



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**EXTRAKCE PODROBNÝCH INFORMACÍ Z PLASTICKÝCH OTISKŮ PRSTŮ**

EXTRACTION OF DETAILED INFORMATION FROM PLASTIC FINGERPRINTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**TOMÁŠ KRŠIČKA**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ONDŘEJ KANICH, Ph.D.**

BRNO 2022

## Zadání bakalářské práce



Student: **Krsička Tomáš**  
Program: Informační technologie  
Název: **Extrakce podrobných informací z plastických otisků prstů**  
**Extraction of Detailed Information from Plastic Fingerprints**  
Kategorie: Zpracování obrazu

### Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se rozpoznávání podle otisků prstů, soustřed'te se na metody předzpracování otisku prstu. Seznamte se se vznikem a vývojem otisku prstu resp. papilárních linií na prstech.
2. Navrhněte aplikaci pro získávání podrobných informací o plastických otiscích prstů. Zejména se jedná o zjištění hustoty, šířky a směru papilárních linií v oblastech s dostatečnou kvalitou. Získané informace aplikace vhodně graficky znázorní, umožní jejich export a statisticky zpracuje.
3. Navrženou aplikaci z předchozího bodu implementujte.
4. Otestujte funkčnost implementované aplikace na alespoň malé ručně anotované databázi. Zhodnoťte zda existují rozdíly v extrahovaných datech mezi jednotlivými osobami (např. podle věku, pohlaví, rasy, apod.).
5. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná rozšíření vašeho řešení.

### Literatura:

- Dražanský, M.: *Hand-Based Biometrics: Methods and technology*, IET 2018, p. 430, ISBN 978-1-78561-224-4.
- Maltoni, D., Maio, D., Jain, A.K. and Prabhakar, S.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2009, p. 512. ISBN 978-1-8488-2254-2.
- U.S. Department of Justice: *The Fingerprint Sourcebook*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, p. 428. ISBN 978-1502828422.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

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

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

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

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 9. března 2022

## Abstrakt

Práce se zabývá automatickou analýzou plastických otisků prstů a extrakcí statistických informací z nich. Aplikace za pomoci algoritmu pro zvýraznění textury oddělí oblast s otiskem a z ní získá šířku a hustotu papilárních linií. Naměřené hodnoty jsou poté převedeny pomocí automaticky získaného ppi na mm a vhodně exportovány. Tyto informace lze následně použít pro odhadnutí věku člověka, který tento otisk zanechal. Výsledky na většině dat prokázaly větší šířku linií u mužů a zvětšující se šířku s věkem.

## Abstract

This thesis deals with automatic analysis of plastic fingerprints and extraction of statistic information from them. The application uses a texture highlighting algorithm to separate the area that includes the fingerprint and extracts the width and density of papillary ridges. These values are then converted into mm and appropriately exported. This information can then be used to estimate the age of the owner of the fingerprint. The results of the analysis of most of the data have shown wider ridges in male fingerprints and a growing width of ridges with the age of the owner.

## Klíčová slova

otisky prstů, plastické otisky prstů, papilární linie, zpracování obrazu

## Keywords

fingerprints, plastic fingerprints, papillary ridges, image processing

## Citace

KRSIČKA, Tomáš. *Extrakce podrobných informací z plastických otisků prstů*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich, Ph.D.

# Extrakce podrobných informací z plastických otisků prstů

## Prohlášení

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

.....

Tomáš Krsička

9. května 2022

## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Ondřejovi Kanichovi Ph.D. za vedení této bakalářské práce. Dále chci poděkovat svým přátelům za gramatickou kontrolu a cennou konzultaci týkající se fyziologie.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Rozpoznání podle otisků prstů</b>	<b>4</b>
2.1	Biometrie . . . . .	4
2.2	Fyziologie a vývoj otisků prstů . . . . .	5
2.3	Porovnání a klasifikace otisků prstů . . . . .	9
2.4	Snímání otisků prstů . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Otisky prstů zanechané neúmyslně</b>	<b>12</b>
3.1	Plastické otisky prstů . . . . .	12
3.2	Latentní otisky prstů . . . . .	13
3.3	Vliv prstu a povrchu na kvalitu otisku . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Předzpracování otisků prstů</b>	<b>18</b>
4.1	Segmentace obrazu . . . . .	18
4.2	Normalizace . . . . .	19
4.3	Výpočet pole orientací . . . . .	20
4.4	Odhad lokální frekvence . . . . .	22
4.5	Filtrování . . . . .	23
4.6	Binarizace a zúžení papilárních linií . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Návrh aplikace</b>	<b>25</b>
5.1	Architektura . . . . .	26
5.2	Režimy analýzy . . . . .	26
5.3	Extrakce informací . . . . .	27
5.4	Výstup . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Popis implementace</b>	<b>28</b>
6.1	Zjištění ppi . . . . .	28
6.2	Zvýraznění otisku a segmentace . . . . .	30
6.3	Pole orientací . . . . .	31
6.4	Normalizace a výpočet frekvence a šířky linií . . . . .	32
<b>7</b>	<b>Vyhodnocení</b>	<b>33</b>
7.1	Funkčnost a optimalizace dílčích částí zpracování . . . . .	33
7.2	Ručně anotovaná databáze . . . . .	39
7.3	Statistické zpracování databáze . . . . .	41
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>43</b>

Literatura	44
A Obsah přiložené SD karty	47
B Výsledky ručně anotované databáze	48

# Kapitola 1

## Úvod

Prvním zachovaným nálezem otisků prstů jsou kameninové výrobky staré odhadem 6000 let, o kterých se ale neví, jestli byly zanechány neúmyslně nebo s nějakým cílem, jako například pro jejich vzhled [35]. Na některých artefaktech jsou ale tvary připomínající papilární linie zanechány úmyslně. Například na vstupních kamenech v Newgrange jsou vytesané vzory připomínající právě otisk prstu [35]. Otisky prstů ale sloužily již tisíce let pro identifikaci osob. V Číně k tomuto použití mohlo docházet již 300 let před naším letopočtem [35]. V dnešní době se s použitím otisků prstů setkáváme v mnoha oblastech. Použití v kriminalistice je již standardní po delší dobu, ale dnes je již známé použití v osobních zařízeních jako přenosných počítačích a chytrých telefonech. První použití čtečky otisku prstů v telefonu bylo již v roce 2004, ale k rozšíření do více zařízení došlo až o pár let později [11].

Tato práce se zabývá převážně neúmyslně zanechanými otisky. Tyto bývají často v mnohem horším stavu než otisky ze sensorů a ostatní úmyslně zanechané, tudíž je složitější z nich získat potřebné informace. Takové otisky mohou být ale v podobě plastických otisků zachovány na vhodných materiálech po dlouho dobu, proto mohou sloužit jako způsob přiblížení života před dávnou dobou. Díky vlivu genetiky a celkového vývoje člověka na vzhled otisků lze jen z šířky a frekvence papilárních linií například odhadnout věk a pohlaví (muži a starší lidé mívali větší šířku papilárních linií než ženy a mladší lidé) osoby, která otisk zanechala, podle informací získaných z otisku. Tyto informace mohou v dnešní době pomoci i v kriminalistice pro zúžení okruhu hledaných osob.

V kapitole 2 je celkově popsána biometrie, zhodnocení otisku prstu pro použití v biometrických systémech, druhy snímačů otisků prstů, fyziologie a klasifikace, snímání a porovnávání otisků prstů. Kapitola 3 popisuje plastické a latentní otisky. Obsahuje také způsoby jejich zvýraznění a faktory ovlivňující jejich kvalitu. Kapitola 4 podrobně vysvětluje kroky předzpracování nutné pro zlepšení kvality otisku prstů nejen pro jejich rozpoznávání. V kapitole 5 je popsáno fungování aplikace, způsoby exportování výsledků a použité technologie. Kapitola 6 obsahuje popis implementace jednotlivých částí aplikace a ukázky jejího fungování na zvolených otiscích. V kapitole 7 je zhodnocení fungování aplikace a získaných výsledků.

## Kapitola 2

# Rozpoznání podle otisků prstů

Cílem této kapitoly je popsat princip rozpoznávání, klasifikaci a fyziologii otisků prstů. Předtím je potřeba definovat biometrii a pojmy související s touto vědou. V jednotlivých podkapitolách je možné se dozvědět o vhodnosti otisku prstu pro identifikaci osob, rozdělení kůže na vrstvy a jejich popis, faktorech, které ovlivňují vývoj otisku a jeho výslednou podobu a různé způsoby poškození kůže a jejich vliv na kvalitu otisku prstu.

Otisk prstu je reziduum, kterou na nějakém povrchu zanechá bříško prstu [27]. Na povrchu prstu jsou výběžky, které jsou vytvářeny papilárními liniemi. Na těchto liniích mohou být různé látky, které se po doteku na povrch přenesou. V některých případech jsou to látky na prst nanesené (inkoust), jindy jsou tvořeny přímo v kůži na prstu (pot).

### 2.1 Biometrie

Biometrie je věda, která se zabývá určováním identity člověka pomocí některých jeho znaků. Znak, podle kterých je osoba identifikovatelná, se nazývá biometrické charakteristiky. Na každé osobě se dá v daný moment analyzovat mnoho biometrických charakteristik. Jednat se může o snímek jeho otisku prstu, celé ruky, obličej, nebo také uší. Může se ale jednat i o *behaviorální* biometrickou charakteristiku, tj. jeho způsob vyjadřování, pohybu, chůze a mnoho dalších. [12, 22]

Využití biometrie má hned několik výhod oproti tradičním metodám identifikace a přihlašování (hesla, piny, atd.). Příkladem je výrazné zvýšení zabezpečení, v mnoha případech zjednodušení autentizace a detekce podvodů (v případě již existujícího záznamu biometrické charakteristiky tohoto člověka). [29]

Správný výběr biometrické charakteristiky dokáže ovlivnit použitelnost, jednoduchost, spolehlivost a cenu systému. Vhodnost použití dané biometrické charakteristiky je vyhodnocována podle následujících faktorů: [22]

1. Univerzalita: Kromě výjimek by ji měli mít všichni lidé.
2. Jedinečnost: U každé osoby by tato vlastnost měla být dostatečně unikátní.
3. Trvalost: Nemělo by docházet k její změně v průběhu času. To by znemožnilo po určité době identifikaci této osoby.
4. Měřitelnost: Mělo by být možné ji měřit a uložit v digitální podobě pro další zpracování.
5. Výkonnost: Složitost měření a zpracování vlastnosti by měla být ideálně co nejmenší.



6. Přijatelnost: Osoby, jejichž vlastnost se bude měřit, by neměly mít problém s jejím zpracováním.
7. Jednoduchost falšování: Mělo by být dostatečně složité nebo nemožné vlastnost zfalšovat a tím se identifikovat jako jiný člověk. Například vyrábění umělých otisků, nebo napodobování chování.

Neexistuje univerzálně ideální biometrická charakteristika, proto je nutné zvažovat správnou charakteristiku pro jednotlivá specifická použití. Při nasazování jakéhokoliv systému pro biometrickou identifikaci člověka je nutné si ujasnit priority výše zmíněných faktorů podle toho, které budou použitelnost charakteristiky v tomto případě nejvíce ovlivňovat.

### 2.1.1 Vlastnosti otisků prstů jako charakteristiky

Otisk prstu je nejznámější a nejvíc využívaná biometrická charakteristika. Z výše zmíněných faktorů otisk prstu uspokojuje všechny kromě jednoduchosti falšování, jelikož otisky lidé zanechávají prakticky na všem, čeho se dotknou. Jednou z hlavních výhod používání otisku prstu je dlouhá historie používání. Díky ní došlo k zvýšení spolehlivosti, rychlosti a jednoduchosti používání. Díky tomu, že čtečky mohou být malé, mohou být umístěny na místech, kde prsty odkládáme přirozeně při používání zařízení. U mobilních telefonů je to často ve vrchní části zad telefonu, pravá hrana, nebo spodní část pod displejem. Uživatelům těchto přístrojů to mnohdy zjednoduší a urychlí jejich používání. Dále je možné využít unikátnosti otisků i v rámci prstů rukou jednoho člověka. Tímto způsobem jde dosáhnout většího zabezpečení pomocí požadování dvou a více otisků. [29]

Používání otisků prstů má ale i své nevýhody. Jedna z nich je fakt, že se otisky každodenním používáním mohou dočasně poškodit nebo zašpinit. V těchto situacích spolehlivost rozpoznání čteček prudce klesá. Vlhkost prstů ve většině případů také ztěžuje spolehlivé rozpoznávání otisků. Poté je samozřejmě nutné počítat s problémem, že určité množství lidí má poškozené ruce, nebo vrozeně nemají otisky prstů. U těchto lidí je tato biometrická charakteristika nepoužitelná. S otisky prstů byla také dříve negativně spojována kriminalistika, což vedlo k tomu, že lidé v některých případech odmítli zařízení tohoto typu používat. V dnešní době se jeho používání ale stalo tak běžnou věcí, že se nad ní většina lidí nepozastaví. [29]

Genetika hraje ve vývoji a formaci otisku prstů u člověka velkou roli, avšak můžou je ovlivnit i jiné faktory. Jedná se zejména o délku pupeční šňůry, pozici v děloze, složení výživy, rychlost růstu prstů a krevní tlak dítěte v průběhu vývoje. U jednovaječných dvojčat způsobí změna ve stavu těchto detailů malé, ale přesto detekovatelné, rozdíly v otiscích prstů. U těchto párů otisků lze stále pozorovat výraznou podobnost, ale s použitím dostatečně přesné techniky měření je možné identifikovat jednotlivé dvojče z páru. [2]

