prstů, při tomto kroku se celý snímek převede pouze do dvou binárních hodnot (typicky černá a bílá), přičemž jedna je vyhrazena pro sjednocený odstín papilárních linií a druhá pro údolí mezi nimi. Pro získání binarizovaného snímku se obvykle používá techniky zvané prahování. Metoda je sama o sobě velmi jednoduchá a jejím principem je obvykle průchod celého snímku pixel po pixelu. Každý z nich se porovná se stanovenou prahovou hodnotou. Pokud je hodnota daného pixelu nad stanoveným prahem, je mu přidělena hodnota maximální (například 1, bílá) a pokud je hodnota daného pixelu pod daným prahem, je mu přidělena hodnota z minima (například 0, černá). Obrázek 4.2 znázorňuje demonstrační snímky po provedení binarizace s různě stanoveným prahem, srovnané s původním šedotónovým snímkem.



Obrázek 4.2: Ukázka prahování s různě stanoveným prahem, zleva doprava: původní šedotónový snímek, prahování s prahem 45, 80, 140 a 200.

Jak je z uvedených obrázků vidět, určený práh má velký vliv na to, které části zůstanou viditelné a které budou prahováním potlačeny. Při nevhodně zvoleném prahu může být celý snímek pouze černý, pouze bílý, případně může obsahovat pouze malé množství informace, které by bylo nedostatečné pro identifikaci klíčových bodů, či jakoukoliv jinou práci s otiskem. Situaci neulehčuje ani fakt, že otisk může mít po celé své ploše různý kontrast a hodnota prahu nemusí být pro každý nasnímaný otisk stejná. Existují proto metody, které podle různých principů mohou nastavit práh automaticky. Tyto metody dělíme do šesti různých kategorií: metody analýzy histogramu, metody shlukové analýzy, metody použití entropie, metody atributů objektu, prostorové metody a lokální metody, kde je práh určen na základě intenzity obrazu v dané lokalitě. [15] [19]

### 4.1.3 Gaborův filtr

Gaborův filtr je metoda, která nachází široké uplatnění v oboru počítačového vidění, zpracování obrazu a detekce hran, či objektů. Tato metoda je vhodná také pro vylepšování kvality otisků prstů. Užití se liší podle toho, jaké zvolíme parametry filtru a na jaký snímek jej aplikujeme. Pro použití s otisky prstů se hodí dvourozměrný Gaborův filtr. Ten sestává ze sinusoidní vlny konkrétní orientace a frekvence modulované Gaussiánskou obálkou. Tyto vlastnosti umožňují reakci na papilární linie konkrétní orientace a frekvence. Správně použitý filtr dokáže zachovat strukturu papilárních linií a zároveň snížit šum. Gaborův filtr je matematicky definován takto:

$$g(x, y, f, \theta_k, \delta x, \delta y) = \exp \left[ \frac{-1}{2} \left( \frac{x_{\theta_k}^2}{\delta_x^2} + \frac{y_{\theta_k}^2}{\delta_y^2} \right) \right] \cdot \exp(2\pi j f x_{\theta_k}) \quad (4.1)$$

$$x_{\theta_k} = x \cos \theta_k + y \sin \theta_k \quad (4.2)$$

$$y_{\theta_k} = -x \sin \theta_k + y \cos \theta_k \quad (4.3)$$

kde  $x_{\theta_k}$  je definovaná v rovnici 4.2 a  $y_{\theta_k}$  je definovaná v rovnici 4.3,  $x$  a  $y$  jsou souřadnice bodu v rámci Gaborova filtru,  $\theta_k$  je orientace Gaborova filtru (pro použití na otisk prstu stačí 0, 45, 90 a 135 stupňů,  $\delta_x$  a  $\delta_y$  jsou směrodatné odchylky Gaussiánské obálky vzhledem k ose  $x$  a ose  $y$ ,  $f$  je frekvence v bodě. Pomocí takto získaných filtrů, které jsou v tomto případě čtyři (dle úhlu  $\theta$ ), dostaneme konvolucí s normalizovaným snímkem 4 komponenty. Tyto po sloučení do jednoho snímku dávají výsledný snímek. Blíže si Gaborovu filtraci ukážeme v kapitole 6.2. [8] [15]

#### 4.1.4 Ztenčování

Ztenčování (někdy také skeletizace, či skeletonizace) je proces, kdy jsou linie šedotónového snímku postupně ztenčovány tak, že výsledná šířka všech linií je pouze 1 pixel. Jde o techniku používanou nejen u otisků prstů, ale například i u rozpoznávání písma. Typicky je pro správnou funkci metody vyžadován binární, nebo alespoň šedotónový snímek (záleží na návrhu konkrétní implementace). Algoritmů, které se na ztenčování používají je více a dělí se na iterativní a neiterativní. Iterativní metody analyzují samotné pixely a dále se dělí na sekvenční a paralelní. Mezi neiterativní postupy patří transformace podle středové osy objektu, sledování čáry a jiné.

Široce užívaná je metoda Zhang-Suen (viz [18]), která byla navržena už v roce 1984. Jde o metodu iterativní. Je význačná svojí robustností a existuje několik jejích modifikací. Úskalím metody je, že mohou vznikat falešené body zájmu v místech, kde původně nebyly. Lepší výsledek je možné zajistit, pokud před ztenčením provedeme filtraci snímku (například Gaborovým filtrem).

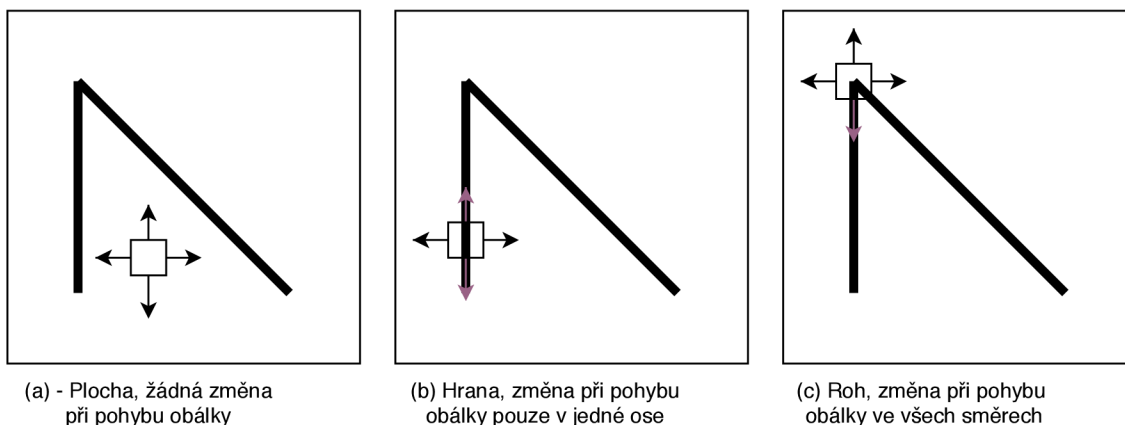
Metoda Zhang-Suen pracuje s černými pixely a jejich osmiokolím (matice  $3 \times 3$ , kde daný pixel je středový). Podle sousedních pixelů se dále rozhoduje, zda bude středový pixel bílý, nebo černý. Po projití celého snímku touto metodou dostaneme ztenčené linie o šířce 1 pixel. [15]

## 4.2 Detekce význačných bodů

Detekce význačných bodů je dalším krokem na cestě k analýze otisků prstů. Jedním z přístupů je nalézt markanty daného otisku a vytvořit jejich šablonu. Pomocí šablony pak lze snímky srovnat, či analyzovat. Markanty ovšem nejsou jediné význačné body, které lze na snímku nalézt. Dalším způsobem může být nalezení jádra a delty otisku, či detekce rohů, které by v případě použití s falzifikátem mohlo být vhodnější, neboť může lépe pracovat se vzniklými nepřesnostmi ve snímku.

### 4.2.1 Harrisův detektor

Harrisův detektor je v počítačovém vidění hojně užívaný algoritmus pro detekci hran, rohů, zarovnávání videa a sledování objektů. Byl navržen Chrisem Harrisem a Mikem Stephensem v roce 1988 jako úprava Moravcova detektoru rohů, který nebyl odolný proti šumu a byl závislý na natočení obrazu. Tyto nevýhody Harrisův detektor odstraňuje. Princip Harrisova detektoru je posun čtvercové obálky a sledování změny intenzity bodů v ní. Podle směrů, ve kterých dochází ke změně intenzity pak lze určit oblast v obraze. Obrázek 4.3 znázorňuje, jak Harrisův detektor funguje.

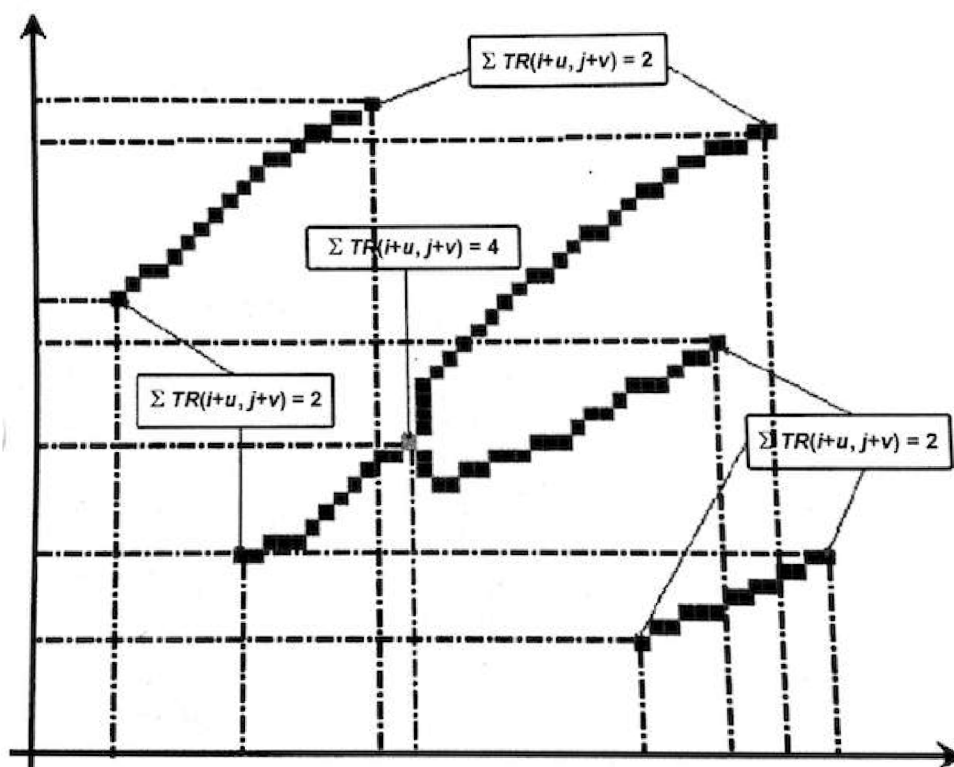


Obrázek 4.3: Znázornění principu funkce Harrisova detektoru.