## 2.2 Fyziologie a vývoj otisků prstů

Unikátní znaky pokožky se tvoří u člověka již od poloviny desátého až do konce šestnáctého týdne. Vznik těchto znaků je způsoben náhodnými procesy při vývoji plodu. Jejich výsledný tvar je ovlivněn z větší části genetikou, ale také okolím a stavem plodu při jeho růstu. Díky tomu je možné z výsledné stavby otisku odvodit vývojové podmínky a základní informace o člověku. Některé geny specifické jen pro určitou etnickou skupinu způsobují, že v této skupině budou rozdíly otisků menší než mezi touto a jinou skupinou. Takto lze rozlišit od sebe i některé druhy zvířat. [35]

Při analýze latentních otisků lze s jistou přesností zjistit, jestli se jednalo o otisk muže, nebo o otisk ženy. Může toho být dosaženo pomocí chemické analýzy. Pot v otiscích žen obsahuje až dvakrát více aminokyselin, než tomu je u mužů. Pomocí testů na další látky lze odvodit i přibližné stáří osoby a její rasu. Tato metoda by mohla kvůli rychlosti a finanční nenáročnosti pomoci urychlit vyšetřování, avšak pro naprosto spolehlivou analýzu je potřeba provést DNA test. Při nedostupnosti chemické analýzy a DNA testu lze z otisků poznat další informace o osobě, která ho zanechala, i z fotografie otisku. Jedná se zejména o její věk. S věkem se lidem rozšiřují papilární linie a zmenšuje se jejich hustota. Papilární linie se šířkou do 0,35 mm patří ve většině případů dětem mladším 15 let. Pokud šířka papilárních linií přesahuje 0,52 mm, pravděpodobně se jedná o dospělého muže. [4, 23]

Díky rapidnímu růstu dětí a s ním souvisejícím výrazným růstem prstu a rozšiřováním linií, lze u mladších dětí věk odhadnout s větší přesností, než je tomu u starších dětí nebo dospělých lidí. V případě dětí ve věku mezi 15 a 20 let začínají být viditelné rozdíly v papilárních liniích mezi muži a ženami, tudíž přestává být odhad tak přesný [23].

### 2.2.1 Epidermis

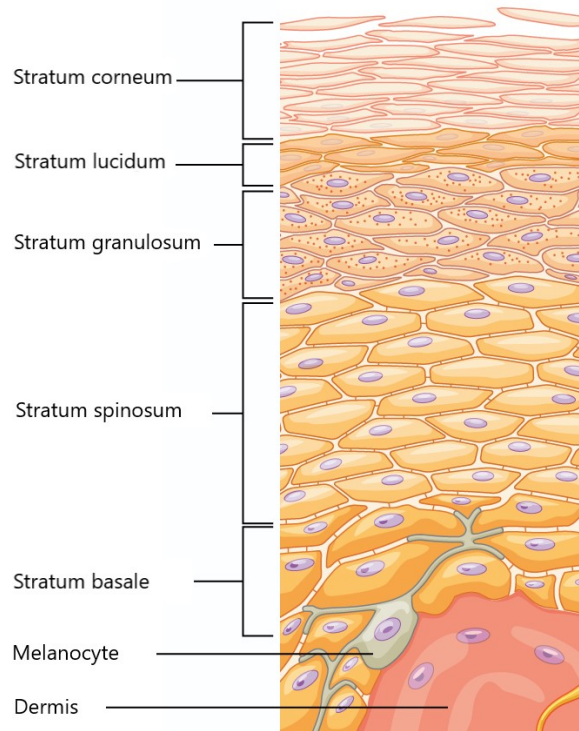
*Epidermis* (latinské slovo pro pokožku) je nejvrchnější část kůže, která obsahuje čtyři až pět vrstev v závislosti na poloze na těle. Neobsahuje žádné cévy. Může být součástí tenké kůže, kdy obsahuje základní čtyři vrstvy, nebo součástí tlusté kůže, kdy obsahuje navíc ještě vrstvu *stratum lucidum*. Buňky *epidermis* se nazývají *keratinocyty* – produkují protein *keratin*, který zajišťuje odolnost kůže. Jediná vrstva, která je neobsahuje, je *stratum basale*. [5]

Na počátku vývoje plodu je *epidermis* tvořena jednou vrstvou zvanou *ektoderm*, která je po dvou měsících vývoje rozdělena na *periderm* a *bazální vrstvu*. Poté se mezi *peridermem* a bazální vrstvou tvoří intermediální (prostřední) vrstva. Ve třetím měsíci *periderm* zaniká a tvoří se na povrchu *epidermis* zrohovatělé buňky (*stratum corneum*). [28, 31]

*Epidermis* se tedy ve finální fázi dělí na čtyři hlavní vrstvy (znázorněno na obrázku 2.1): [5, 3]

1. *Stratum basale* – zárodeční vrstva, slouží pro tvorbu nových kožní buněk. Je složena z *bazálních buněk*, které se mitózou dělí a vzniklé nové buňky jsou vytlačeny do vyšších vrstev.
2. *Stratum spinosum* – typicky se skládá z 5-10 buněčných vrstev, slouží pro zachování integrity kůže.
3. *Stratum granulosum* – typicky se skládá z 3-5 buněčných vrstev. Zajišťuje hydrataci a pevnost *stratum corneum*.
4. *Stratum corneum* – vnější vrstva kůže, která je tlustá patnáct až třicet buněčných vrstev. Složená ze zrohovatělých buněk, slouží k ochraně kůže před vysycháním a mikrobry. Tato vrstva je často obnovována buňkami ze *stratum granulosum* nebo *stratum lucidum*.

Mezi *stratum granulosum* a *stratum corneum* se navíc může nacházet transparentní vrstva **stratum lucidum**. Vyskytuje se pouze na částech dlaně, špičkách prstů a chodidel. Je složena z mrtvých *keratinocytů*, které slouží jako membrána proti úniku vlhkosti. [5]



Obrázek 2.1: Znázorněné vrstvy *epidermis* nad *dermis* (latinský pojem pro škáru) (převzato z [5], upraveno).

### 2.2.2 Papilární vrstva

Do *epidermis* proniká nejvrchnější vrstva *dermis* zvaná *papilární vrstva*. Tato vrstva již obsahuje cévy i tukové buňky. Jsou v ní i *fagocyty* (buňky bránící infekcím, které proniknou vrchnějšími vrstvami kůže), nervové ukončení a *mechanoreceptory* (receptory reagující na dotek). Svým pronikáním do bazální vrstvy tvoří papilární vrstva papilární linie. [5]

Papilární linie se dělí na primární a sekundární. Z důvodu většího mechanického zatížení je vrstva *keratinu* odolnější u primárních linií, než tomu je u linií sekundárních. Pod primárními liniemi je navíc mezi *stratum basale* a *stratum spinosum* ještě suprabazální vrstva, která slouží k většímu množení *keratinocytů*. V bazální vrstvě mitózou vytvořené *keratinocyty* jsou vytlačeny před přechodem do *stratum spinosum* do suprabazální vrstvy. Zde dojde k dělení nové buňky, což má za následek větší zpevnění primárních linií. Jelikož u sekundárních linií k tomuto přechodnému dělení nedochází, je *epidermis* v těchto místech tvořena menším počtem buněk. [35]

### 2.2.3 Vývoj otisků

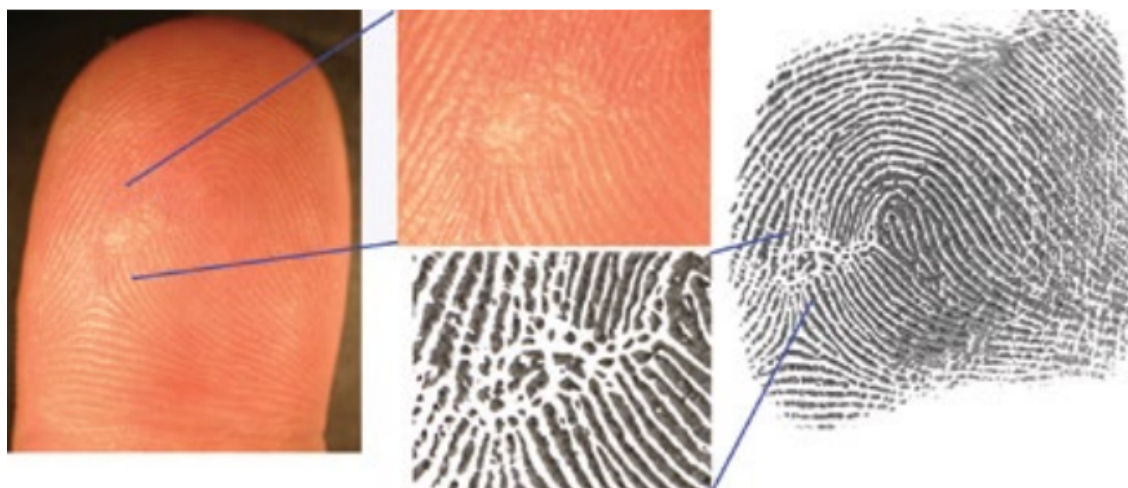
Již po šestém týdnu po početí je možné na ruce plodu rozeznat *volární plochy*. Jedná se o části na dlani ruky, na kterých se v následující době vývoje budou formovat papilární linie do otisků. K dokončení jejich vývoje dojde až v patnáctém týdnu vývoje plodu. V desátém týdnu vývoje je možné pozorovat první náznaky primárních linií, které jsou vidět jako výstupky pod *epidermis*. Dle provedených výzkumů vývoj papilárních linií úzce souvisí s vývojem nervového systému v prstech. Těsně před prvními znaky papilárních linií je oblast inervována. To může znamenat, že inervace je spouštěčem pro jejich vývoj. [35, 15]

V průběhu dalších pěti týdnů se primární linie stávají výraznější a prostupují hlouběji do *dermis*. Jako důvod pro vývoj jednotlivých markantů je obecně považováno zvětšování prstu a natahování samotné kůže, které v některých případech způsobí rozdělení existujících primárních linií. Dále k tomu může přispět i formování nových primárních linií. [35]

Sekundární linie se začínají tvořit mezi patnáctým a sedmnáctým týdnem. V tento čas už je rozložení markantů neměnné. Sekundární linie slouží k pevnějšímu uchycení k *dermis*, zatímco primární linie musí rychleji se dělicí buňky (viz sekce 2.2.2) tlačit směrem k povrchu kůže. Tímto způsobem se otisk prstu propaguje na *epidermis*. [35]

#### 2.2.4 Poškození otisků prstů

Kůže, jakožto vnější vrstva, je vystavována nejčastěji nepříznivým podmínkám, které mohou způsobit její poškození. Pokud toto poškození způsobí pouze narušení *epidermis*, dojde k jeho opravení pomocí množení *keratinocytů* v bazální vrstvě. Toto zahojení nenechá na kůži viditelné znaky a nepoškodí se tím tedy ani otisk prstu. Pokud poškození zasahuje i do *dermis*, reakcí je krvácení a koagulace (srážení) krve v místě rány. V místě se zvětší okysličení a vrstva je opravena, než se začne regenerovat *epidermis*. Toto již může zanechat jizvy. Papilární linie se ale neregenerují, tudíž na jejich místě je kůže světlejší a bez otisků (vliv jizvy na otisk je vidět na obrázku 2.2). Jizvy jsou ale díky náhodným jevům při jejich tvoření rovněž unikátní, proto je lze při analýze otisků prstů též použít k jejich rozlišení a porovnávání. [35, 5]



Obrázek 2.2: Ukázka jizvy na prstu a jejího vlivu na otisk prstu z inkoustu (převzato z [35]).

Popáleniny mohou zanechat na kůži rozsáhlé jizvy. Dělí se na čtyři stupně. Při prvním se jedná pouze o poškození *epidermis* (spáleniny od slunce, tření, atd.). Druhý už zasahuje i do *dermis* a může způsobit tvoření puchýřů a natečení poškozené oblasti. Třetí stupeň popálení znamená zranění nervových ukončení a silné poškození *dermis*. Od tohoto stupně je nutná odborná pomoc. Při čtvrté je poškozena i svalová tkáň nebo kost. Již třetí stupeň poškození nemůže ve většině případů tělo léčit samo, protože tkáň zodpovědná za regeneraci této oblasti, je neobnovitelně zničena. [5]

Otisky prstů se mění i stárnutím člověka a jeho kůže. Kůže je ve stáří méně elastická a rozdíl mezi brázdami a výběžky se zmenšují, tím je zmenšená výraznost přechodů mezi nimi, tudíž ztíženo rozpoznávání otisků. Toto je způsobeno ztenčením výběžků v průběhu

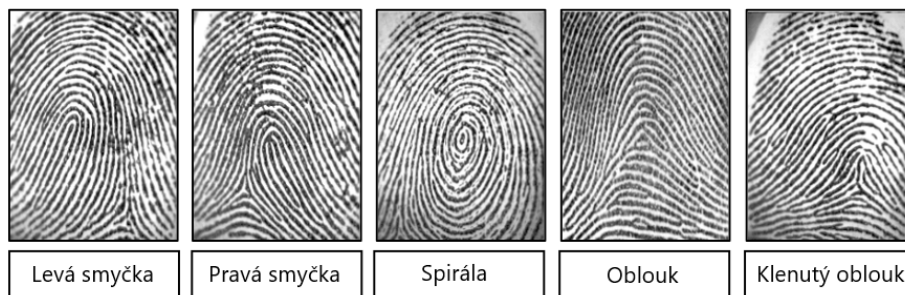
let. Ve staří může otisk ovlivnit i tvorba vrásek. Ve výsledku nejsou tyto změny až tak výrazné, aby znemožnily úspěšné rozpoznání otisků prstů u staršího člověka. V kombinaci s náhodným poškozením kůže na prstech to ale může znamenat ztížení nebo i znemožnění efektivní analýzy otisku. [35]

Lidé se ale snažili změny otisků dosáhnout i úmyslně. Nejčastější způsoby se dělí do následujících kategorií: [24]

- Zničení – ke zničení může dojít spálením, pořezáním, leptáním chemikáliemi, transplantováním jiné kůže a dalšími způsoby.
- Zkreslení – této změny lze dosáhnout plastickou chirurgií. Části kůže na prstech jsou odebrány a transplantovány zpět v jiné orientaci. Při identifikaci otisků prstů se tato změna dá detekovat, jelikož většinou způsobí nepřírozené přerušování v otisku. Tyto regiony poté mohou být v analýze označeny jako neplatné a dále neanalyzované. Druhým způsobem je identifikované regiony rekonstruovat do původní podoby.
- Imitace – transplantace celého otisku z jiné části těla stejného nebo i jiného člověka. Do této kategorie spadá i umělé vyrývání tvaru otisků do hladké kůže. Tato metoda je pomocí automatických analyzátorů prakticky nedetekovatelná, ale její realizace je téměř neproveditelná.

## 2.3 Porovnání a klasifikace otisků prstů

První rozšířený systém pro klasifikaci otisků prstů byl Henryho klasifikační systém [27]. Ten rozděluje všechny otisky prstů do pěti hlavních kategorií: levá smyčka, pravá smyčka, spirála, oblouk a klenutý oblouk. Toto rozdělení slouží hlavně pro zefektivnění hledání shod v otiscích. Díky němu je nutné porovnávat otisky jen z části databáze odpovídající této kategorii. Příklad otisků v jednotlivých kategoriích jsou vidět na obrázku 2.3. [27]

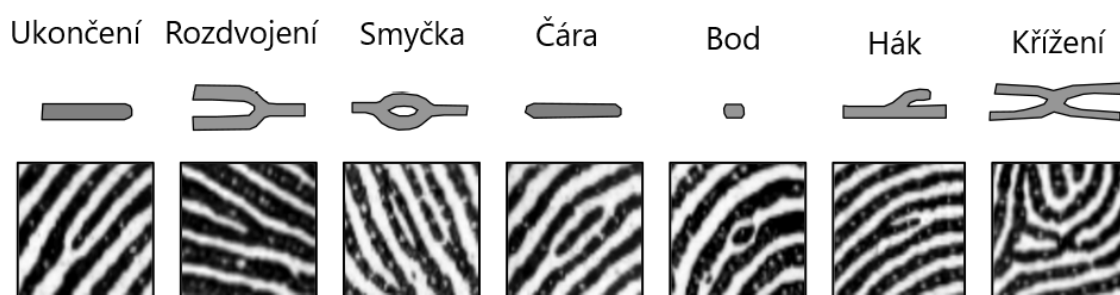


Obrázek 2.3: Příklad otisků prstů v pěti kategoriích Henryho klasifikačního systému (převzato z [27], upraveno).

Detaily papilárních linií jsou obecně popisovány ve třech úrovních. 1. úroveň (globální, tvar celkového plynutí výběžků, singularity), 2. úroveň (markanty), 3. úroveň (póry, lokální tvary okrajů výběžků, atd.) [27].

Při analýze otisku na globální úrovni je otisk klasifikován do hlavních tříd a na otisku jsou hledány singularity (jádro a delta). Jádro otisku je střed nejvrchnější smyčky. Pokud otisk smyčku neobsahuje, je použito místo, kde jsou papilární linie nejvíce zakřivené. Delta je definována jako čtverce nebo trojúhelníky tvořené papilárními liniemi v otisku. Při porovnávání otisků je nutné otisky zarovnat, přičemž je jádro běžně použito jako střed zarovnání. [27, 35]

Na druhé úrovni dochází k analýze markantů. To jsou podrobnější útvary, které lze na otiscích prstů pozorovat. Mezi nejčastější markanty patří: ukončení, rozdvojení, smyčka, čára, bod, hák, křížení. Markanty lze vidět na obrázku 2.4. Většinou se právě markanty používají pro automatické porovnávání otisků prstů. Otisky, které mají na stejných místech (po zarovnání) dostatečný počet markantů, jsou považovány za shodné. Otisky prstů mohou mít až 100 jednotlivých markantů, ale pro označení dvou otisků jako shodné stačí, aby měly shodný mnohem menší počet markantů. Typicky stačí 10 shodných markantů. Při manuálním porovnávání otisků se zaznamenává pozice každého nalezeného markantu. Při automatizovaném porovnávání jsou ale většinou zohledňovány jen zakončení a rozdvojení, protože je složitější další typy spolehlivě rozeznat. Pokud je snímek otisku prstu dostatečně kvalitní, je možné provést analýzu i na třetí úrovni. Zde se již zkoumají přímo póry pokožky a jednotlivé papilární linie, jejich tvary a útvary na nich. [27, 35]



Obrázek 2.4: Ukázky markantů (převzato z [27], upraveno).

## 2.4 Snímání otisků prstů

V začátcích používání otisků prstů pro identifikaci zločinců bezpečnostními složkami byly otisky prstů získávány pomocí jejich otisknutí inkoustem na papírovou kartu, která byla následně naskenována pomocí klasického skeneru na papír. Dnes již ale probíhá získávání otisků rovnou ze snímačů otisků prstů přímo do digitální podoby. Otisky prstů se podle druhu snímání dělí na 3 skupiny:

- Válené – otisky jsou sbírány pomocí válení prstu s inkoustem na papírové kartě. Také je možné získávat takto otisky válením prstu po čtecí ploše a získané snímky skládat dohromady pro vytvoření jednoho snímku celého otisku. Tato technika má výhodu v zachycení celého otisku až do krajů bříška prstu. Takto získané otisky obsahují informace i o stranách prstu, což může pomoci při identifikaci nekompletních neúmyslně zanechaných otisků. [27]
- Píchané – vznikají přiložením prstu na čtecí plochu čtečky otisků prstů. Výsledný obraz je rovnou elektronicky, není třeba používat skener na karty. Snímají pouze malou část otisku. Dostatečné pro identifikaci v rámci přihlašování do zařízení nebo autentizace plateb na přenosných zařízeních. [27]
- Otisky zanechané neúmyslně – často v podstatně horším stavu než předchozí dvě kategorie. Jsou podrobněji popsány v kapitole 3. Někdy nazývané také latentní, ale pro odlišení této kategorie a otisků, které jsou pouhým okem neviditelné, bude v této práci používáno označení *neúmyslně zanechané*.

### 2.4.1 Typy senzorů otisků prstů

Pro získání píchaných otisků prstů se používají různé technologie senzorů. Nejčastěji jsou optické a kapacitní. Dále se v některých případech používají i ultrazvukové.

**Optická** technologie je nejstarší z trojice. Prst se dotkne sklíčka na jedné straně hranolu. Na dalších stranách hranolu jsou zdroj světla a CCD nebo CMOS snímač. Výběžky otisku světlo odrazí přímo do snímače, ale brázdy ho rozptýlí. Díky tomu jsou na výsledném obrazu výběžky světlejší a brázdy tmavší. Existují i bezkontaktní čtečky, které pomocí většího množství senzorů dokáží zrekonstruovat 3D obraz otisku. Kromě toho se používají jako alternativa k ultrazvukovým čtečkám otisků pod displejem. Nevýhoda je jejich citlivost na nečistoty a nízkou teplotu. [27, 22]

**Kapacitní senzor** je složen z malých vodivých ploch, které jsou pod nevodivou vrstvou. Prst se dotýká vrchní vrstvy senzoru (nevodivé vrstvy). Jelikož jsou vodivé plochy menší než šířka papilárních linií, můžou kondenzátory detekovat změnu napětí pod výběžkem oproti napětí pod brázdou. [22]

**Ultrazvukové senzory** se používají v některých mobilních telefonech pro čtení otisku přímo v oblasti displeje. Tato technologie je možná díky používání OLED panelů v novějších telefonech. Původní ultrazvukové senzory fungovaly na principu rotujícího vysílače, který byl i přijímač. Výhodou ultrazvukové technologie je také schopnost rozpoznat falešné otisky díky tomu, že ultrazvukové vlny pronikají hlouběji pod povrch kůže. Novější senzory používané pod displejem telefonů již rotující komponentu nepoužívají. [12]

## Kapitola 3

# Otisky prstů zanechané neúmyslně

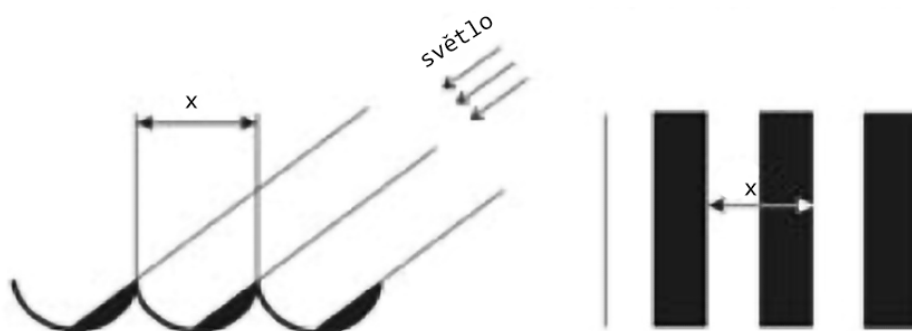
Otisky zanechané neúmyslně se dělí na tři hlavní skupiny. **Patentní otisky** jsou viditelné pouhým okem bez pomoci dalších nástrojů nebo úprav. Jsou zanechané prstem pokrytým viditelnými nečistotami (inkoust, krev, atd.). **Latentní otisky** jsou otisky, které pouhým okem viditelné nejsou. Pro jejich analýzu je zapotřebí otisk nějakým způsobem upravit. Vznikne otisknutím prstu na nějaký materiál, na kterém následně zůstane stopa potu z prstu. **Plastické otisky** vznikají, pokud je hmota, do které se prst otiskne, jednodušeji deformovatelná. Vznikne trojrozměrný otisk. Může se jednat o žvýkačku, vosk, roztavený materiál, atd. [35]

Cílem této kapitoly je popsat plastické a latentní otisky, způsoby jejich zviditelnění, zvýraznění a jejich uchovávání jak fyzické, tak elektronické. Dále kapitola popisuje faktory, které mohou kvalitou otisku ovlivnit a v jakých případech vzniká otisk latentní a v jakých plastický. Specificky plastickým otiskům se zabývá málo zdrojů, ale informace popsané v kapitole 3.3 se vztahují z větší části k plastickým i latentním otiskům.

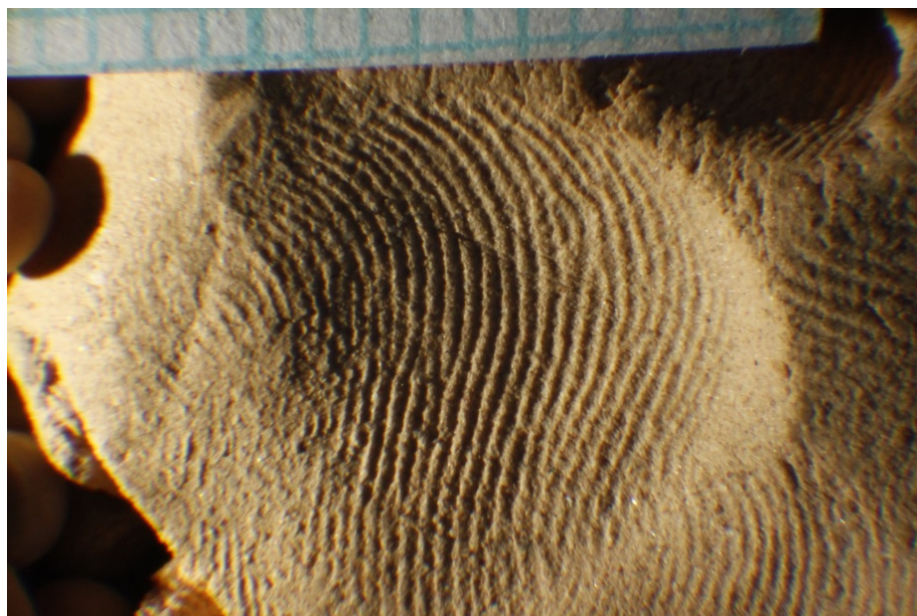
### 3.1 Plastické otisky prstů

Plastické otisky vznikají, když síla působící na materiál, kterého se prst dotýká, je dostatečně velká, aby došlo k trvalé změně tvaru materiálu. Plastické otisky, které byly zanechány v odolných materiálech (keramika), mohou zůstat v zachovalém stavu po velmi dlouhou dobu i za nepříznivých podmínek jako například pod vodou. Zrna keramiky ale mohou být srovnatelné velikosti, jako výběžky samotné, proto často dochází ke zkreslení otisku a tím je ztížena následná analýza. Pomocí těchto otisků lze přiblížit vlastnosti lidí, kteří tyto otisky zanechali. Jedná se zejména o věk a pohlaví těchto osob, které se projevují rozdílnou šířkou a frekvencí papilárních linií. Pro elektronické uchovávání je potřeba šikmo nasvítit otisk, aby se zvýraznily přechody mezi brázdami a výběžky. Díky tomuto je ve výsledné fotografii jeden výběžek tvořen z půlky nasvícenou a z půlky zastíněnou částí. [23]





Obrázek 3.1: Ilustrace šířky výběžku u nasvícených plastických otisků (převzato z [23], upraveno).