Jsou zde zobrazeny různé druhy oblastí v obraze a šipky zjednodušeně naznačují směry pohybu obálky. Pokud budeme pohybovat obálkou na podobrázku (a), nedochází zde k žádné změně intenzity. Pokud budeme pohybovat obálkou na podobrázku (b), tak ke změnám intenzity dochází pouze v případě pohybu ve svislém směru. V případě podobrázku (c) a pohybu obálky ve směru vyznačených šipek dochází ke změnám intenzity ve všech směrech pohybu. Matematický základ těchto operací je blíže popsán přímo v článku autorů Harris a Stephense. [5] [7]

#### 4.2.2 Hongova metoda

Pro detekci markantů se používá metoda detekce papilárních linií dle Hongovy metody. Tato metoda využívá faktu, že papilární linie vůči sobě probíhají paralelně a maxima úrovně šedé dosahují uprostřed papilární linie. Otisk prstu je násoben dvěma maskami s navzájem posunutou fází o 180 stupňů, přičemž se zde detekují dva základní typy markantů, vidlička a ukončení (viz podkapitola 2.2.2). Zda jde o jeden, či druhý typ markantu lze určit výpočtem součtu bodů v okolí. Pokud je výsledek roven 2, jde o ukončení, pokud je výsledek 3 a více, jde o vidličku. Pro další práci se ke každému nalezenému markantu ukládá pozice podle souřadnic, typ markantu a gradient papilární linie. Obrázek 4.4 znázorňuje detekci markantů. Po okrajích obrázku, kde je jednoduché ukončení markantu, je hodnota 2. Ve středu otisku, kde dochází k větvení, je určena hodnota součtu bodů v okolí 4. [4] [6]



Obrázek 4.4: Znázornění detekce markantů na ztenčených papilárních liniích (převzato z [4]).



## Kapitola 5

# Tvorba databáze falzifikátů

Tato kapitola se zabývá jádrem samotné práce a tím je tvorba databáze falzifikátů. Také se seznámíme s použitými snímači a materiály. Tvorba a snímání falzifikátů je časově náročný proces, ve kterém je nutné řadu materiálů nechat správně zatuhnout a poté vhodným způsobem použít. Dalším důvodem velké časové náročnosti je nestálost některých druhů falzifikátů. Takové falzifikáty je možné použít například pouze jednou, nebo je možné je používat pouze po omezenou dobu. Poté je nutné vyrobit nový falzifikát. Dalším úskalím, jak si dále vysvětlíme a ukážeme, je nekompatibilita některých materiálů s některými druhy senzorů, která vychází z fyzikálních vlastností jak senzorů, tak materiálů.

Jak v případě výroby falzifikátů, tak v případě snímačů otisků prstů je možné využít celé řady možností, nicméně tato práce se zabývá těmi, ve kterých lze za přijatelný čas dosáhnout přijatelných výsledků. Na následujících řádcích bude popsána výroba falzifikátů a jejich snímání, které autor provedl.

### 5.1 Výběr vhodných metod výroby

Pro potřeby této práce bude pro výrobu falzifikátů užito především technik z podkapitol [3.1.2](#) a [3.1.3](#). Nejjednodušším a nejlevnějším způsobem, jak falzifikát vyrobit, je nechat zkoumaný subjekt otisknout prst do materiálu. Materiál musí dobře držet tvar (čím trvalejší, tím lepší), a následně se do této formy nalije, nebo natlačí přenosový materiál. Postupným testováním se osvědčilo použití plastelíny nebo vosku pro formu. Jako přenosový materiál bylo vybráno lepidlo Herkules a tekutý latex.

Vybrané materiály pro použití s deskou plošných spojů (DPS) jsou plastelína, tekutý latex, voskové plátky, Moody putty, Jumping putty, Herkules a Funny gummy. Jejich vlastnosti a práci s nimi si popíšeme níže. V této práci jsou použity dva různé prsty od jednoho zkoumaného subjektu. Tyto prsty budou sloužit jako předloha k výrobě falzifikátů i jako vzor sloužící k analýze v podobě reálných otisků prstů.

### 5.2 Snímače použité v této práci

Pro potřeby této práce byly vybrány dva snímače otisků prstů a mikroskop. První snímač – Live 20R je produkt společnosti ZKTeco a využívá optickou technologii. Je možné jej pomocí USB připojit k počítači a s pomocí výrobcem dodaného SDK (software development kit), kde se nachází i ovladače k tomuto zařízení, lze v přiložené demo aplikaci snadno získat snímky otisků prstů. Jde o rychlý snímač, který obsahuje 2 megapixelovou kameru a LED

přísvit. Výsledný obraz má  $300 \times 400$  pixelů a snímač by měl podporovat detekci živosti. Na obrázku 5.1 je tento snímač vyobrazen. [20]



Obrázek 5.1: Snímač ZKTeco Live 20R, který byl použit v této práci.

Snímač Eikon Touch výrobce DigitalPersona používá kapacitní technologii a též se k počítači připojuje přes rozhraní USB. Snímání bylo provedeno pomocí nástroje VeriFinger od společnosti Neurotechnology a snímky mají rozlišení  $256 \times 260$  pixelů. Na obrázku 5.2 je tento snímač vyobrazen. [17]



Obrázek 5.2: Snímač Eikon Touch, který byl použit v této práci.

Mikroskop, který byl použit především pro dokumentaci snímků je DigiMicro USB microscope s 1.3 megapixelovou kamerou (rozlišení  $1280 \times 1024$  pixelů), LED přísvitem a polohovatelným stojánkem. Připojení přes rozhraní USB a pořizování snímku přes vestavěnou aplikaci v systému Windows 10 – Kamera. Na obrázku 5.3 je tento mikroskop vyobrazen.



Obrázek 5.3: Mikroskop, který byl použit v této práci.

## 5.3 Výroba pomocí odlitků

Výroba pomocí odlitků je založena na metodách popsaných v podkapitole 3.1.2. Materiály použité k výrobě formy na odlitky byly plastelína a voskové plátky.

### 5.3.1 Plastelína

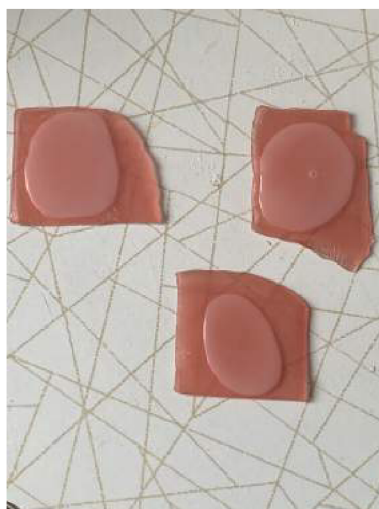
Plastelína je velmi jednoduchým a rychlým materiálem vhodným k odlití. Po otisknutí prstu subjektu do plastelíny je okamžitě možné nanést přenosový materiál, který se nechá zatvrdnout a pak je dále použitelný. Je nutné dát pozor, abychom na formě nenechali přenosový materiál příliš dlouho (maximálně po dobu tuhnutí), protože plastelína s některými materiály reaguje a výsledný falzifikát je příliš poškozený. Jediný spolehlivější materiál, který se hodí na odlití falzifikátu z plastelíny je Herkules. Na plastelínu nanese tenkou vrstvu lepidla Herkules, kterou necháme zatvrdnout přibližně 24 hodin. Před oddělením lepidla od plastelíny je vhodné celek umístit na čas do lednice, aby plastelína ztuhla a snáze se oddělila. V opačném případě má plastelína tendence se trhat a zůstat na falzifikátu. Po sejmutí a zahřátí v dlaních vykazuje tento materiál elastické vlastnosti podobné skutečnému prstu. Po zahřátí v ruce je falzifikát z Herkulesu použitelný k přikládání na senzor. Na obrázku 5.4 je k vidění fáze tuhnutí falzifikátů z Herkulesu na plastelínové formě.



Obrázek 5.4: Záběr na fázi tuhnutí Herkulesu na plastelínových odlévacích formách.

### 5.3.2 Voskové plátky

Tvorba falzifikátů pomocí voskových plátek je podobná jako v případě plastelíny. Plátek velikosti přibližně  $3 \times 3$  cm je potřeba krátce zahřát (například v horké vodě). Poté je nutné okamžitě nechat otisknout prst subjektu do tohoto plátku, následně jej nechat zchladnout, aby zatvrdl (je možné i vložit celek krátce do lednice) a poté je možno odlít. Materiály vhodné na odlití z voskových plátků jsou Herkules či tekutý latex. Tvrdnutí Herkulesu na voskovém plátku je delší (24 až 48 hodin). Před sloupnutím falzifikátu z formy je vhodné celek zchladit, aby byl vosk tvrdý a pokud možno se neloupal. Toto je problém hlavně u Herkulesu, na který má vosk tendenci se lepit. Latexový falzifikát z voskového plátku jde obvykle odstranit bez problémů. Na obrázku 5.5 je vyobrazena fáze tuhnutí Herkulesu na voskové formě.