Obrázek 3.2: Příklad plastického otisku zanechaném v keramice ve velmi dobrém stavu a bez výrazných vad.

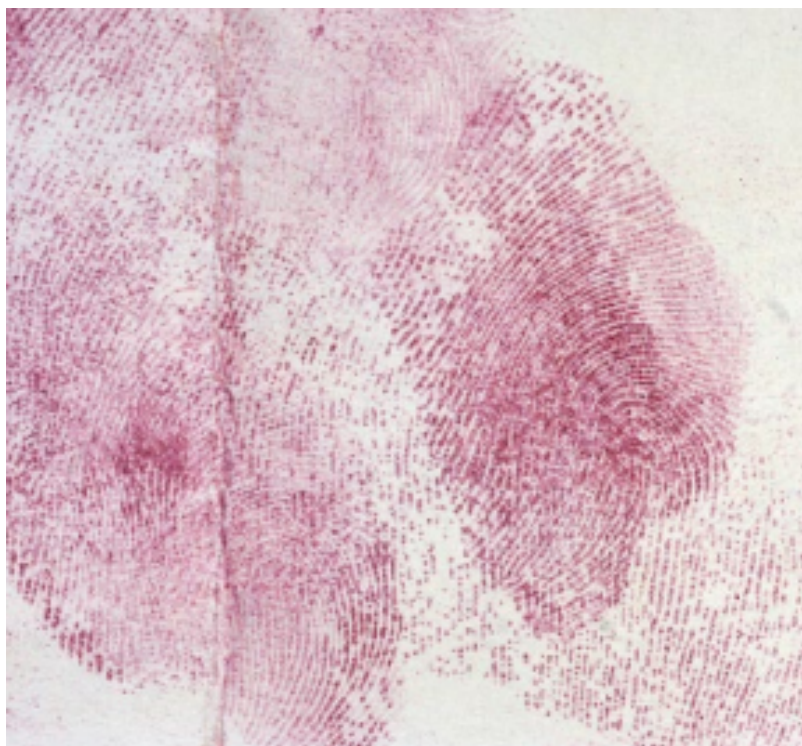
## 3.2 Latentní otisky prstů

Latentní otisky jsou zanechány z větší části díky potu z potních žláz na papilárních liniích. Některé metody popsané v podkapitole 3.2 využívají právě chemické složení látek zanechaných po dotyku prstu na povrchu. Pot ze žláz na prstech je složen přibližně z 99 % z vody. Zbývající část je tvořena solí, draslíkem, amoniakem, aminokyselinami a dalšími látkami. [35]

Otisky nejsou složeny jen z potu, který se produkuje na papilárních liniích, ale také z potu, který se na prsty mohl dostat kontaktem jiné části těla [35]. Mezi složením jednotlivých otisků jsou velké rozdíly. Žádné dva otisky nemají dokonale stejné složení, což má za následek složitější určování optimální metody zvýraznění a zpracování daného otisku. K tomu přispívá i fakt, že otisky obsahují i další organické a anorganické kontaminanty. Může se jednat o stopy jiných tekutin nebo sloučenin, se kterými přišel daný člověk do

styku v poslední době. Všechny tyto složky můžou sloužit k lepšímu zvýraznění otisku při použití správné metody. [7]

Pro účel zviditelňování jinak pouhým okem neviditelných latentních otisků bylo vyvíjeno mnoho metod. Jedná se o chemické, fyzické a optické metody [35]. Metody se musí aplikovat v takovém pořadí, aby byly co nejvíc spolehlivé. Je potřeba je aplikovat od nejméně intruzivních (metody, které otisk nijak nezmění například vizuální inspekce) až po nejvíce intruzivní metody (změní nebo poškodí otisk, zviditelnění prachem nebo barvou). Primárně aplikované neintruzivní metody jsou fotografování otisku pod infračerveným nebo ultrafialovým světlem (optické metody), které v mnoha případech pomůžou otisk alespoň zčásti zviditelnit. Na obrázku 3.3 je vidět latentní otisk na papíru, který byl chemickou metodou zvýrazněn. [35, 19]



Obrázek 3.3: Latentní otisk prstu zvýrazněný ninhydrinem (převzato z [7]).

### 3.2.1 Práškové zvýrazňovací metody

Jsou to nejčastěji používané metody. Spočívají na principu, že se prášek lépe uchytí na mastných místech otisku než na okolí. V případech, kdy v jednoduchosti uchycení prášku na otisku a na okolí není rozdíl, není tato metoda efektivní. [7]

Malé množství prášku je nanášeno na místo, kde je otisk. Jakmile začne být otisk viditelný, snaží se osoba extrahující otisk vyčistit prášek z brázd. Následně je pomocí pásky otisk přemístěn a může být použit k analýze. V některých případech se používá magnetický prášek, který je následně pomocí magnetu lépe odstranitelný z brázd otisku. Tento způsob ale není použitelný v případech, kdy byl otisk zanechán na povrchu, který je sám magnetický. [19]

### 3.2.2 Vypařovací zvýrazňovací metody

Nejčastější varianta této metody je s použitím kyanoakrylátu. Objekt, na kterém je latentní otisk, je umístěn do uzavřené komory (může se jednat i o auto). V komoře je následně umístěna nádoba s kyanoakrylátem. Výpary kyanoakrylátu se snadněji usadí na otisku prstu než na okolním povrchu. Otisk je poté viditelný, protože se zbarví do bíla. Toto zbarvení způsobuje vrstva polykyanoakrylátu, která vzniká reakcí kyanoakrylátu s látkami na otisku. Tato metoda je spolehlivější ve vlhčím prostředí, protože podporuje polymerizaci. Při vlhkosti pod 75 % je výsledné zvýraznění otisku nekvalitní. Tato metoda může být následována dalším vylepšením viditelnosti otisku pomocí práškových metod a pozorováním pod ultrafialovým světlem.[7, 19]

Existují i další varianty: použití jiné látky (jód nebo radioaktivní oxid siřičitý) nebo vakuové nanášení kovu. Některé z těchto variant mají výhodu v šetrnosti k materiálu, některé v preciznějším zvýraznění otisku, ale kyanoakrylátová varianta zůstává nejpoužívanější díky své univerzalitě a možnosti použití v improvizovaných komorách. [7]

### 3.2.3 Chemické zvýrazňovací metody

Tyto metody využívají viditelných reakcí jednotlivých látek v otiscích se speciálně vybranými látkami, kterým jsou otisky vystaveny. Následující metody jsou nejpoužívanějšími ve forenzních aplikacích:

- Nejpoužívanější metodou chemického zvýrazňování je použití látek, které reagují s aminokyselinami. Reaktanty mohou jinak reagovat na jednotlivé aminokyseliny, nebo dosáhnout stejného výsledku u všech aminokyselin. Nejpoužívanější látkou pro tuto metodu je *ninhydrin* (použitá na obrázku 3.3). Při použití této látky reagují aminokyseliny fialovým zbarvením. Probíhá výzkum ostatních látek a modifikací ninhydrinu, aby se dosáhlo možné fluorescence pro lepší snímky otisku. Další známou látkou pro tento účel je *1,8-diazafluoren-9-on* neboli DFO. DFO byla první nalezená látka, která bez dalšího kroku dokáže způsobit fluorescenci otisku po zahřátí materiálu. Tyto látky mají hlavní využití u otisků na porézních materiálech. [7]
- Zvýrazňování krve – krev je přítomná jako nejčastější kontaminant v latentních otiscích na místě činu. Dříve se k zvýraznění krve používaly látky, které reagovaly s hemem (skupina obsažená v hemoglobinu, která dává krvi červenou barvu a váže se na ní kyslík). Tyto látky byly ale později nahrazeny látkami, které reagují s proteiny v krvi (proteinová barviva). U zvýraznění krve je důležité vyvážit citlivost reaktantu na proteiny v krvi. Při použití malé citlivosti nemusí být výsledné zvýraznění otisku dostatečné. V opačném případě může dojít ke ztrátě detailů otisků. Používání těchto metod také často komplikuje nutnost krev používat i pro analýzu pro jiné účely v případě souvislosti se zločinem. [7, 35]
- Zvýrazňování lipidových skupin – K této metodě se používají látky, které reagují s lipidy v otisku. Ty jsou v něm ale obsažené v menším množství než mnohé ostatní látky, takže toto zvýraznění nebývá nejefektivnější. Jelikož jsou lipidy nerozpustitelné ve vodě, je tato metoda vhodná pro používání na otiscích, které byly vystavené velké vlhkosti. Nejčastěji používané látky jsou: súdánská čerň (která se využívá v případě kontaminace jinými oleji), Basic Violet 3 (která pomáhá zlepšit výsledky práškové metody na adhezivních plochách) a Oil Red O (používaná převážně na mokřích porézních materiálech v kombinaci s fyzickými metodami). [7]

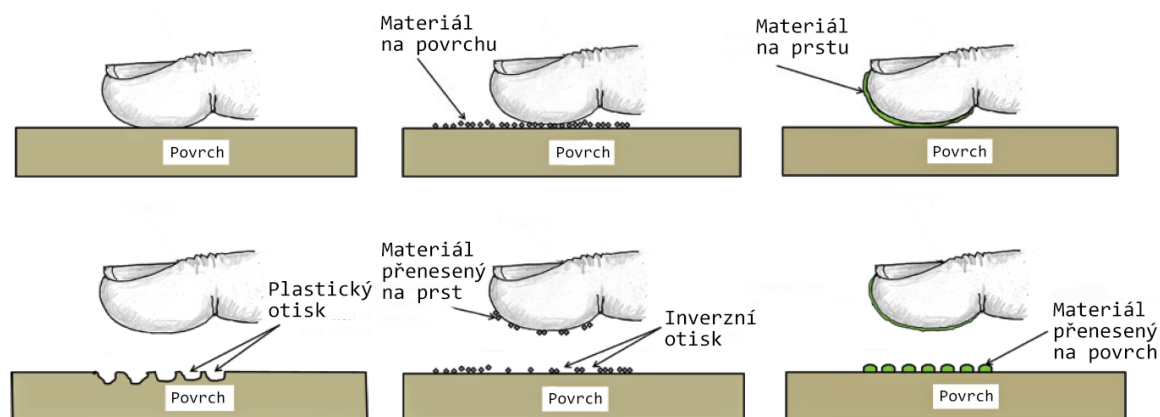
### 3.3 Vliv prstu a povrchu na kvalitu otisku

U **prstu** může výsledný otisk ovlivnit hned několik faktorů: čistota prstu, mechanické vlastnosti a jeho teplota. **Povrch**, na kterém byl otisk zanechán, také silně ovlivňuje kvalitu otisku. Nejdůležitějšími vlastnostmi jsou mechanické vlastnosti, tvar a textura, čistota a teplota povrchu. Obrázek 3.4 znázorňuje vznik různých druhů otisků podle stavu povrchu a prstu. [7]

**Znečištění** prstu může ovlivnit výsledný otisk v pozitivním i negativním smyslu. Pokud jsou nečistoty dostatečně jemné, mohou otisk za použití specifických metod pro zvýraznění víc zviditelnit a zjednodušit tím analýzu. Nečistoty mohou ale také znemožnit další analýzu, protože zabrání přenosu materiálu na povrch z některých částí prstu. [7]

Z **mechanických vlastností** je důležitá hlavně tendence prstu se deformovat. To je ovlivněno převážně obsahem tuku v kůži na prstech. Při přitisknutí prstu na povrch se plocha deformuje pro lepší rozložení sil. Síla přitlačení může díky deformaci způsobit dobře viditelný a rozpoznatelný otisk. Naopak ale při moc velké nebo malé síle může dojít k nevýrazným liniím, nebo liniím, které se slévají dohromady kvůli moc velkému tlaku. [7]

**Teplota** prstu neovlivňuje výsledný otisk do takové míry, jako ho ovlivňují předchozí body, ale může způsobit deformaci povrchu táním materiálů s nízkým bodem tání. Teplota také mění deformační vlastnosti prstu. Studený prst má menší tendenci se deformovat než prst teplejší. [7]



Obrázek 3.4: Tři způsoby vzniku otisku prstu. Zleva: Plastický otisk vzniklý deformací materiálů, inverzní otisk vzniklý přenesením materiálu z povrchu na prst, patentní či latentní otisk vzniklý přenesením materiálu z prstu na povrch (převzato z [7], upraveno).