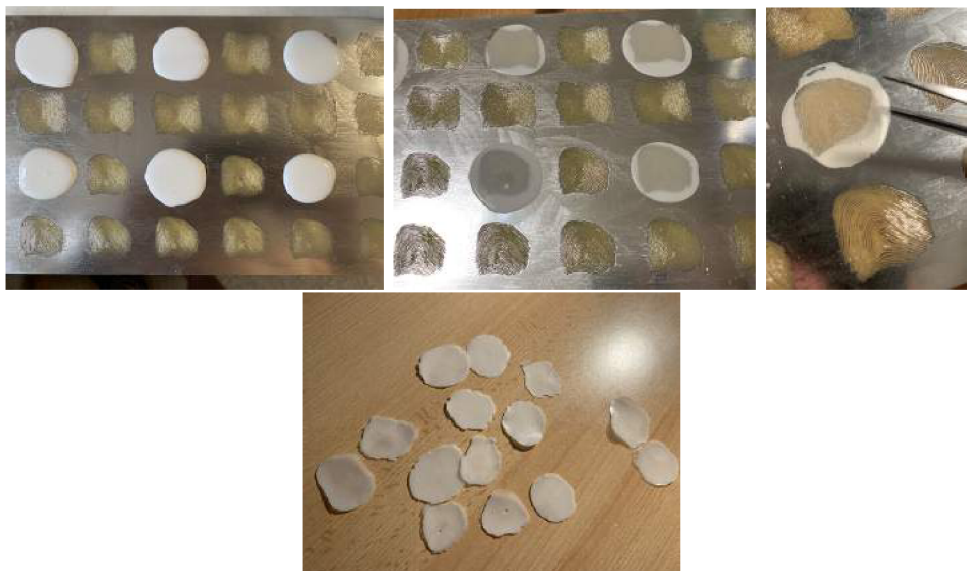


Obrázek 5.5: Záběr na fázi tuhnutí Herkulesu na voskových odlévacích formách.

## 5.4 Výroba pomocí leptání

Pro potřeby této práce byly vyrobeny dvě desky plošných spojů (dále jen DPS). Výhodou desky plošných spojů je její odolnost a trvalost, ale je nutné elektronické nasnímání subjektu předem, následné zpracování nasnímaných otisků a výroba. Doba od sejmutí otisků po hotovou desku mohou být i měsíce. Otisky pro výrobu byly sejmuty profesionálním snímačem otisků prstů Jenetric Livetouch Quattro, který umožňuje i sejmutí více prstů najednou či válené otisky.

Způsobů, jak získat falzifikáty z DPS je více. Mezi základní dva patří odlití z DPS nebo otisknutí z DPS. Na odlití se hodí materiály, úspěšné i v předchozích metodách – lepidlo Herkules či latex. Na obrázku 5.6 je možné vidět celý proces v jednotlivých fázích. Při nanášení lepidla na DPS je potřeba dbát na to, aby se zde nenacházely žádné bubliny a aby vrstva nebyla příliš tlustá, tuhnutí by pak trvalo příliš dlouho.



Obrázek 5.6: Průběh výroby falzifikátu pomocí lepidla herkules z DPS.

Doba tuhnutí je přibližně 24 hodin. Při odstraňování falzifikátů z DPS je potřeba dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k poškození falzifikátu či poranění. Falzifikát drží na DPS velmi pevně, okraje je proto dobré začít odstraňovat nožem. Jakmile dokážeme okraje uchopit pinzetou, či rukou, je možné jej odstranit takto. Herkulesové falzifikáty se vyznačují velmi dlouhou životností, lze je použít opakovaně a vykazují slušnou mechanickou odolnost.

Výroba latexových falzifikátů je podobná výrobě falzifikátů z Herkulesu. Je nezbytné nanést na DPS větší vrstvu latexu, neboť s časem vysychá a vrstva latexu se tenčí. Po přibližně 24 hodinách je možné falzifikát sejmut. Je třeba dbát opatrnosti, aby se falzifikát nepotrhal. Po sejmutí je vhodné jej udržovat v rovině, aby se nepřeložil. Došlo by k přilepení a falzifikát by byl trvale znehodnocen. S postupem času latex ztrácí své kapacitní vlastnosti.

Další možností, jak získat otisky z DPS je přitisknout na ni vhodný materiál, případně pár sekund počkat a poté jej rovnou aplikovat na požadované místo či senzor. Výběr materiálu by měl být v závislosti na tom, jaké od něj máme očekávání. Pokud nevyžadujeme kapacitní vlastnosti, přijatelně funkční materiál je plastelína. Tu stačí zahřát v dlaních, přitisknout na DPS a okamžitě nanést na požadované místo. Trvalost otisku z plastelíny je takřka nulová. Po jednom až dvou přiloženích se reliéfy vytratí a je potřeba vytlačit je do plastelíny opětovně.



Obrázek 5.7: Průběh výroby falzifikátu pomocí tekutého latexu z DPS.

Dalšími materiály vhodnými k těmto rychlým otiskům jsou Jumping Putty a Moody Putty, což jsou materiály běžně dostupné v hračkářství. Nevykazují kapacitní vlastnosti, ale linie z DPS přenáší věrně. Nicméně jejich trvalost je stejně špatná jako u plastelíny. U těchto materiálů navíc dochází k samovolné deformaci vlivem gravitace, takže za několik minut jsou reliéfy opět ztraceny.

Materiál, který je rychlý a vykazuje kapacitní vlastnosti je tvořivý materiál Funny Gummy, nizozemské firmy JOHNTOY. Po nanesení na DPS je vhodné vzorek zmrazit například stlačeným vzduchem ve spreji. Díky tomu vzorek déle drží tvar a je možné jej nanést na místo. Po vyschnutí je materiál pěnový, drží tvar, není kapacitní a je velmi porézní.

## 5.5 Snímání databáze

Následující podkapitoly popisují průběh skenování získané databáze. V první podkapitole je popsáno snímání skutečných prstů, další podkapitoly se zabývají snímáním falzifikátů a poslední podkapitola popisuje vytvořenou databázi falzifikátů.

### 5.5.1 Reálné otisky

Snímání reálných otisků je jednodušší, než snímání falzifikátů, neboť senzory otisků prstů jsou navrženy pro skutečné prsty a očekávají tak vlastnosti (kapacitní, tepelné, nebo například tvar a průběh papilárních linií) takové, jaké má skutečný prst. Některé snímače s falzifikáty nemají problém. Například optický snímač ZKTeco nechá uživatele sejmout pro uložení prakticky cokoliv. Naopak kapacitní snímač Eikon Touch, jak už z názvu použité technologie vyplývá, vyžaduje, aby byl vzorek kapacitní a navíc software použitý ke snímání z tohoto senzoru má poměrně vysoké nároky na kvalitu nasnímaného otisku. Snímané reálné prsty byly pouze dva (ty které byly použity na výrobu DPS). Při snímání je potřeba dbát na vysokou kvalitu otisku, takže je typicky nutné sejmout každým senzorem daný prst vícekrát a vybrat pouze ty, kde je otisk nejkvalitnější. Vliv na kvalitu výsledného otisku má zejména vlhkost prstu, tlak na snímací plochu a rovnoměrnost tohoto tlaku, či důraz na to, aby se s prstem při snímání nijak nepohnulo. V případě příliš vlhkého prstu se papilární linie slévají a splývají do sebe. V případě příliš suchého prstu je otisk pouze slabě zřetelný

a papilární linie se přerušují i v místech, kde mají ve skutečnosti souvislý průběh. V případě příliš vysokého tlaku se papilární linie rovněž spojují a splývají a mají nepřírozenou šířku.

Senzor ZKTeco je třeba pravidelně čistit od mastnot a potu, které na něm při přikládání prstů ulpívají. Po aktivaci senzoru v demo aplikaci, která je přiložená od výrobce, je třeba prst po aktivaci podsvícení krátce přiložit. Okamžitě se jeho otisk objeví v příslušné části okna a je jej možné dále uložit, nebo sejmout otisk nový, opakovaným přiložením.

Jak už bylo výše zmíněno, pro snímání pomocí snímače Eikon Touch bylo použito nástroje VeriFinger, který bude dále použit i na vyhodnocování výsledků této práce. V případě kapacitního senzoru Eikon je situace ztížena především menší plochou snímače a celkově vyššími nároky, které klade jak samotný snímač, tak aplikace VeriFinger. Prst je třeba přiložit na delší dobu a až po vyzvání od aplikace. V případě dřívějšího přiložení, nebo nesprávné polohy prstu se otisk sejme chybně, nebo jej VeriFinger odmítne sejmout. Snímač Eikon Touch je potřeba rovněž pravidelně čistit od potu a nečistot a je třeba aby prst nebyl příliš vlhký. Na příliš suchý prst kapacitní snímač Eikon není příliš náchylný, neboť kapacitní technologie tohoto senzoru počítá s elektrickými vlastnostmi a ty jsou přítomny i u suchého živého prstu. Obrázek 5.8 znázorňuje snímky, kde se podařilo otisky sejmout bez nadměrného poškození, nebo nežádoucích artefaktů. Obrázky 5.9a až 5.9c jsou ze senzoru Eikon Touch a znázorňují v tomto pořadí: vysoký tlak, vlhký prst a malý tlak. Obrázky 5.9d až 5.9f jsou ze senzoru ZKTeco a znázorňují v tomto pořadí: vysoký tlak, vlhký prst, suchý prst, malý tlak.



Obrázek 5.8: Snímky ze snímače ZKTeco (a) a Eikon Touch (b) s dobrou kvalitou.



Obrázek 5.9: Nekvalitní snímky ze snímačů ZKTeco (a, b, c) a Eikon Touch (d, e, f).

Pořizování snímků pomocí mikroskopu není složité. Jediné, na co je třeba dbát, je správné nastavení vzdálenosti mikroskopu od zkoumaného prstu a následné zaostření. V některých případech může být potřeba si pod mikroskop umístit stojánek, aby nebyl prst příliš blízko. Na obrázku 5.10 je záběr na snímek reálného prstu v poměrně přijatelné kvalitě, nicméně kraje jsou mírně rozostřené z důvodu zakřivení prstu a tedy jiné ohniskové vzdálenosti.



Obrázek 5.10: Snímek reálného prstu nasnímaný mikroskopem.

### 5.5.2 Herkules

Vzorek z Herkulesu vzniknul buď odlitím z plastelíny, vosku, nebo z DPS. Pro nasnímaní falzifikátů z Herkulesu je nezbytné, aby byl materiál tvárný, což obnáší jeho zahřátí. Obvykle stačí jej zahřívát alespoň 1 minutu v dlaních. Je nutné falzifikáty držet dále od vlhkosti, neboť mají tendenci se rozpouštět. V případě optického snímače ZKTeco je snímání Herkulesových otisků poměrně přímočaré. Jakmile je falzifikát tvárný a ohebný, jednoduše jej



přiložíme na snímač. Pokud dbáme na rovnoměrný tlak po celé ploše falzifikátu a snímače, neměl by nastat problém.

U snímače Eikon Touch je práce mírně náročnější, je potřeba provést několik pokusů a rovnoměrně a přitom silně tisknout vzorek na snímač, aby se otisk z falzifikátu podařilo načíst a aby jej VeriFinger přijmul. Na obrázku 5.11 jsou znázorněny snímky falzifikátu z Herkulesu, nasnímané senzorem ZKTeco, Eikon Touch i mikroskopem.



Obrázek 5.11: Falzifikáty z Herkulesu nasnímané zleva pomocí senzorů: ZKTeco, Eikon Touch, mikroskop.

### 5.5.3 Plastelína

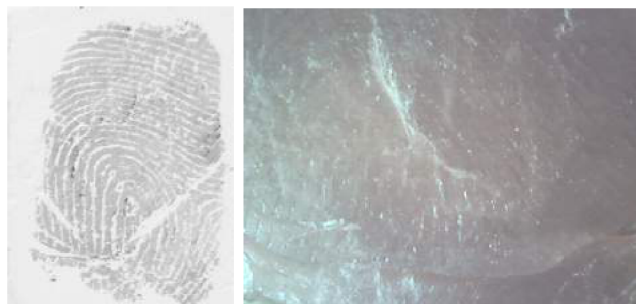
Vzorky falzifikátu z plastelíny pochází z DPS. Plastelína je za pokojové teploty tuhý materiál, ale po zvýšení teploty na tělesnou teplotu je velmi tvárná. Pro optický snímač plastelína není problém, ale má tendence znečišťovat plochu snímače a zanechávat ji mastnou. Po každém přiložení na snímač je nutné otisknout falzifikát z DPS do plastelíny znovu. Snímač je třeba pravidelně a důkladně očišťovat. Plastelína nemá kapacitní vlastnosti. Na snímcích 5.12 je vidět, jaké vlastnosti vykazují falzifikáty z plastelíny.



Obrázek 5.12: Falzifikáty z plastelíny, nasnímané senzorem ZKTeco (první dva) a mikroskopem (vpravo).

### 5.5.4 Vosk

Vzorky falzifikátů z vosku pochází z DPS. Vosk je kvůli své velké tuhosti materiál, se kterým si příliš nerozumí ani optický, ani kapacitní senzor. U optického senzoru lze snímek pořídit, ale průsvitnost vzorku způsobuje nepříliš zřetelné linie a navíc se na vzorku snadno vytvoří praskliny. Kapacitní senzor nedokáže voskové falzifikáty nasnímat vůbec. Obrázek 5.13 znázorňuje rozsáhlá poškození, vzniklá na povrchu falzifikátu.



Obrázek 5.13: Falzifikát z vosku, nasnímaný senzorem ZKTeco (vlevo) a mikroskopem (vpravo).

### 5.5.5 Tekutý latex

Vzorky falzifikátů z tekutého latexu pochází z DPS, či jsou odlity z vosku. Tekutý latex se hodí i pro snímání optickým senzorem i kapacitním senzorem. Kapacitní senzor může protestovat, ale po několika pokusech by se mělo podařit snímek zachytit. U optického senzoru nastává problém, když je vzorek již sušší a průhledný. Na snímku mohou být v pozadí vidět papilární linie osoby, která falzifikát přikládá na senzor. Obrázek 5.14 znázorňuje snímek nasnímaný senzorem ZKTeco, Eikon Touch a mikroskopem (v tomto pořadí). Na snímku jsou zřetelně vidět rozsáhlá poškození.



Obrázek 5.14: Falzifikát z tekutého latexu, zleva doprava: snímač ZKTeco, Eikon Touch, mikroskop.

### 5.5.6 Funny gummy

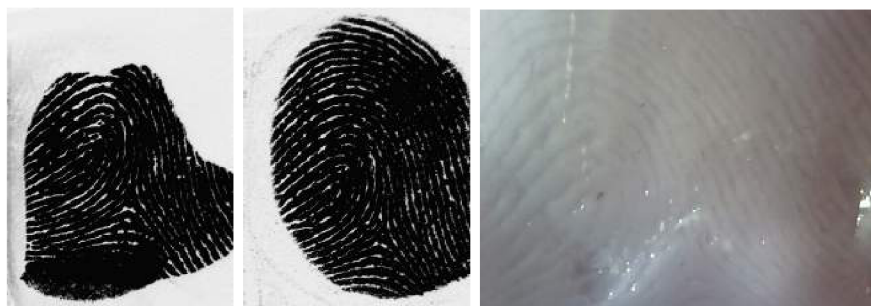
Falzifikáty z Funny gummy pochází z DPS. Funny gummy lze snímat ve dvou stádiích. Dokud je Funny gummy čerstvá, jde falzifikáty slušně sejmout, nicméně okolo papilárních linií je vidět nežádoucí šum. V případě suchého vzorku Funny gummy je šum viditelný ještě více. S kapacitním senzorem nelze falzifikáty z Funny gummy nasnímat, neboť není kapacitní. V případě čerstvé Funny gummy je senzor třeba občas očistit, suchá Funny gummy nezanechává na senzoru žádné nečistoty. Na obrázku 5.15 jsou falzifikáty nasnímané senzorem ZKTeco (levý a prostřední snímek) a mikroskopem (pravý snímek).



Obrázek 5.15: Falzifikáty z materiálu Funny gummy, nasnímané senzorem ZKTeco a mikroskopem (v tomto pořadí).

### 5.5.7 Moody putty, Jumping putty

Falzifikáty Moody putty a Jumping putty pochází z DPS. Materiály, které poměrně věrně kopírují papilární linie. Je nutné po každém přiložení na senzor, nebo po delší prodlevě otisknout z DPS znovu. Nejsou kapacitní, snímání je tedy možné pouze na optickém senzoru. Senzor je potřeba občas očistit od mastnoty a nečistot. Na obrázku 5.16 jsou dva falzifikáty nasnímané senzorem ZKTeco (levý a prostřední snímek) a mikroskopem (pravý snímek).



Obrázek 5.16: Falzifikáty z materiálu Moody putty, nasnímané senzorem ZKTeco a mikroskopem (zleva v tomto pořadí).

### 5.5.8 Výsledná databáze

Výsledkem výroby a snímání falzifikátů je nasnímaná databáze. Odlitků (Herkules, latex) bylo jak z DPS, tak z forem vytvořeno více a některé, především ze začátku výroby měly nedostatečnou kvalitu, takže použity nebyly. Tabulka 5.1 ukazuje, kolik vzorků z jakého materiálu bylo jednotlivými snímači nasnímano. Důležitým faktem je, že ke snímání došla pouze část vyrobených otisků. Nezanedbatelné množství falzifikátů, především ze začátku pokusů o výrobu, nemělo dobrou kvalitu a nemělo by tedy cenu takové vzorky snímat. V takovém případě se pak vracíme na začátek, kdy musíme například odlít nové vzorky a 24 hodin čekat na jejich zatuhnutí (či jiné dodržení technologického postupu, popsaného výše). Dále se do výsledné databáze dostal pouze zlomek z celkového počtu pořízených snímků. V první fázi se eliminují otisky nejhorší kvality, které se ani neukládají a rovnou se snímá dále. Na pořízení jednoho snímku, který se svým vzhledem a kvalitou hodí k uložení, padne několik pokusů o nasnímání, které se rovnou zahodí, nebo se ani nepovedou, takže je například VeriFinger odmítne. V druhé vlně je pak vhodné snímky ještě projít a vybrat (pokud je to možné) pouze ty, které na první pohled nesou potřebné znaky. Výsledná databáze je tedy

výsledkem několikátýdenní snahy, zkoumání a bádání, jakým způsobem falzifikáty vhodně vyrobit a nasnímat. Sloupec ZK obsahuje počty nasnímaných snímků ze snímače ZKTeco, Sloupec Eikon obsahuje počty nasnímaných snímků ze snímače Eikon Touch a sloupec Mikroskop obsahuje počty snímků, pořízených mikroskopem. Snímky z mikroskopu byly zrcadlově převráceny, aby odpovídaly ostatním snímkům, které jsou ze snímačů převráceny automaticky. Snímky ze snímače ZKTeco a Eikon Touch jsou ve formátu BMP a snímky z mikroskopu jsou ve formátu JPG. Nejvíce snímků je ze snímače ZKTeco, neboť má největší benevolenci, co se týče přijímání různých materiálů. Eikon Touch dovoluje snímat pouze kapacitní vzorky a ještě ne všechny. Pokud VeriFinger vyhodnotí, že kvalita není dostatečně dobrá, tak snímek odmítne.

Tabulka 5.1: Tabulka všech nasnímaných vzorků a jejich počet.

<b>Zdroj</b>	<b>Vyrobeno</b>	<b>ZK</b>	<b>Eikon</b>	<b>Mikroskop</b>
Skutečný prst	-	8	7	2
Herkules z DPS	15	12	2	1
Plastelína z DPS	20	10	-	2
Funny gummy z DPS	6	14	-	4
Vosk z DPS	2	6	-	2
Moody putty / Jumping putty z DPS	4	14	-	2
Latex z DPS	6	11	2	3
Herkules z plastelíny	2	6	4	2
Herkules z vosku	6	19	-	2
Latex z vosku	2	3	-	2
<b>Součet</b>	<b>57</b>	<b>93</b>	<b>17</b>	<b>20</b>

## Kapitola 6

# Algoritmus analýzy rozdílů

Tato kapitola pojednává o návrhu a implementaci algoritmu, který vznikl po boku databáze falzifikátů pro potřeby její analýzy. K návrhu algoritmu je použito technik popsanych v kapitole 4.