Při a po doteku se materiál může **deformovat**. Deformací povrchu rozumíme změnu jeho tvaru působením síly. Zde specificky zkoumáme, jak se povrch bude chovat při přitlačení prstu a po něm. V případě, že síla působící na materiál nepřesáhla hranici, kdy je materiál schopen se vrátit do původního tvaru, jedná se o *elastickou* (pružnou) deformaci. Pokud je síla větší a tvar materiálu se permanentně změnil, jedná se o deformaci *plastickou*. Výsledkem plastické deformace u otisků prstů je plastický otisk (tj. jeho trojrozměrná reprezentace v materiálu). Dochází ale také k deformaci prstu samotného. Výsledná deformace je vztah tendence k deformaci prstu ku povrchu. Tvrdé materiály způsobí pouze deformaci prstu a samy se změní nepatrně. Měkké materiály se deformují současně s prstem. Pokud je deformace povrchu elastická a podstatná, dochází i ke změně výsledného otisku. U plastické deformace většinou nedojde k takovému zhoršení kvality. [7]

Zachování otisku může ovlivnit **poréznost materiálu**. Ta rozhoduje o tom, jaká metoda pro vylepšení otisku prstu bude použita. **Porézní povrch** jednoduše absorbuje pot a další látky, ze kterých je otisk složen. Díky tomu je otisk poté odolnější vůči změnám způsobeným prostředím. Mezi tyto povrchy patří dřevo, papír, karton a další. Z chemických metod jsou pro tyto povrchy obzvláště účinné látky reagující s aminokyselinami. **Neporézní povrch** látky tvořící otisk neabsorbuje. Jedná se o sklo, kov, některé plasty, atd. Jelikož látky z prstu zůstanou na povrchu a nejsou absorbovány, může být otisk jednodušeji poškozen (ať mechanicky, nebo chemicky). Pro tento povrch se používají prachové metody nebo výpary kyanoakrylátu. Pokud má povrch hrubší strukturu, jsou zanechané stopy otisku pouze na výběžcích povrchu. Získaný otisk je tudíž přerušovaný a hůř analyzovatelný. Na hladkém povrchu se prst dotkne větší plochou. Hladký povrch ovšem nemusí znamenat kvalitní výsledný otisk. Pokud je povrch zahnutý, otiskne se na něm jen menší část prstu a je tím pádem k dispozici méně markantů. [7, 35]

**Znečištěný povrch** může mít za následek přenos materiálu z povrchu na prst. Výsledkem přiložení prstu na takový povrch je znečištěný prst bez otisku na povrchu. K přenosu materiálu oběma směry dojde ve většině případů, ale pro kvalitnější otisk je ideální maximalizovat přenos z prstu na povrch. [7]

**Teplota povrchu** může otisk ovlivňovat dvěma způsoby. Extrémní teplota povrchu může poškodit prst a způsobit, že materiál z prstu je zanechán na povrchu. Poškození prstu ale může způsobit i zmenšení množství přeneseného materiálu na povrch. Pokud dotykem prstu překročí materiál bod tání, může dojít k jeho plastické deformaci a zanechání plastického otisku. [7]

## Kapitola 4

# Předzpracování otisků prstů

Cílem této kapitoly je popsat jednotlivé kroky pro zvýšení kvality snímku otisku prstu pro zlepšení výsledků jeho analýzy. Pro spolehlivé rozeznávání otisků prstů a zjištění požadovaných vlastností je potřeba kvalitní snímek. Špatná kvalita snímku může znamenat vynechání některých markantů, vytvoření nových markantů, které na originálním otisku nebyly, nebo špatný odhad pozice a orientace markantů [8].

Kvalitní a detailní snímek jde často pořídit jen z kvalitních čteček otisků, ale ani kvalitní čtečky často nezabrání nedokonalostem snímku v podobě poškození nebo nečistoty prstů a znečištěného snímače [34]. U neúmyslně zanechaných otisků jsou tyto problémy přirozeně horší. Navíc se u nich vyskytují další problémy jako komplexní pozadí, malá zachycená oblast otisku nebo jeho malá ostrost z důvodu nutnosti použití nepřesných zvýrazňovacích metod. Může se jednat o mokrý otisk, u kterého má je možné dosáhnout lepších výsledků použitím lipidové metody, která ale není v ideálních podmínkách tak spolehlivá, jako jsou ostatní metody. Tyto nedokonalosti je potřeba pro efektivní analýzu odstranit nebo alespoň minimalizovat.

Části otisku prstu se podle poškození dělí na tři hlavní kategorie: [27]

1. Bez poškození: Rozdíly mezi výběžky a brázdami jsou jasně vidět. Část neobsahuje šmouhy, ani přerušování linií.
2. Opravitelné poškození: Část obsahuje malé přerušování, šmouhy nebo mírné sjednocení výběžků. Lze však spolehlivě odvodit původní vzhled části podle kontextu okolních linií, nebo je poškození tak malé, že k jeho opravení stačí sama část.
3. Neopravitelné poškození: Část otisku má takové poškození, že z ní nelze rozeznat její původní vzhled, ani ho nelze pomocí tvaru okolí odvodit. Jedná se především o výrazné šmouhy, rozsáhlé sjednocení linií, nebo chybně vyřezané výrazné sekce.

### 4.1 Segmentace obrazu

Segmentací rozdělíme obraz na popředí a pozadí. Popředí reprezentuje oblast, která obsahuje přijatelnou část otisku, tj. brázdami a výběžky. Pozadí reprezentuje ostatní oblasti. Pozadí má většinou menší rozdíl v úrovních šedi, kdežto v popředí se budou s větší frekvencí střídávat více tmavé a světlé sekce. Segmentaci tedy provedeme rozdělením obrazu na nepřekrývající bloky (typicky velké jednu až dvě vzdálenosti mezi výběžky [8]), v nichž se vypočítá rozdíl v úrovních šedi. Pokud tento rozdíl nedosahuje stanovené hranice, je blok považován za součást pozadí. [34]

Tento krok je u neúmyslně zanechaných a speciálně u latentních otisků prstů složitější, jelikož pozadí obrazu, na kterém byl otisk zachycen, je často složité a ve velké míře nepředvídatelné. Při předchozí znalosti zvolené metody zvýraznění latentního otisku je možné automaticky vyfiltrovat danou barvu (modrá až fialová v případě použití ninhydrinu). Zvolený program by tedy mohl mít možnost zvolit danou metodu zvýraznění a případnou úpravu filtrované barvy pro lepší výsledky. Plně automatická analýza neúmyslně zanechaných otisků je proto výrazně obtížnější než analýza otisků píchaných nebo válených. Segmentace obrazu je u neúmyslně zanechaných otisků prstů náročnější i z toho důvodu, že oblast, na které je použitelná část otisk prstu (regiony bez poškození, nebo s opravitelným poškozením) je většinou malá oproti ostatním částem [25].

Z těchto důvodů je tento krok u neúmyslně zanechaných otisků o to více důležitý. Při použití příliš přísných segmentačních podmínek je oblast výsledných regionů příliš malá pro efektivní analýzu. V opačném případě může dojít k zahrnutí částí z pozadí, které poté znehodnotí výsledky analýzy.

## 4.2 Normalizace

Normalizováním obrazu obsahujícím otisk prstu se snažíme dosáhnout snížení rozdílu mezi odstínem šedi na krajích brázd a výběžků. Výsledek lze vidět na obrázku 4.1 Malý kontrast obrazu otisku prstu může být způsoben různou silou přitlačení otisku na povrch, nerovnoměrným rozložením inkoustu na prstu i dalšími faktory. [20]

Normalizace je pixelová operace. To znamená, že výsledná hodnota pixelu závisí jen na jeho hodnotě a hodnotách, které jsou získané z celého obrazu. Hodnoty okolních pixelů individuálně nemají na jeho výslednou hodnotu vliv.  $I(i, j)$  vyjadřuje pixel, který se nachází na  $i$ -tém řádku a v  $j$ -tém sloupci. K normalizaci je použit vzorec 4.1.  $VAR_0$  představuje ve vzorci požadovaný rozptyl,  $M$  průměrnou intenzitu a  $M_0$  požadovanou průměrnou intenzitu. [20, 27]

$$G(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}} & I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}} & jinak \end{cases} \quad (4.1)$$

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{I(i, j)}{m * n} \quad (4.2)$$

$$VAR = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I(i, j) - M)^2 \quad (4.3)$$



Obrázek 4.1: Vlevo originální otisk prstu. Vpravo normalizovaný otisk (převzato z [34]).

### 4.3 Výpočet pole orientací

Pole orientací reprezentuje směr, ve kterém plynou papilární linie v otisku. Ukázka výpočtu pole orientací pro příslušný otisk prstu je vidět na obrázku 4.2. V případě, že jediné informace o otisku jsou ve formě markantů, lze pole orientací odhadnout jen z nich a tím další analýze a porovnávání otisků pomoci při jejich zarovnání. [30]

Pro tvorbu pole orientací je otisk prstu rozdělen do nepřekrývajících se bloků, ze kterých je v každém vypočítána orientace podle plynutí papilárních linií. Nejjednodušší metoda pro výpočet pole orientací je použitím gradientu. Využívá se zde faktu, že orientace linie bude ortogonální k jejímu gradientu. Tato metoda je ale náchylná na šum a další nedokonalosti obrazu. Tento nedostatek se nejvíc projeví u poškozených otisků prstů. Analýzou výsledků okolních bloků a odpovídajícím vyhlazováním lze u poškozených otisků výsledky výpočtu pole orientací vylepšit. [13, 6]



Obrázek 4.2: Vlevo originální otisk prstu. Vpravo jeho vypočtené pole orientací (převzato z [6]).

Následující algoritmus popisuje postup, který pole orientací počítá po pixelech místo po blocích pro přesnější výsledek (převzatý z [34]). Používá se v něm již normalizovaného obrazu otisku prstu:



1. Pro zvolenou hodnotu velikosti bloku  $W$  je vytvořen blok o velikosti  $W \times W$ , který má střed na pixelu o souřadnicích  $(i, j)$
2. Pro každý pixel v bloku je vypočten gradient  $\partial_x(i, j)$  a  $\partial_y(i, j)$ . Pro výpočet  $\partial_x(i, j)$  je použit *Sobelův operátor* (operátor ve tvaru matice, který slouží pro detekci hran v obrazu)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Pro výpočet  $\partial_y(i, j)$  je použit Sobelův operátor

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

3. Pomocí následujících rovnic je odhadnuta lokální orientace pixelu  $(i, j)$ .

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v), \quad (4.6)$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} \partial_x^2(u, v)\partial_y^2(u, v), \quad (4.7)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{V_y(i, j)}{V_x(i, j)} \quad (4.8)$$

$\theta(i, j)$  je lokální orientace odhadnuta nejmenšími čtverci v bloku se středem na pixelu  $(i, j)$ .

4. Pro uhlazení pole orientací je použit Gaussův filtr. Použitý filtr je dolní propust. Tento filtr vyhlazuje vyšší frekvence (rychlejší změny). Pro možnost použití filtru je pole orientací převedeno na kontinuální vektorové pole následovně:

$$\Phi_x(i, j) = \cos(2\theta(i, j)), \quad (4.9)$$

$$\Phi_y(i, j) = \sin(2\theta(i, j)) \quad (4.10)$$

$\Phi_x$  a  $\Phi_y$  jsou  $x$  a  $y$  komponenty vektorového pole. Vyhlazení Gaussovým filtrem je provedeno následovně:

$$\Phi'_x(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_\Phi}{2}}^{\frac{w_\Phi}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\Phi}{2}}^{\frac{w_\Phi}{2}} G(u, v)\Phi_x(i - uw, j - vw), \quad (4.11)$$

$$\Phi'_y(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_\Phi}{2}}^{\frac{w_\Phi}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\Phi}{2}}^{\frac{w_\Phi}{2}} G(u, v)\Phi_y(i - uw, j - vw), \quad (4.12)$$

$w_\Phi \times w_\Phi$  jsou rozměry Gaussova filtru.

5. Výsledné pole orientací pixelu  $(i, j)$  je definováno jako:

$$O(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\Phi'_y(i, j)}{\Phi'_x(i, j)} \quad (4.13)$$

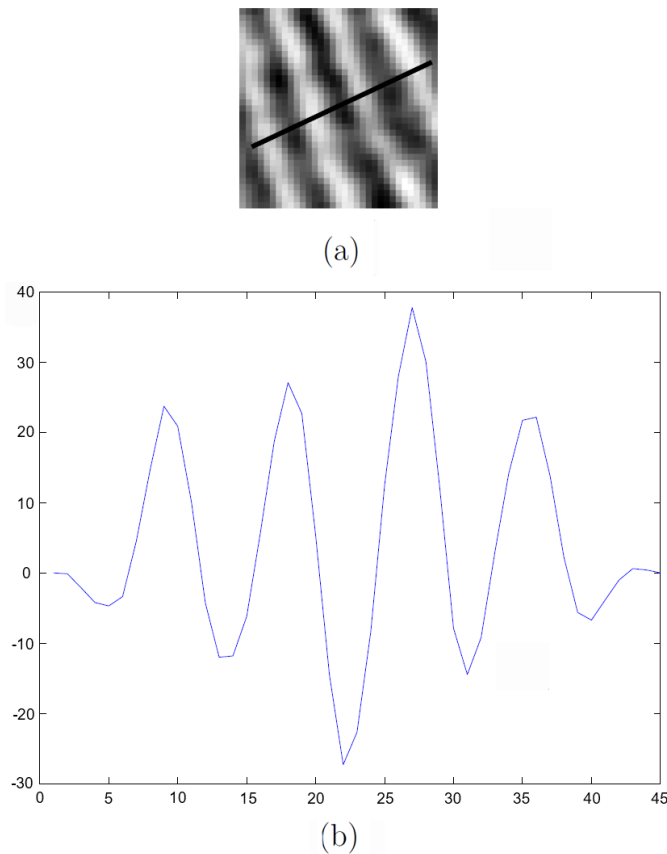
## 4.4 Odhad lokální frekvence

Lokální frekvence představuje průměrnou vzdálenost mezi liniemi v každém bloku obrazu otisku. První krok pro odhad lokální frekvence je rozdělení obrazu do bloků o velikosti  $W \times W$ . Pro každý blok je získán směr papilárních linií a kolmo k němu vytvořeno širší orientované okno. V něm je odhadnuta frekvence střídání výběžků a brázd pomocí projekce intenzity pixelů kolmo na orientaci linií. Ze vzniklé projekce lze následně extrahovat sinusovku, která představuje frekvenci střídání výběžků a brázd. [34, 32]

Pro výpočet výsledné lokální frekvence  $F(i,j)$  je potřeba získat průměrnou vzdálenost mezi liniemi  $S(i,j)$ . Ta se vypočítá průměrováním vzdáleností po sobě jdoucích nejnižších bodů. Výsledný výpočet je vidět v rovnici 4.14. [34]

$$F(i,j) = \frac{1}{S(i,j)} \quad (4.14)$$

V případě, že se v bloku vyskytne markant, nebo je zde ukončení linie, může dojít k chybnému vyhodnocení frekvence. To lze vyřešit výpočtem frekvencí v těchto blocích pomocí zprůměrování okolních frekvencí. Graficky znázorněný odhad lokální frekvence lze vidět na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: a) Blok otisku prstu o velikosti  $32 \times 32$  a zobrazený směr papilárních linií. b) Sinusovka získaná z intenzity pixelů (převzato z [34]).