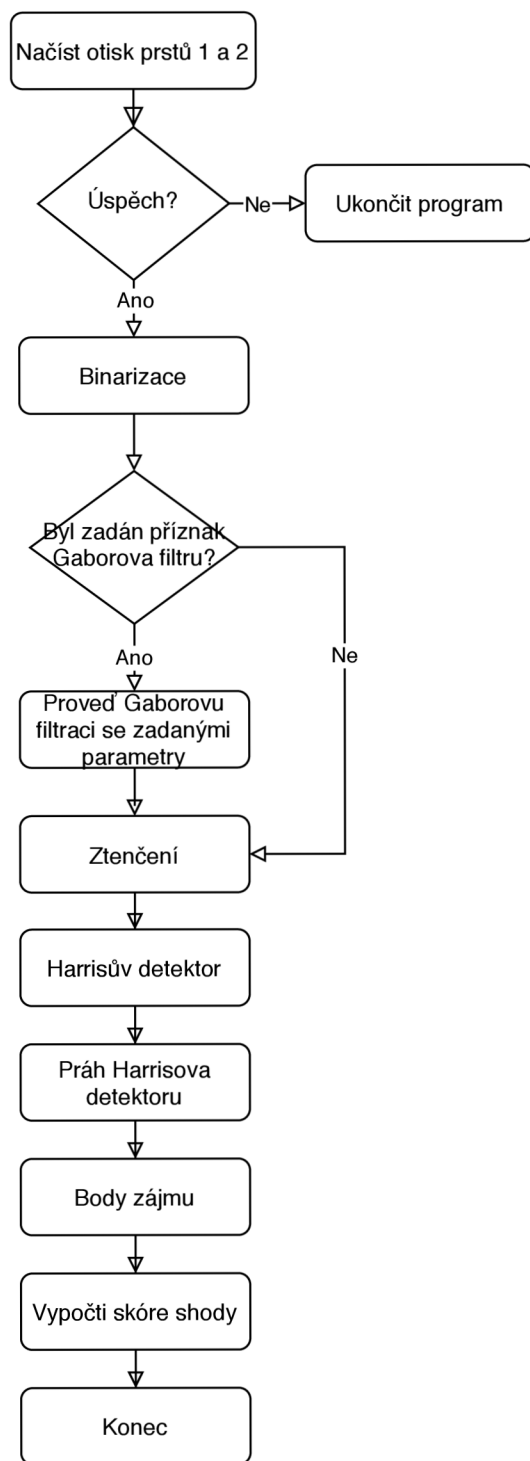
### 6.1 Návrh algoritmu

Cílem algoritmu je analyzovat rozdíl mezi otiskem prstu skutečného a mezi falzifikátem. Je proto nutné nad nasnímanými otisky provést jisté úpravy, aby byly snímky zpracovatelné. Prvním krokem k získání použitelného obrazu je binarizace, prostřednictvím techniky zvané prahování. Po provedení prahování dostaneme čistě černobílý snímek, se kterým lze dále pracovat. Pro lepší práci a následnou filtraci je vhodné použít algoritmus na ztenčení linií, kdy všechny papilární linie budou pouze o šířce 1 pixel.

V případě více poškozeného otisku prstů může být vhodné použití Gaborova filtru. Na druhou stranu, pokud chceme analyzovat snímek tak jak je, tak Gaborův filtr může odstranit artefakty, které jsou ve snímku navíc a snížit tak skóre neshody, což nemusí být cílem. Cílem je analyzovat falzifikáty tak, jak jsou. Je vždy na poučeném uživateli aplikace, jakým způsobem chce otisk prstu analyzovat a zda Gaborův filtr použije.

Pro metriku, použitelnou k analýze rozdílů by mohlo být nalezení a porovnání význačných bodů. Tyto body lze poměrně snadno nalézt jak ve vzorovém skutečném otisku prstu i v jeho falzifikátu. Předpokládáme, že počet a rozmístění význačných bodů se u originálů a falzifikátů může lišit z důvodu nedokonalosti přenosového materiálu, či chybě při snímání. Význačné body můžeme hledat pomocí Hongovy metody (viz podkapitola 4.2.2, nebo Harrisova detektoru rohů (popsáno v kapitole 4.2.1). Autor došel k rozhodnutí, že pro potřeby této práce by mohlo být zajímavé použití právě Harrisova detektoru. Důvod je především snaha vyzkoušet méně konvenční metodu k úkolu, na který se běžně nepoužívá a spíše se ubírat cestou metod zpracování obrazu. V případě použití Harrisova detektoru se však může stát, že nám nalezne příliš velký počet bodů zájmu. Nalezené body je možné filtrovat podle prahu, snížit tak jejich počet a nalézt tak pouze význačnější body zájmu. [7]

Stejný sled operací tedy provedeme nad jedním i druhým vstupním obrazem. Body zájmu porovnáme a provedeme na základě jejich polohy výpočet, který bude reprezentovat skóre rozdílů. Analýza bude dále probíhat pomocí skriptu, který bude spouštět vyhodnocovací program nad celým adresářem, obsahujícím falzifikáty. Výstupem by měl být seznam navzájem porovnaných otisků a skóre rozdílů. Obrázek 6.1 znázorňuje přehledový diagram toho, jak by měla analýza rozdílů pracovat.



Obrázek 6.1: Přehledový diagram algoritmu analýzy rozdílu.

## 6.2 Implementace algoritmu

V této podkapitole je popsána implementace a dílčí kroky, které jsou provedeny, aby se dosáhlo požadovaného výsledku. Aplikace přijímá na vstupu dva obrázky, po úpravě snímků se provede výpočet skóre a společně s názvy obou obrázků se skóre vytiskne na standardní výstup. Všechny snímky v této kapitole jsou výstupem tohoto programu.

### 6.2.1 Výběr implementačních prostředků

Současná nabídka umožňuje výběr ze široké škály prostředků, které by byly pro daný problém vhodné. Implementace by mohla být provedena v Matlabu, neboť jde o vědecký nástroj, umožňující komfortní práci s maticemi a grafikou a obsahuje množství vestavěných funkcí. Dále máme na výběr některý z běžně používaných programovacích jazyků, přičemž vhodné jazyky pro tento problém se jeví Python, C++, či Java. Všechny z těchto programovacích jazyků umožňují práci s knihovnou OpenCV, která je zavedeným standardem pro práci s obrázky a videem a její výhodou je licence, umožňující volné použití. Knihovna OpenCV je psána v C++ a pro ostatní jazyky je možno tuto knihovnu využít skrze navázání. Zjednodušeně řečeno, i když budeme psát program v Pythonu za použití knihovny OpenCV, budou volány navázané funkce knihovny OpenCV, implementované v C++. V tomto případě jde o zbytečný krok navíc a proto se C++ jeví, jako ideální prostředek k práci s knihovnou OpenCV.

Navržená aplikace byla tedy implementována v jazyce C++ s použitím knihovny OpenCV, ve verzi 4.2.0. Abychom zajistili jednoduché ovládání a možnost běhu na vzdáleném stroji (například pro analýzu tisíců otisků najednou), půjde o konzolovou aplikaci bez grafického uživatelského rozhraní. Skript pro spuštění nad více falzifikáty současně byl napsán pro interpret Bash. Program byl psán a laděn na systému MacOS 10.14.6.

### 6.2.2 Zpracování vstupních parametrů

Pro zpracování vstupních parametrů je využito funkce *Getopt*, která dokáže jednoduše zpracovat vstupní parametry bez ohledu na jejich pořadí. Podle přepínačů (anglicky switch) se provedou příslušné akce a program se pak podle nich dále zachová. Seznam možných vstupních parametrů je následující:

- **-h**: Vypíše nápovědu k programu, pak je program ukončen.
- **-r**: Tento parametr následovaný cestou k souboru zadává cestu k reálnému otisku prstů, který zpracováváme.
- **-f**: Tento parametr následovaný cestou k souboru zadává cestu k falzifikátu otisku prstů, který zpracováváme.
- **-s**: Tento přepínač nastavuje příznak ukládání zpracovaných obrázků a jejich dílčích kroků.
- **-t**: Tento parametr následovaný číslem z rozsahu 1 až 255 nastavuje práh Harrisovy filtrace, vyšší číslo = méně význačných bodů je vybráno.
- **-g**: Tento parametr spouští Gaborovu filtraci nad falzifikátem, je nutné dopsat parametry Gaborovy filtrace v tomto pořadí do řetězce:  $\lambda$ ,  $\sigma$ ,  $\gamma$ , a  $\psi$ . Příklad: (-g "10 5 1 0"). Čísla mohou být desetinná i záporná.

Příklad spuštění programu (vše, jako jeden příkaz):

```
./app -r realukazovak/l_ukazovak_eikon2.bmp -f fakeukazovak/  
vz11_plastelina_zk1.bmp
```

### 6.2.3 Binarizace (prahování)

Pro binarizaci (viz kapitola 4) je využito techniky prahování Otsu (viz článek [19]), což je technika adaptivního výpočtu prahu podle histogramu obrazu. Tento druh prahování je vhodný pro použití s otisky prstů, neboť pro každý otisk prstu může vyžadovat jiný práh a jeho nevhodná volba by mohla vést ke ztrátě informace v daném otisku. V OpenCV je prahování Otsu zabudováno a je realizováno následovně.

```
threshold(FP1, FP1_binary, 0, 255, THRESH_BINARY_INV | THRESH_OTSU);
```

Tento příkaz nastavuje maximální a minimální hodnotu, která se nastavuje pod prahem a nad prahem, zároveň snímek invertuje a zároveň provede binarizaci prahováním Otsu. Obrázek 6.2 znázorňuje, jak vypadá otisk po provedení inverze a prahování. [13]



Obrázek 6.2: Znárodnění původního obrázku a obrázku po aplikaci algoritmu na binarizaci.

### 6.2.4 Gaborův filtr

Pro provedení Gaborovy filtrace byla v napsána funkce *Gabor* bez návratového typu. Vstupními parametry funkce jsou matice obsahující obrázek a parametry  $\lambda$ ,  $\sigma$ ,  $\gamma$ , a  $\psi$ , u kterých je nutné, aby je zadal uživatel. Pro Gaborovu filtraci se zde vytvoří 5 prázdných obrázků. 4 obrázky slouží pro dílčí výsledky Gaborovy filtrace a pátý slouží pro jejich sloučení a uložení. Pro samotnou Gaborovu filtraci je potřeba vytvořit si jádra (anglicky kernel), kterými se pak jednotlivé snímky profiltrují (provede se operace konvoluce).

Jádra jsou pro potřeby otisků prstů definována pro 4 úhly (0, 45, 90 a 135 stupňů). Dílčí kroky po aplikaci jednotlivých Gaborových filtrů a jejich sloučení je znázorněno na obrázku 6.3. Na dílčích krocích je zřetelně vidět, jaký vliv má které jádro na náš otisk. Pro srovnání, jak Gaborova filtrace vylepší zadaný snímek je na obrázku 6.4 znázorněno ztenčování nad snímkem neupraveným a nad snímkem upraveným Gaborovým filtrem. Povšimněme si vyhlazenějších detailů a menšího množství falešných markantů, které se na prvním snímku objevují a na druhém nejsou. Toto lze pozorovat především v oblasti jádra otisku a jeho bezprostředního okolí.





Obrázek 6.3: Dílčí kroky Gaborovy filtrace a výsledný snímek po sloučení.



Obrázek 6.4: Srovnání ztenčení bez Gaborovy filtrace a s ní.

### 6.2.5 Ztenčení

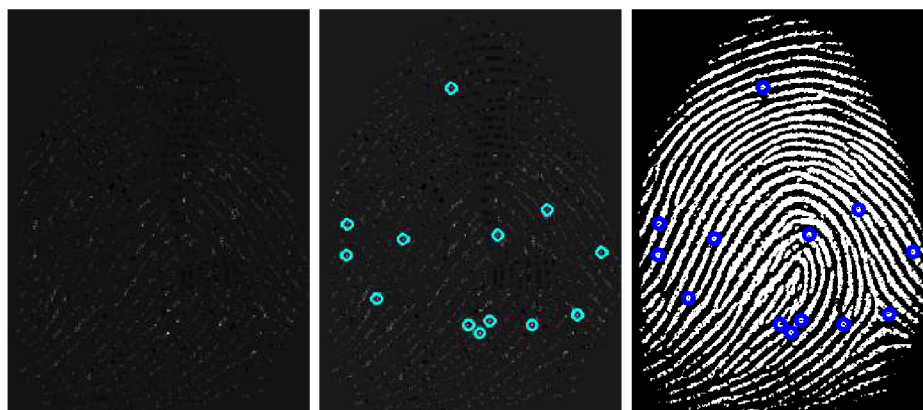
Proces ztenčení zadaného snímku je převzat z knihy OpenCV 3 Blueprints [7] v nezměněné podobě, tak jak je. Proces je založen na metodě Zhang-Suen ([18]). Sestává ze dvou vlastních funkcí *thinning* a *thinningIteration*. Jako vstup je použit binární obraz (pouze černé a bílé pixely, rozsah 0 až 255). Jde o metodu iterativní, tedy postupně se projde celý snímek a podle osmiokolí každého pixelu (kromě krajních) odstraňuje pixely, které leží na okrajích dané oblasti. Obrázek 6.5 znázorňuje původní otisk prstu a stejný otisk prstu po procesu ztenčení.



Obrázek 6.5: Znázornění původního obrázku a obrázku po aplikaci algoritmu na ztenčení.

### 6.2.6 Harrisův detektor

Proces vyhledávání klíčových bodů pomocí Harrisova detektoru sestává ze dvou funkcí. První funkcí je *DoHarrisCorners* projde celý rozsah našeho obrazu a po normalizaci jsou tyto body uloženy ve snímku o stejném rozlišení s hodnotami 0 až 255, podle míry význačnosti. Tato funkce využívá vestavěnou funkci knihovny OpenCV *cornerHarris* a *normalize*. Nejvýznačnější body pak mají vyšší hodnotu (z rozsahu 0 až 255). Po provedení prahování (funkce *DoHarrisThreshold*) podle zadaného prahu se objeví buď méně, nebo více klíčových bodů. Tyto jsou vloženy přímo do obrázků pro ilustraci, aby je bylo možno zobrazit, a dále do vektoru klíčových bodů za použití funkcí *circle* a *push\_back*. Obrázek 6.6 znázorňuje, jak vypadá otisk po provedení prvního kroku a dále po provedení prahování, jehož výsledek je vložen do tohoto obrázku a také do původního obrázku. [11] [12]



Obrázek 6.6: Znázornění výsledků Harrisova detektoru s prahem 180.

### 6.2.7 Výpočet skóre

Klíčové body, nalezené pomocí Harrisova detektoru, máme uloženy ve vektoru. Před výpočtem samotného skóre se pomocí třídy *DescriptorMatcher* spárují body zájmu z obou otisků metodou *BruteForce-Hamming*, což je Hammingova vzdálenost. Tento přístup je přímo implementován v knihovně OpenCV. K celkovému vypočtu skóre rozdílů slouží cyklus *for*, který projde všechny spárované body zájmu a rozdíl vzdálenosti mezi jedním a druhým spárovaným bodem přičte k celkovému skóre. Na výsledné skóre má velký vliv, jaký práh

zvolíme pro Harrisův detektor z předchozího bodu, neboť se nám může dostat velmi rozdílného počtu bodů zájmu. [10]

### 6.2.8 Skript pro spuštění nad více snímky

Účel tohoto skriptu je provedení analýzy nad celým adresářem, obsahujícím falzifikáty. Analyzujeme vždy proti jednomu referenčnímu otisku. Proto je skript *runall.sh* navržen tak, aby přijmul dva parametry, přičemž první je adresář, obsahující falzifikáty otisků a druhý parametr je snímek jednoho reálného otisku. Zadaný adresář se celý projde a názvy všech souborů se uloží do pole *arr*. V cyklu jsou poté procházeny všechny názvy souborů z daného adresáře a každý z těchto falzifikátů je porovnán s původním reálným otiskem. Názvy obou porovnaných souborů a jejich skóre rozdílu je tisknuto hlavní aplikací na standardní výstup. Tento je skriptem přeměřován do souboru *results.out*. Vzhledem k přehledné organizaci souborů přímo při snímání lze z takového výstupu snadno tvořit statistiky. Příklad použití skriptu:

```
./runall.sh realpalec/l_palec_real_zk.bmp fakepalec
```

## Kapitola 7

# Vyhodnocení

Podstatou vyhodnocování je určit si materiály pro falzifikáty, které vykazují nejlepší vlastnosti. K tomu slouží navržený program, který vypočítá pro každý vzorek skóre rozdílu. Postupovat budeme následovně. Pro všechny reálné snímky vypočteme skóre rozdílu vůči falzifikátům z daného prstu a pro každý materiál si povedeme statistiky a následně vyhodnotíme vhodné materiály (vypočteme průměrné skóre pro každý materiál). Abychom nemuseli spouštět program nad celou databází ručně snímek po snímku, použijeme skript, který byl popsán v předchozí kapitole. Vyhodnocení falzifikátů proběhne pro každý prst zvlášť, dosažené skóre rozdílu zaneseme do grafu (bude počítáno vždy jako průměrné skóre všech snímků z daného materiálu). Předpoklad je, že algoritmus funguje správně a že dva různé falzifikáty ze stejných materiálů dosahují podobných kvalit. Tento předpoklad bude potvrzen, pokud výsledky v grafu z jednoho a druhého prstu budou vykazovat přibližně podobný trend.

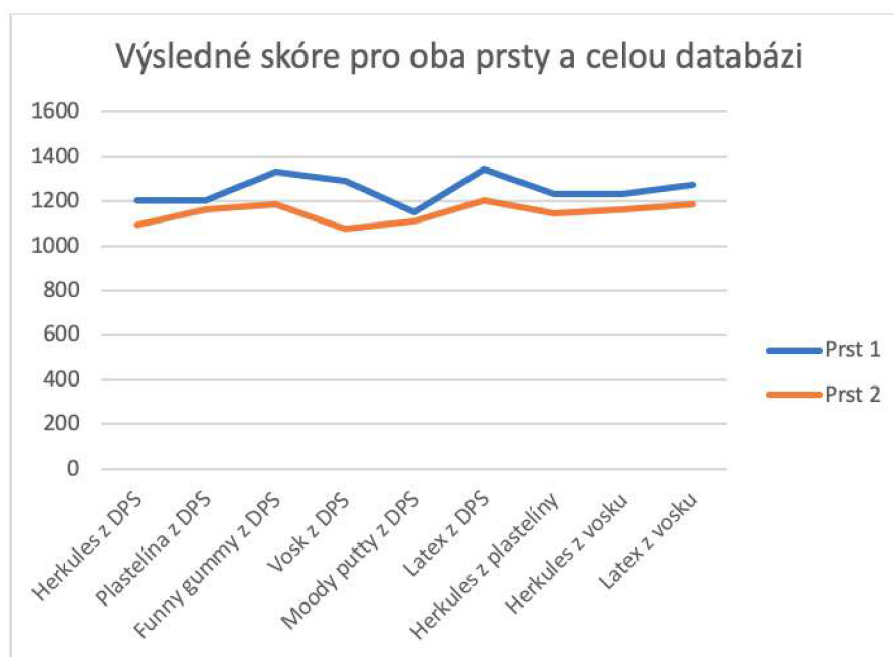
Výsledky získané navrženým algoritmem dále porovnáme s výsledky, které získáme z referenčního komerčního nástroje VeriFinger. Jelikož VeriFinger používá jiné metody a metricky, je možné, že se výsledky nebudou shodovat ve všech případech.

### 7.1 Vyhodnocení vytvořených falzifikátů

Pro vyhodnocení a analýzu falzifikátů vezmeme celou databázi falzifikátů a provedeme srovnání s každým jednotlivým snímkem reálného otisku daného prstu, který v databázi máme. Snahou je, aby se výsledky pro všechny kombinace pohybovaly v podobném rozmezí. Skóre se při analýze některých reálných otisků s databází falzifikátů může pohybovat v různém rozmezí, což je vlastnost této metody. Je proto dobré použít příslušný vhodný práh Harri-sova detektoru, který je obvykle 130 až 180). Určení prahu nemá vliv, pokud určíme skóre rozdílu mezi celou databází falzifikátů a jedním originálem. Pokud však skóre rozdílu určujeme pro více více originálů a celou databázi, je třeba práh určit tak, aby se nám hodnoty pohybovaly ve stejném rozsahu.

Získané výsledky jsou vyneseny do grafu na obrázku 7.1. Na ose x jsou jednotlivé materiály, které byly použity pro tvorbu falzifikátů otisků prstů a na ose y je dosažené skóre pro každý materiál. Skóre rozdílu odráží větší či menší rozdílnost zadaných vzorků, vyšší hodnota značí větší rozdílnost a tedy méně kvalitní otisk. **Prst 1**, na grafu modrá linka, znázorňuje výsledky pro levý palec zkoumaného subjektu a **prst 2**, oranžová linka, znázorňuje výsledky pro levý ukazovák zkoumaného subjektu. Skóre pro každý materiál bylo vypočteno tak, že všechny falzifikáty z daného materiálu a prstu byly analyzovány se všemi

snímky reálných otisků, získaná dílčí skóre byla zprůměrována aritmetickým průměrem. Podrobnější data jsou pak v tabulce 7.1 a 7.2



Obrázek 7.1: Graf výsledků z naimplementovaného programu pro různé materiály, které jsou v databázi nasnímány.

Tabulka 7.1: Výsledky skóre neshody pro prst 1.