## 4.5 Filtrování

Při běžné úpravě obrazu pomocí filtrování je univerzálně použit jeden vybraný filtr pro celý obraz. V případě vylepšování obrazu otisku prstu je efektivnější použití kontextuálního filtrování. To znamená, že se obraz rozdělí na bloky (každý tento blok by měl být větší, než je rozestup papilárních linií). Pro každý tento blok je zvolen filtr se specificky upravenými parametry pro něj. V případě otisků jsou těmito parametry lokální frekvence linií a jejich orientace. Cílem filtrování je zde sloučit přerušené linie. Tyto parametry se mohou měnit skrz celý obraz a pro lepší výsledky je nutné jim přizpůsobit filtr. [27]

Pro zvýraznění otisků se používá **Gaborovo filtrování**. Gaborovy filtry jsou druhem filtru, který propouští jen určitý interval frekvencí (pásmový filtr). Na Gaborův filtr lze pohlížet jako na sinusovou vlnu, která byla modulována Gaussovou vlnou [33]. Orientace filtru se získá z vypočteného pole orientací. Frekvence sinusové vlny je získána z lokální frekvence. Výsledkem aplikace filtru jsou zvýrazněné rozdíly mezi výběžky a brázdami.

Gaborův filtr má tvar: [21]

$$h(x, y : \phi, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{x_\phi^2}{\delta_x^2} + \frac{y_\phi^2}{\delta_y^2} \right] \right\} \cos(2\pi f x_\phi) \quad (4.15)$$

$$x_\phi = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (4.16)$$

$$y_\phi = -x \sin \phi + y \cos \phi \quad (4.17)$$

$\phi$  je orientace filtru,  $f$  je frekvence použité sinusové vlny,  $\delta_x$  a  $\delta_y$  jsou prostorové konstanty Gaussovy obálky na osách  $x$  a  $y$ . Zvolení konstant  $\delta_x$  a  $\delta_y$  má silný vliv na konečný výsledek filtrování. Při zvolení vysokých hodnot budou linie víc zvýrazněny a lépe odstraněn nechtěný šum, ale mohou být vytvořeny linie, které v originálním obraze nebyly. Při volbě menších hodnot se minimalizuje šance na vytvoření falešných linií, ale nebude tak efektivně odstraněn šum. [21]

Pro zvýšení efektivity výpočtu je před začátkem analýzy vytvořen set s určitým množstvím filtrů, ze kterého je následně vybrán ideální filtr pro každý blok podle lokální frekvence a orientace. Při aplikacích, u nichž není časová náročnost rozhodující je možné pro každý blok počítat ideální filtr zvlášť. [27]

Pro zlepšení výsledků je možné použít Gaborovy filtry takovým způsobem, že pro každý blok budou aplikovány všechny filtry ze setu filtrů. Poté jsou výsledky použití jednotlivých filtrů porovnávány a vybrán ten, který je nejlepší. Jako metrika pro nejlepší výsledek filtru může sloužit analýza lokálních papilárních linií extrahovaných použitím filtru. [27]

## 4.6 Binarizace a zúžení papilárních linií

Před samotným rozpoznáváním otisků je potřeba provést ještě dvě operace. Pro další zvýraznění kontrastu výběžků a brázd a zajištění podpory s existujícími algoritmy pro extrakci markantů z otisků se obraz převádí na **binární obraz** (složený jen z černých a bílých pixelů). Tohoto může být dosaženo například regionálním prahováním, které spočívá v rozdělení obrazu do bloků o velikosti  $8 \times 8$ . V tomto bloku je spočítána průměrná intenzita a v levé půlce je s jejím využitím provedeno prahování. Poté se operace posune o 4 pixely dál. [34, 22]

Jelikož mají papilární linie v tomto kroku různou šířku, jsou všechny **zúžené**, aby byly široké 1 pixel [22]. Lze toho docílit základním algoritmem eroze. Je vytvořena maska, jejíž

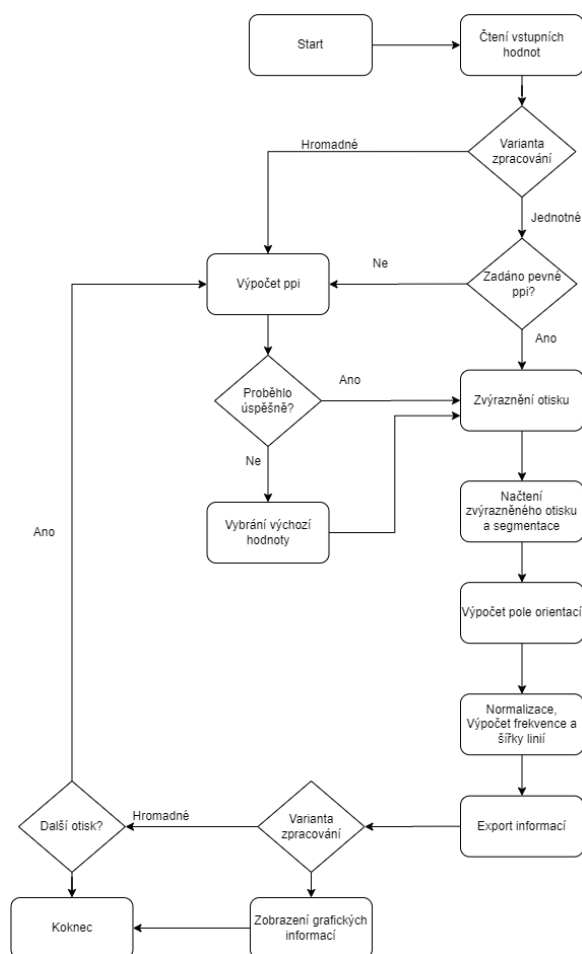
střed je přiložen na každý pixel. Pokud jsou všechny pixely masky obsažené v původním obrazu, je pixel ponechán, jinak je smazán. Tento algoritmus je puštěn v několika iteracích, dokud se nedosáhne šířky linií 1 pixelu.

Po těchto úpravách už je možné provést porovnávání otisků. Typicky se k tomu používá rozpoznávání na základě markantů [12]. Jedná se o porovnávání množin markantů (jejich polohy a orientaci) z dvou otisků prstů. Pro porovnávání množin markantů se používají **Hongova** a **Rathova** metoda. U obou metod se nejdříve otisky zarovnají a poté dojde k porovnání jednotlivých markantů.

## Kapitola 5

# Návrh aplikace

Cílem této kapitoly je popsat návrh aplikace a všechny její části. Popisuje její architekturu, grafické rozhraní a hlavní použité knihovny. Hlavní výhodou této aplikace bude možnost detailního nastavení parametrů analýzy. Tímto by mělo být možné docílit lepších výsledků zejména u neúmyslně zanechaných otisků prstů. Aplikace bude implementována v jazyce Python. Hlavní výhodou je jeho jednoduchost, rychlost programování a množství dostupných knihoven.



Obrázek 5.1: Diagram zobrazující běh analýzy programu.

## 5.1 Architektura

Aplikace bude postavena na vrstvené architektuře. Tato architektura zaručí do budoucna zjednodušení rozšiřitelnosti a modifikace aplikace logickým rozdělením do jednotlivých vrstev [14]. Jedná se o tyto dvě vrstvy:

1. Prezentační vrstva – Vrstva, která se bude starat o zobrazení dat uživateli. Jedná se o front-end aplikace.
2. Aplikační vrstva – Vrstva, která má na starost zpracování dat a všechny výpočty. Jedná se o back-end aplikace.

Pro implementaci **prezentační vrstvy** bude použit modul PySide. Program bude složen z jednoho okna, ve kterém v levé části budou náhledy jednotlivých operací a v pravé části volby parametrů běhu.

**PySide** je Python modul zprostředkávající aplikační rámec QT <sup>1</sup>. Podporuje hlavní operační systémy a práce s ním je jednoduchá a lze k němu jednoduše najít spoustu návodů na implementaci různých konstrukcí. Nevýhodou je slabší dokumentace. Projekt má na starosti firma The QT Company (stejná firma, která má na starosti samotné QT) [16].

Při implementaci **aplikační vrstvy** bude kladen důraz zejména na rozdělení programu do logických funkcí pro lepší přehlednost a rozšiřitelnost. Detailnější popis fungování je popsán v kapitole 4 a podkapitole 5.3.

## 5.2 Režimy analýzy

Aplikaci bude možné používat dvěma způsoby. První způsob bude zpracování jednoho otisku prstu samostatně. Druhý způsob bude zpracování celé databáze otisků. V obou režimech bude nutné zajistit ppi otisku. Toho bude možné docílit dvěma způsoby. Jelikož fotografie obsahují špatnou EXIF informaci o ppi a tato hodnota není jednotná u všech otisků v databázi, je nutné ji zjišťovat automaticky z milimetrového papíru u každé fotografie. Tento způsob ale předpokládá vysokou výraznost a světlost papíru. V případě, že detekce jasně selže, bude použita univerzální hodnota. Tuto hodnotu bude možné v aplikaci definovat uživatelem.

1. Individuální zpracování – V tomto režimu bude možné pro jednotlivý otisk zvolit přesně sedící parametry. Uživatel si může volit velikost bloků pro segmentaci a ostatní operace, koeficient zmenšení obrazu a další parametry. Tato metoda bude mít výhodu v přesnějším zpracování otisků a možnosti upravovat parametry pro zlepšení výsledků jednotlivých kroků. Pro každou operaci bude k dispozici náhled na její výsledek.
2. Hromadné zpracování – V tomto režimu si uživatel předem může zvolit preferované parametry pro zpracování všech otisků. Tento režim neumožní uživateli okamžitý náhled na výsledek jednotlivých operací. Uložena bude pouze vizualizace pole orientací a nalezeného milimetrového papíru, podle kterých bude rozhodnuto, jestli byl výsledek validní. Podrobnosti průběhu analýzy budou k dispozici v logu.

---

<sup>1</sup>Informace o QT: <https://doc.qt.io>

## 5.3 Extrakce informací

Aplikace zahájí po provedení předzpracování extrakci podrobných informací. Jedná se o hustotu, směr a šířku papilárních linií. Informace budou ukládány po jednotlivých blocích, jejich velikost bude moct uživatel zvolit na začátku běhu aplikace.

- Hustota papilárních linií – Bude určena z lokální frekvence popsané v kapitole 4.4. Výsledek operace bude pomocí získaného ppi převeden na reálné vzdálenosti. Výsledkem bude dvojrozměrné pole, které obsahuje frekvenci linií pro každý blok v liniích na milimetr.
- Směr papilárních linií – Pro jejich výpočet bude využito pole orientací. Tento výpočet je popsán v podkapitole 4.3 Výsledkem je dvojrozměrné pole, které obsahuje směr papilárních linií v každém bloku v radiánech.
- Šířka papilárních linií – Šířka bude počítána jako průměr šířek všech papilárních linií v bloku. Kolmo na směr linie budou změřeny vzdálenosti přechodu světla na otisku a výsledky všech řad pixelů budou zprůměrovány. Po výpočtu bude šířka převedena na reálnou šířku pomocí získaného ppi. Výsledkem bude dvojrozměrné pole, které obsahuje průměrnou šířku papilárních linií pro každý blok v milimetrech.

## 5.4 Výstup

Po dokončení analýzy bude mít uživatel možnost v případě jednotlivé analýzy uložení grafických a podrobných informací o jednotlivých dílčích krocích. Statistické informace budou v u hromadné analýzy uloženy do složky `textures` se zachovanou strukturou podadresářů vstupního adresáře pro jednodušší orientaci ve výsledcích. U jednotlivé analýzy budou exportovány do složky `singleOutput`. Pro export statistik bude použit formát xml (extensible markup language) nebo grafické znázornění těchto informací. Grafické informace (jako pole orientací nebo regionální masku) bude možné uložit do formátu png.

**Graficky** bude možné šířku a hustotu papilárních linií exportovat jako teplotní matici, kde interval barev bude reprezentovat hodnoty (teplejší barva větší hustotu, větší průměrnou šířku, studenější barva menší hustotu, menší průměrnou šířku). Ve výsledném obrázku bude možné vidět i zvýrazněnou a popsanou maximální a minimální hodnotu. K vytvoření této matice bude využita knihovna `matplotlib` a `seaborn`. Výslednou matici bude možné exportovat ve formátu png. Směr papilárních linií bude zobrazen na segmentovaném, normalizovaném otisku. V každém bloku bude vykreslena bílá čára reprezentující orientaci linie. To oproti teplotní matici zaručí hlavně přehlednější zobrazení, které pomůže k oddělení validních výsledků od nevalidních.

Pro **statistické porovnávání** celé databáze bude nutné uchovávat jen menší množství hodnot pro každý otisk. Pro tento účel bude vypočítán pro každé pole všech tří informací každého otisku průměr a rozptyl. Maximální a minimální hodnoty budou k dispozici v jednotlivých souborech odpovídající podrobným informacím o jednotlivých zjišťovaných hodnotách. Tento soubor obsahující obecné informace o otisku bude přítomen u ostatních souborů pojmenován `[jméno_původního_souboru]_generalStatistics.xml`

## Kapitola 6

# Popis implementace

Cílem této kapitoly je popsat implementaci výsledné aplikace. Obsahuje informace o jednotlivých hlavních krocích, které aplikace musí provést pro dosažení výsledku, a problémech, které při jejich realizaci nastaly. Při implementaci byly použity algoritmy z kapitoly 4, nicméně tyto algoritmy byly navrženy pro použití na patentních otiscích, takže bylo nutné je náležitě upravit pro otisky plastické.

Pro zjednodušení analýzy po blocích je v modulu `ruler.py` funkce `divideImage`, která příslušné dvojrozměrné pole pixelů **rozdělí na dvojrozměrné pole čtvercových bloků** specifikované velikosti. Tímto je docíleno hlavně podstatného zjednodušení implementace jak jednotlivých kroků analýzy po blocích, tak práce se segmentační maskou. Ta nemusí mít hodnotu pro každý pixel fotografie, ale stačí hodnota pro každý blok. U analýzy dojde k zjednodušení hlavně v možnosti iterování přes bloky bez nutnosti výpočtu adresy pixelů. Kód je díky tomu výrazně přehlednější. U extrakce frekvence a šířky papilárních linií, kdy je potřeba použití orientovaného okna, je okno vytvořeno otočením rozšířeného okolí velikosti  $3 \times 3$ , otočením a oříznutím na příslušnou velikost. V případě potřeby grafického znázornění výsledků jednotlivých kroků je ve stejném modulu k dispozici funkce `reconstructImageFromBlocks`, která bloky sjednotí znovu do dvojrozměrného pole pixelů.

### 6.1 Zjištění ppi

Pro správné vyhodnocení naměřených hodnot a automatické zvolení ideálních parametrů pro analýzu je nutné vědět ppi fotky otisku. Můžou nastat dva případy:

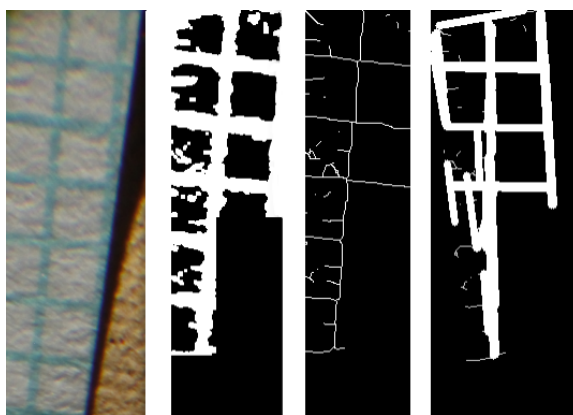
- Program se snaží ppi určit sám z milimetrového papíru přiloženého k otisku. Metoda získávání ppi ale není vždy přesná a z důvodu malé plochy milimetrového papíru na obrázku není vždy možné ji spolehlivě provést. V případě, že je získaná hodnota v realistickém rozmezí je poté využita pro analýzu. Rozmezí bylo nastaveno na 30 až 80 pixelů, jelikož použití této hranice vyprodukovalo nejspolehlivější výsledky. Při jednotlivém zpracování je následně hodnota zobrazena uživateli pro kontrolu a uživatel má možnost tuto hodnotu upravit podle potřeby a obnovit analýzu.
- V případě, že program nedokáže hodnotu spolehlivě určit, je ppi pevně zvoleno. Přednastavená hodnota je 4333 ppi, která byla zjištěna manuálně u většího množství analyzovaných vzorků. Jelikož ale databáze obsahuje fotografie s velmi rozdílným ppi, je tento případ používán jako poslední možnost a nelze očekávat nijak přesné výsledky.



### 6.1.1 Automatické zjišťování ppi

Jelikož rozdíly v intenzitě čar a samotného papíru nejsou velké, není možné spolehlivě použít algoritmus pro detekci čar na celý obraz a je nutné nejprve vybrat oblasti, ve které se na fotce nachází milimetrový papír. Obraz je rozdělen na bloky a u každého je rozhodnuto, jestli obsahuje papír nebo ne. Jako nejspolehlivější řešení po testování vyšlo vybrat oblasti, které obsahují z větší částí světlé šedé pixely. Papír totiž na fotkách bývá podstatně světlejší než zbytek fotky. Keramika má silnější červenou složku, což také pomáhá při oddělení bloků, které ji obsahují. Tato metoda samozřejmě není použitelná u otisků, které mají milimetrový papír hůř nasvícený. Kolem vybraných bloků je vytvořen obdélník, který ohraničuje oblast, kterou je potřeba analyzovat. Na jeho vytvoření je použit kód z odpovědi na otázku z [17]. Dalším krokem je zvýraznění milimetrových čtverců. K tomu se používá lokální prahování. Jako práh je vybrána průměrná intenzita pixelů v bloku. Za využití dilatace a eroze jsou linie následně ztenčeny na šířku jednoho pixelu. V takovém stavu už je možné použít algoritmus pro detekci čar. Program pro tento účel využívá Cannyho detekci hran a Houghovu transformaci (kód převzat z odpovědi na otázku z [1]). V poslední fázi program otáčí postupně obraz až do rotace 90 stupňů a v každé poloze počítá množství vodorovných a svislých čar. Jako správné otočení považuje to, které má těchto čar nejvíce. Ze správného otočení je poté vypočítána průměrná vzdálenost svislých a vodorovných čar a ta je poté používána pro převod pixelů na milimetry.

Automatické zjišťování vnáší do celkové analýzy velký potenciál pro selhání. Mezi hlavní důvody nepřesného zjištění ppi patří malá plocha nebo nevýraznost papíru, které buď znemožní již samotné zjištění oblasti, kde se milimetrový papír nachází, nebo nebude poskytnuté dostatečné množství dostatečně výrazných čar pro detekci správného otočení a výsledkem tudíž ve většině těchto případů je nesmyslná hodnota. Dalším vážným problémem této metody jsou nedokonalosti papíru, které ve výsledku algoritmus detekuje jako čáry. Tomuto lze částečně předejít, jelikož většinou je detekováno podstatně větší množství správných čar, ale není tomu tak vždy. Tyto nedokonalosti a jejich projev jsou vidět na obrázku 6.1.

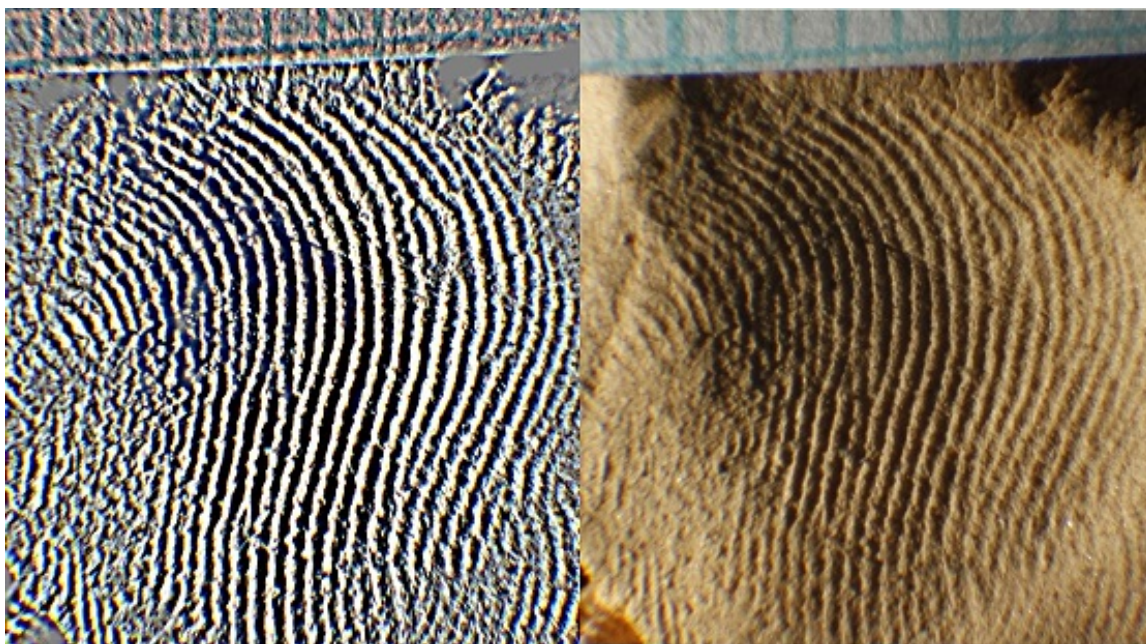


Obrázek 6.1: Ukázka detekce a orientace milimetrového papíru. Zleva: výřez z originální fotky, detekovaná binarizovaná a invertovaná oblast, ztenčené linie, orientovaná oblast s vyznačenými nalezenými čarami.

## 6.2 Zvýraznění otisku a segmentace

Před zahájením segmentace je nutné zvýraznit otisk na keramice, aby bylo možné ho spolehlivě oddělit od ostatních částí obrazu. Pro tento účel je použita metoda z článku [10]. Algoritmus využívá nelineárních dolnopropustných a hornopropustných filtrů pro oddělení textury obrazu. V mnoha případech se použitím tohoto algoritmu docílí dostatečného zvýraznění výběžků na fotografii. V případě nevýrazných otisků ale algoritmus zvýrazňuje i praskliny v materiálu a další nechtěné artefakty, což se projevuje v kvalitě segmentace a následné analýzy otisku. Jelikož je dostupné řešení napsané v jazyce c++ volně použitelné pro studijní a výzkumné účely, využívá ho aplikace v podobě sestaveného programu<sup>1</sup>. Experimentálně byla jako nejvhodnější hodnota sigma pro program zvolena hodnota 10. Pro ideální výsledky a zrychlení průběhu je nutné fotografie nejprve zmenšit, jinak jsou výsledky nepoužitelné.

Následně probíhá segmentace pro oddělení popředí od pozadí. Obraz je rozdělen na bloky o dané velikosti, které se následně vyhodnocují. Pro zlepšení výsledků bylo ale nutné provést změny oproti algoritmu popisovanému v kapitole 4.1. Jako hranice rozptylu pixelů není použita předem stanovená hodnota, ale je vypočítán maximální rozptyl v obrazu, který je zmenšen koeficientem v intervalu  $(0, 1)$ . Použitím vyššího koeficientu dojde ke zpřesnění segmentace, avšak výsledkem segmentace bude méně bloků k následné analýze. Výsledkem segmentace je maska obsahující hodnotu pro každý blok obrazu a původní obraz, na kterém jsou zabílené bloky, které byly vyhodnoceny jako pozadí. Jako maska je vybrána největší jednotná oblast masky (kód inspirován odpovědí na otázku z [26]).



Obrázek 6.2: Příklad zvýraznění textury otisku. Nahoře: originální otisk, dole: zvýrazněný otisk.

<sup>1</sup>Zdrojový kód programu a online demo aplikace dostupná na: [https://www.ipol.im/pub/art/2011/blmv\\_ct/?utm\\_source=doi](https://www.ipol.im/pub/art/2011/blmv_ct/?utm_source=doi)

### 6.3 Pole orientací

V kapitole 4 je pole orientací zjišťováno z normalizovaného obrazu. Experimenty ale ukázaly, že je dosaženo větší spolehlivosti odhadu pole orientací při aplikování algoritmu na pouze zvýrazněný obraz bez normalizace. Algoritmus na výpočet orientace je také změněn oproti návrhu díky výzkumu práce [36]. Orientace není vypočítána pro každý pixel, ale pro celý blok. Tím je zvýšena spolehlivost a není nutné aplikovat na pole orientací dolnoproputný filtr. Pro každý blok se středem  $i, j$  je vypočítán gradient  $\partial_x$  a  $\partial_y$  a proveden výpočet popsaný následujícím vzorcem:

$$V_x(i, j) = \sum_{u=0}^w \sum_{v=0}^w 2\partial_y^2(u, v), \quad (6.1)$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=0}^w \sum_{v=0}^w \partial_x^2(u, v), \quad (6.2)$$

$$V_{xy}(i, j) = \sum_{u=0}^w \sum_{v=0}^w \partial_y(u, v)\partial_x(u, v), \quad (6.3)$$

$$\theta(i, j) = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}\arctan2(2V_{xy}(i, j), V_x(i, j) - V_y(i, j)) \quad (6.4)$$

Pole orientací je graficky znázorněno jako matice bílých čar orientovaných podle linií, která je zobrazena na segmentovaném a normalizovaném otisku. Normalizovaný otisk se pro grafické znázornění používá pro lepší viditelnost těchto čar. Kód pro vykreslování čar je inspirován odpovědí na otázku z [18]. Hodnoty jsou exportovány také do souboru xml, který obsahuje velikost bloků a jejich po řadách bloků oddělené orientace v radiánech. Průměrná orientace a její rozptyl je poté v souhrnném souboru pro tento otisk.



Obrázek 6.3: Segmentace a pole orientací otisku z obrázku 6.2. Nalevo: segmentovaný otisk, napravo: vyznačené pole orientací.