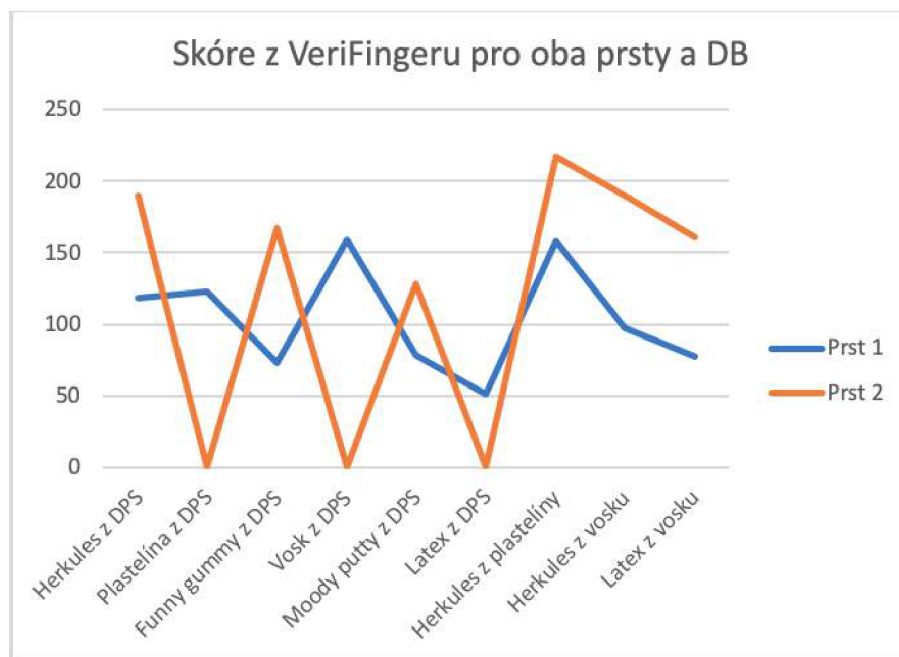
PRST 1	Min	Max	Průměr
Herkules DPS	1059	1348	1201
Plastelína DPS	1054	1399	1205
Funny gummy DPS	1089	1424	1330
Vosk DPS	1149	1344	1288
Moddy putty DPS	1119	1312	1152
Latex DPS	1209	1448	1341
Herkules z plastelíny	1085	1479	1233
Herkules z vosku	1101	1460	1232
Latex z vosku	1187	1487	1276

Tabulka 7.2: Výsledky skóre neshody pro prst 2.

PRST 2	Min	Max	Průměr
Herkules DPS	970	1243	1093
Plastelína DPS	1057	1322	1164
Funny gummy DPS	1093	1361	1185
Vosk DPS	973	1281	1076
Moddy putty DPS	1041	1154	1111
Latex DPS	1158	1260	1201
Herkules z plastelíny	1069	1328	1147
Herkules z vosku	1090	1326	1163
Latex z vosku	979	1251	1185

Z grafu na obrázku 7.1 vyplývá, že trend je pro oba analyzované prsty přibližně stejný, tedy že navržený algoritmus je konzistentní ve svých výsledcích. V tabulkách 7.1 a 7.2 je viditelné, že pro většinu materiálů je poměrně velké rozpětí, což je však očekávaná vlastnost této metody. Žádné dva falzifikáty nejsou naprosto stejné, dokonce naopak i dva falzifikáty ze stejného materiálu a prstu mohou na snímku vypadat rozdílně. Vznik těchto rozdílů je ovlivněn podmínkami při načítání otisků, čistotou senzoru, tlakem a dalšími. Z grafu dále vyplývá, že z hlediska analýzy rozdílů, která byla na databázi provedena, je jedním z nejlepších materiálů pro tvorbu falzifikátů Herkules. Naopak vysoké skóre rozdílu mezi originálním a falešným otiskem prstů vykazuje latex. Lze předpokládat, že při větším množství snímků a nejlépe z více různých prstů bychom dosáhli zpřesnění výsledků. Tvorba více falzifikátů je však velmi časově náročná, neboť na profesionálně vyrobenou DPS se čeká měsíce a tvorba samotných falzifikátů a jejich skenování je pak zatíženo okolnostmi popsány v podkapitole 5.5.8.

Stejnou vytvořenou databázi falzifikátů necháme analyzovat komerčním softwarem VeriFinger. VeriFinger při zadání dvou vzorků vrací skóre shody. V tabulce 7.3 a 7.4 jsou uvedeny původní výsledky ze softwaru VeriFinger a počet vzorků pro každý materiál, který VeriFinger nepřijmul. V grafu na obrázku 7.2 jsou graficky znázorněny výsledky ze softwaru VeriFinger. Pro grafické srovnání obou programů v příští podkapitole, budou výsledky z VeriFingeru dále přepočítány. Materiál Funny gummy byl v případě palce i ukazováku analyzován pouze jednou, ostatní vzorky byly odmítnuty, neboť je VeriFinger nevyhodnotil, jako otisky prstů (při nastavení maximálního FAR byl otisk odmítnut s chybou BadObject). To samé platí pro Herkules odlitý z vosku v případě ukazováku a latex odlitý z vosku v případě palce. Plastelínové, voskové a latexové falzifikáty (všechny z DPS) pak nebyly v případě ukazováku akceptovány VeriFingerem vůbec. Dle VeriFingeru je materiál s nejvyšším skóre shody Herkules z plastelíny a Herkules z vosku. Rovněž dobrého skóre dosáhl vosk, ale pouze v případě palce, v případě ukazováku snímky nebyly přijmuty.



Obrázek 7.2: Graf výsledků z naimplementovaného programu pro různé materiály, které jsou v databázi nasnímány.

Tabulka 7.3: Výsledky skóre shody ze softwaru VeriFinger pro prst 1.

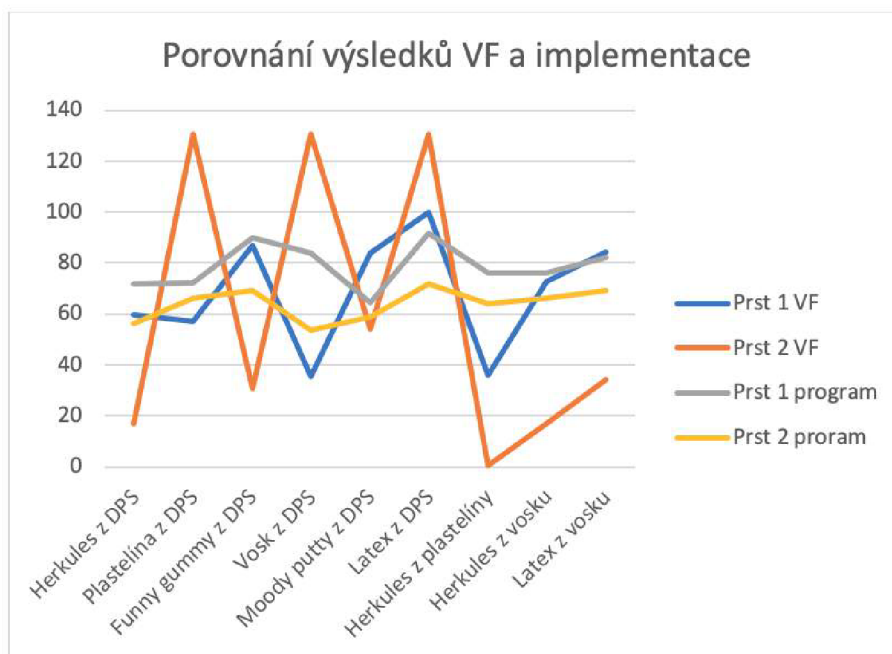
PRST 1	Min	Max	Průměr	Počet nepřijmutých vzorků
Herkules DPS	81	154	118	0
Plastelína DPS	87	153	123	1
Funny gummy DPS	73	73	73	3
Vosk DPS	158	160	159	0
Moddy putty DPS	33	173	78	1
Latex DPS	31	77	51	1
Herkules z plastelíny	90	278	158	3
Herkules z vosku	68	127	97	1
Latex z vosku	77	77	77	2

Tabulka 7.4: Výsledky skóre shody ze softwaru VeriFinger pro prst 2.

PRST 2	Min	Max	Průměr	Počet nepřijmutých vzorků
Herkules DPS	190	190	190	3
Plastelína DPS	x	x	x	4
Funny gummy DPS	167	167	167	3
Vosk DPS	x	x	x	4
Moddy putty DPS	89	188	128	0
Latex DPS	x	x	x	3
Herkules z plastelíny	173	249	217	1
Herkules z vosku	190	190	190	3
Latex z vosku	157	165	161	0

## 7.2 Vyhodnocení algoritmu

Jak už bylo v předchozí podkapitole zmíněno, pro grafickou reprezentaci bylo vhodné výsledky z VeriFingeru přepočítat tak, aby odrážely skóre Neshody a výsledky dále normalizovat, aby byly v rozmezí hodnot 0 až 100, přičemž blíže k 0 jsou lepší výsledky (menší míra neshody) a blíže ke 100 jsou horší výsledky (větší míra neshody). Hodnota 120 je vyhrazena pro nepříjate otisky. Normalizace výsledků z navrženého algoritmu proběhla tak, že všechny výsledky byly děleny hodnotou 7 a následně byla od všech výsledků odečtena konstanta 100. Výsledky z VeriFingeru byly nejprve invertovány, aby odrážely opačný trend. Následně byla k výsledkům přičtena konstanta 218, aby byly výsledky v kladné části osy y tohoto grafu a dále byly výsledky pronásobeny tak, aby byly v rozsahu 0 až 100. O validitě provedených operací svědčí fakt, že tvary jednotlivých linek (všechny pochází z předchozích obrázků) zůstaly nezměněny. Pouze z VeriFingeru je trend obrácený (což byl cíl) a hodnoty výsledků z obou programů se pohybují ve stejném rozsahu.



Obrázek 7.3: Graf z normalizovaných a přepočítaných výsledků aplikace VeriFinger (modrá a oranžová) a z naimplementované aplikace (šedá a žlutá).

Je patrné, že oba prsty a oba programy vykazují podobný trend (s opomenutím těch, které nebyly přijmuty) a tedy VeriFinger je ve svých výsledcích konzistentní. To samé lze říct i o navržené aplikaci. Při srovnání průběhů na grafu z obrázku 7.3 je pak viditelné, zejména u linek pro prst 1 (modrá a šedá), že trendy výsledků z obou programů vykazují stejné vlastnosti na přijatelné úrovni.

Oba softwary se shodnou na tom, že materiálem s dobrými výsledky je Herkules ve všech podobách (dle VeriFingeru je však výrazně lepší oproti ostatním materiálům). Stejně tak se oba softwary shodují, že latex je dle metrik těchto softwarů, materiál jedním z nejhorších výsledků. Neshoda je pak u materiálu Moody putty, kdy dle výsledků našeho programu jde o materiál s dobrým skóre a v případě VeriFingeru jde o materiál s jedním z nejhorších



skóre. Navrženou metodu a naimplementovaný program tedy lze na základě těchto výsledků prohlásit za přijatelně funkční.

## Kapitola 8

# Závěr

Hlavním cílem práce bylo seznámit se s tvorbou falzifikátů otisků prstů a vytvořit databázi, která najde v praxi uplatnění, jelikož falzifikáty otisků prstů jsou sice známým, ale ne příliš bohatě zdokumentovaným problémem. Vedle tvorby databáze byla dalším cílem také tvorba programu, který tyto vytvořené falzifikáty vhodným způsobem zhodnotí a zanalyzuje oproti reálným otiskům.

Zadání práce obsahuje 6 bodů. Prvním bodem bylo seznámení se s otisky prstů, falzifikáty otisků prstů a jejich tvorba. Druhým bodem byla samotná tvorba databáze falzifikátů otisků prstů. Dále návrh metody, která by dané falzifikáty dokázala analyzovat oproti originálnímu otisku prstů, její následná implementace, otestování dosažených výsledků a jejich shrnutí. Všechny body zadání byly splněny, jak ukazuje text dále.

Výsledkem studia literatury je seznámení se s problematikou falzifikátů otisků prstů. Seznámil jsem se s otisky prstů z obecnějšího hlediska, tedy například proč a jak otisky prstů vznikají a jakým způsobem jsou použity k rozpoznávání v biometrických systémech. Dále jsem se seznámil s falzifikáty otisků prstů, technikami jejich výroby a materiály, které se na výrobu falzifikátů otisků prstů dají použít. Následně jsem studoval techniky zpracování obrazu pro práci s otisky prstů, tedy jak probíhá proces zpracování otisků prstů a jak blíže fungují konkrétní metody.

Abych mohl přistoupit k nasnímání vytvořené databáze, musel jsem se seznámit s příslušným vybavením laboratoře biometrických systémů, které slouží ke snímání otisků prstů. Na základě těchto získaných znalostí jsem vytvořil databázi falzifikátů otisků. Při výrobě a snímání falešných otisků jsem kladl důraz na kvalitu vzorků, tedy aby výsledné snímky co nejlépe reprezentovaly skutečnou podobu těchto falzifikátů. Jako nejlepší materiál dle výpočtů se jeví Herkules z vosku.

Navržený algoritmus byl implementován v jazyce C++ s využitím knihovny OpenCV. Hotový program provádí analýzu rozdílů a výsledky vrací v podobě skóre rozdílů. Toto skóre rozdílů bylo vypočteno pro celou databázi falzifikátů, přičemž analýza rozdílů se prováděla proti všem vytvořeným snímkům reálných otisků prstů z daného prstu. Skóre rozdílů bylo zprůměrováno pro každý materiál. Z uvedeného grafu na obrázku 7.1 je patrné, že trend je v rámci falzifikátů pro oba prsty stejný (s drobnými odchylkami), a tedy že navržený algoritmus je konzistentní ve svých výsledcích. Přesnějších výsledků bychom pak mohli dosáhnout, pokud bychom měli rozsáhlejší databázi falzifikátů a nejlépe více zkoumaných subjektů, kteří jsou ochotni poskytnout v rámci výzkumu své otisky prstů. Pořízené snímky by pak bylo vhodné podrobit podobné analýze, jako v případě této práce. Větší množství subjektů a vzorků by přineslo větší rozmanitost výsledků, ale také zpřesnění těch stávajících.

Dalším námětem by pak mohlo být provedení analýzy pro další nové materiály. Z tohoto hlediska jsou možnosti prakticky neomezené.

Aby bylo možné zhodnotit kvalitu daného řešení, potažmo navržené metody analýzy rozdílů, porovnal jsem výsledky s komerčním nástrojem VeriFinger. Jelikož VeriFinger umí vypočítat pro dva otisky míru shody a můj program počítá naopak míru neshody, výsledky z VeriFingeru jsem přepočítal tak, aby trendy z obou softwarů měly stejný význam. Jelikož VeriFinger část otisků vyhodnotil, jako příliš nekvalitní, či tvarem nevyhovující, nebylo možné porovnat celou databázi. Z dostupných výsledků (graf na obrázku 7.3) je nicméně patrné, že trendy navrženého programu i softwaru VeriFinger se ve většině případů shodují.

# Literatura

- [1] Champod, E. M., C.: *Forgeries of Fingerprints in Forensic Science, Handbook of Biometrics Anti-Spoofing*. Springer, 2014, ISBN 978-1-4471-6523-1.
- [2] Drahanský, M.: *Fingerprint recognition technology - related topics*. LAP: Lambert Academic Publishing, 2011, ISBN 978-3-8443-3007-6, 172 s.
- [3] Drahanský, M.: *Hand-based biometrics: Methods and technology*. IET: The Institution of Engineering and Technology, 2018, ISBN 978-1-78561-224-4, 448 s.
- [4] Drahanský, M.; Orság, F.; Doležel, M.; aj.: *Biometrie*. Computer Press, s.r.o, první vydání, 2011, ISBN 978-80-254-8979-6, 294 s.  
URL [http://www.fit.vutbr.cz/research/view\\_pub.php.cs?id=9468](http://www.fit.vutbr.cz/research/view_pub.php.cs?id=9468)
- [5] Harris, C.; Stephens, M.: *A combined corner and edge detector*. 1988, doi:10.5244/C.2.23.  
URL <http://www.bmva.org/bmvc/1988/avc-88-023.pdf>
- [6] Hong, L.; Wan, Y.; Jain, A.: *Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1998, doi:10.1109/34.709565.
- [7] Howse, J.; Puttemans, S.; Hua, Q.; aj.: *OpenCV 3 Blueprints*. Packt Publishing, 2015, ISBN 978-1-78439-975-7, 382 s.
- [8] Jadhav, J. B.; Joshi, M. V.; Hire, V.: *Fingerprint Verification Using Gabor Filter*. [Online; navštíveno 11.5.2020].  
URL <https://pdfs.semanticscholar.org/2a7d/ceb90c6a695c226817c83aff269d1548d51c.pdf>
- [9] Maltoni, D.; Mario, D.; Jain, A.; aj.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer India, 2009, ISBN 978-1-4471-6523-1, 512 s.
- [10] opencv.org: *cv::DescriptorMatcher Class Reference*. [Online; navštíveno 29.4.2020].  
URL [https://docs.opencv.org/3.4/db/d39/classcv\\_1\\_1DescriptorMatcher.html](https://docs.opencv.org/3.4/db/d39/classcv_1_1DescriptorMatcher.html)
- [11] opencv.org: *Drawing functions*. [Online; navštíveno 29.4.2020].  
URL [https://docs.opencv.org/2.4/modules/core/doc/drawing\\_functions.html](https://docs.opencv.org/2.4/modules/core/doc/drawing_functions.html)
- [12] opencv.org: *Harris corner detector*. [Online; navštíveno 29.4.2020].  
URL [https://docs.opencv.org/3.4/d4/d7d/tutorial\\_harris\\_detector.html](https://docs.opencv.org/3.4/d4/d7d/tutorial_harris_detector.html)
- [13] opencv.org: *Image Thresholding*. [Online; navštíveno 29.4.2020].  
URL [https://docs.opencv.org/master/d7/d4d/tutorial\\_py\\_thresholding.html](https://docs.opencv.org/master/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html)

- [14] Petr Moravec: *Čtečky otisku prstů pod drobnohledem – jak fungují?* [Online; navštíveno 25.3.2020].  
URL <https://mobilizujeme.cz/clanky/ctecky-otisku-prstu-pod-drobnohledem-jak-funguji>
- [15] Rak, R.; Matyáš, V.; Říha, Z.: *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. Grada Publishing, 2008, ISBN 978-80-247-2365-5., 664 s.
- [16] Straus, J.; Porada, V.; aj.: *Kriminalistická daktyloskopie*. Policejní akademie ČR a Kriminalistický ústav Praha Policie ČR, 2005, ISBN 80-7251-192-0, 286 s.
- [17] VeriFinger: *EikonTouch 710 fingerprint reader*. [Online; navštíveno 29.4.2020].  
URL <https://www.neurotechnology.com/fingerprint-scanner-digitalpersona-eikontouch-710.html>
- [18] Yang, L.; Oyen, D.; Wohlberg, B.: *A Novel Algorithm for Skeleton Extraction From Images Using Topological Graph Analysis*. 2019, doi:10.1109/CVPRW.2019.00152.  
URL [https://www.researchgate.net/publication/333908171\\_A\\_Novel\\_Algorithm\\_for\\_Skeleton\\_Extraction\\_From\\_Images\\_Using\\_Topological\\_G](https://www.researchgate.net/publication/333908171_A_Novel_Algorithm_for_Skeleton_Extraction_From_Images_Using_Topological_G)
- [19] Yousefi, J.: *Image Binarization using Otsu Thresholding Algorithm*. 2015, doi:10.13140/RG.2.1.4758.9284, [Online; navštíveno 11.5.2020].  
URL [https://www.researchgate.net/publication/277076039\\_Image\\_Binarization\\_using\\_Otsu\\_Thresholding\\_Algorithm](https://www.researchgate.net/publication/277076039_Image_Binarization_using_Otsu_Thresholding_Algorithm)
- [20] ZKTECO CO., LTD: *ZKTECO SLK20R*. [Online; navštíveno 29.4.2020].  
URL [https://www.zkteco.com/en/product\\_detail/SLK20R.html](https://www.zkteco.com/en/product_detail/SLK20R.html)

# Příloha A

## Obsah přiloženého média

- Adresář Latex obsahující zdrojové soubory  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ projektu, potřebné k překladu.
- Elektronická verze této práce ve formátu PDF (bp.pdf).
- Adresář vzorky\_fakepalec, obsahující falzifikáty otisků prstů palce zkoumaného subjektu.
- Adresář vzorky\_fakeukazovak, obsahující falzifikáty otisků prstů ukazováku zkoumaného subjektu.
- Adresář vzorky\_realpalec, obsahující reálné snímky otisků prstů palce zkoumaného subjektu.
- Adresář vzorky\_realukazovak, obsahující reálné snímky otisků prstů ukazováku zkoumaného subjektu.
- Main.cpp, zdrojový soubor programu provádějícího analýzu rozdílů.
- Makefile zajišťující správný překlad.
- Runall.sh, skript, který spouští přeložený program po více snímků najednou.
- Readme.rtf, stručný návod, jak s programem pracovat.