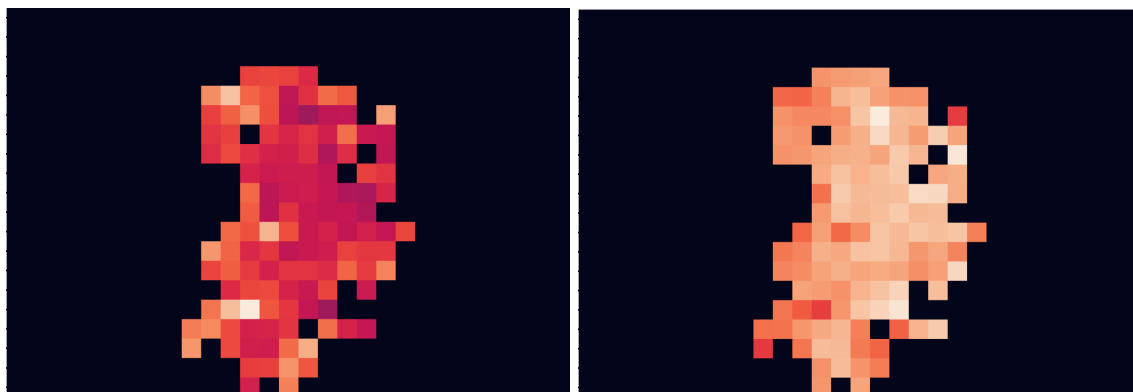
## 6.4 Normalizace a výpočet frekvence a šířky linií

Pro získání frekvence a šířky linií se používá již normalizovaný otisk. Jelikož výsledkem segmentace můžou být v některých případech pouze jednotky bloků, je nutné pro zachování detailů normalizaci provádět po blocích. Je tedy použit vzorec z kapitoly 4.2, jen jsou hodnoty  $i$  a  $j$  ze vzorců omezeny na hranice bloku.

Frekvenční pole je získáno pomocí algoritmu popsáném v podkapitole 4.4. U plastických otisků je získaná projekce často s větším množstvím šumu a výsledek je pro zjišťování frekvence nevhodný. Proto je prvně na projekci aplikován Savitsky-Golay vyhlazovací filtr<sup>2</sup>, který v určeném okolí body vyhlazuje odhadem na polynomiální funkci. Tento filtr z projekce odstraní velkou část šumu, což zjednoduší analýzu. Z takto získané vlny jsou získána lokální minima a maxima, ze kterých jsou ještě odebrány okrajové extrémy, které mají hodnoty příliš rozdílné od sousedů. Tím se zabrání zohledňování částí pozadí, které se mohou vyskytnout v rozšířených oknech okrajových bloků a dojde k dalšímu zmenšení vlivu šumu na kraji okna. Frekvence bloku je získána jako součet průměrných vzdáleností maxim a minim dělený dvěma.

Jak je možné vidět na obrázku 3.1, výběžky jsou u plastických otisků nasvíceny tak, že je jeden výběžek složen z půlky ze světla a z druhé ze stínu. Tudíž je nutné šířku linií získávat jinak než frekvenci. Proto jsou získány body, kde byla překročena střední hodnota normalizace (kód převzat z odpovědi na otázku z [9]) a vzdálenosti mezi těmito body jsou zprůměrovány a zdvojnásobeny. Tímto se u dostatečně kvalitních otisků docílí spolehlivého odhadu šířky linií.

Frekvence i šířka linií je graficky znázorněna jako teplotní mapa, kde světlejší barva představuje větší frekvenci (respektive šířku) a tmavší nižší. Bloky pozadí jsou v mapě znázorněny černou barvou, validní hodnoty jsou vždy znatelně světlejší. Hodnoty se exportují dále do xml souboru, který má stejnou strukturu jako soubor pro pole orientací. Souhrnný soubor obsahuje pro obě měřené hodnoty průměr a rozptyl. Dále je v něm počet bloků, které obsahovaly validní hodnoty.



Obrázek 6.4: Teplotní mapy znázorňující frekvenci (nalevo) a šířku (napravo) papírných linií v jednotlivých blocích obrázku 6.2. Teplejší barva znamená větší šířku (resp. frekvenci).

<sup>2</sup>Ukázka a základní vysvětlení fungování Savitsky-Golay filtru dostupná na: [http://www.statistics4u.info/fundstat\\_eng/cc\\_filter\\_savgolay.html](http://www.statistics4u.info/fundstat_eng/cc_filter_savgolay.html)

# Kapitola 7

## Vyhodnocení

Cílem této kapitoly je popsat zdroje problémů a nepřesností v analýze a metodiku a výsledky testování. Obsahuje popis databáze, problémy jednotlivých kroků, jak se aplikace snaží zmenšit jejich dopad a příklady otisků, na kterých je vidět správný a špatný výsledek. Databáze byla poskytnuta doc. RNDr. Miroslavem Králíkem, Ph.D. z ústavu antropologie na Masarykově Univerzitě. Databáze se dělí na dvě části. První část obsahuje 443 fotografií otisků předškolních dětí na keramice. Druhá část obsahuje 891 fotografií otisků školních dětí, které mohou být na keramice nebo na zeleném materiálu, který obsahuje méně nedokonalostí než keramika. U každého subjektu je přítomno od jednoho po desítky různých otisků různé kvality. Otisky nejsou foceny ze stejné vzdálenosti, proto je na každé fotce přítomen milimetrový papír pro možnost převodu vzdálenosti v pixelech na vzdálenost v milimetrech.

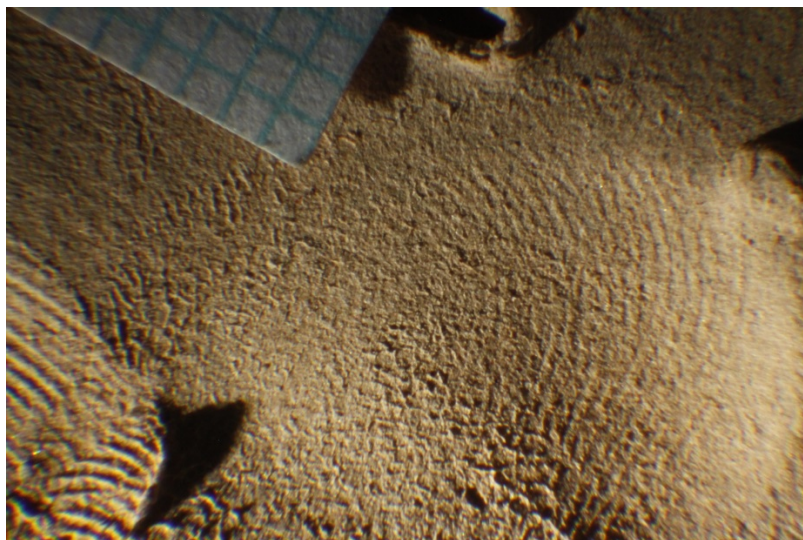
### 7.1 Funkčnost a optimalizace dílčích částí zpracování

Obě části databáze obsahují velké množství otisků, které nedosahují dostatečné kvality a dělají aplikaci při analýze problémy. Často se jedná o špatně nasvícený milimetrový papír, nedostatečně výrazný otisk nebo velké, výrazné defekty otisku. Jelikož jsou na sobě kroky závislé, ovlivňuje každý krok kvalitu výsledku následujících kroků. Tím kvalita analýzy výrazně trpí. V mnoha případech kvůli tomu nedosahuje segmentovaná oblast dostatečného počtu bloků pro spolehlivější analýzu, nebo obsahuje pouze nevalidní bloky jako ostré hrany keramiky nebo výrazné nečistoty povrchu.

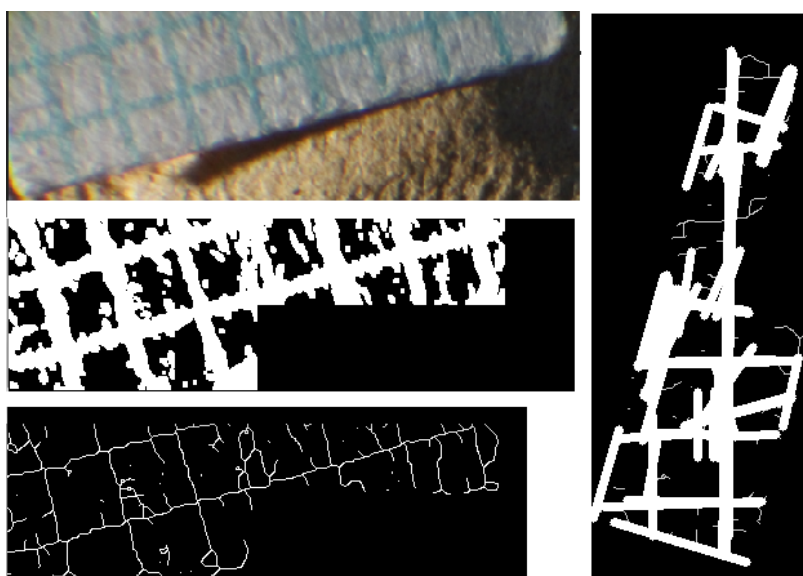
#### 7.1.1 Vyhodnocení ppi

Kvalita výsledku vyhodnocení ppi závisí na třech hlavních faktorech: Dostatečná velikost papíru, světlost papíru vůči okolí a čistota papíru. Pokud z těchto pohledů nedosahuje papír dostatečné kvality, je většinou výsledek nepoužitelný, nebo není žádného výsledku dosaženo, protože program žádný milimetrový papír nedetekuje. Ukázka dostatečně kvalitního, velkého a výrazného papíru a analýzy ppi na něm je vidět na obrázku 6.1. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 6.1, světlost papíru je kritická pro jeho samotné nalezení, protože program předpokládá, že se jedná o nejsvětlejší část obrazu. Nedostatečně osvětlený papír je možné vidět na obrázku 7.1. Program v tomto případě hlásí nenalezený papír a používá přednastavenou hodnotu. Další dva faktory (velikost a čistota papíru) způsobují nepřesnou extrakci ppi z nalezené části. Na obrázku 7.2 lze vidět, že nečistoty papíru způsobily velmi nepřesnou binarizaci a nalezení velkého množství špatných čar. V tomto případě bylo na-

lezené ppi ještě přesné díky filtrování moc úzkých oblastí. Častěji způsobí znečištěný papír nepřesnou binarizaci a s tím i špatnou detekci otočení, která vede na nesmyslné hodnoty.



Obrázek 7.1: Otisk se špatně nasvíceným papírem. Program ho nedetekuje.

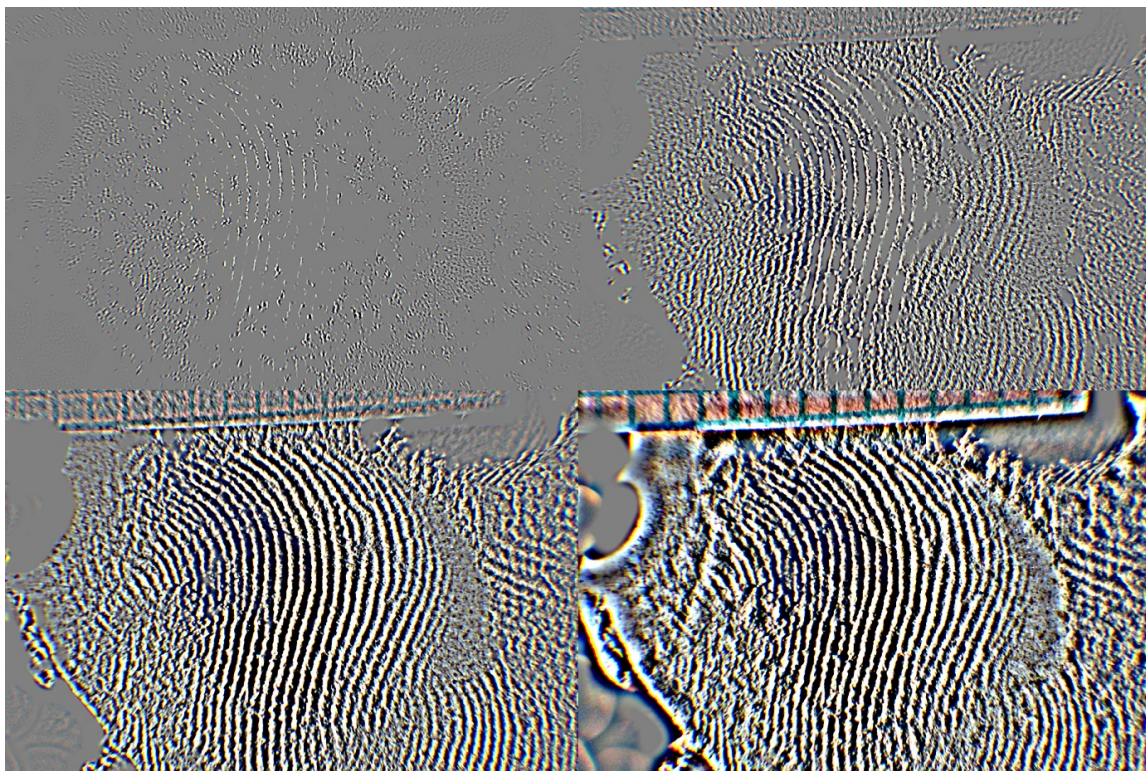


Obrázek 7.2: Ukázka znečištění papíru vedoucí na nepřesnou binarizaci. Výsledná nalezená orientace (napravo), originální oblast (nahore), binarizace (uprostřed), zúžení linií (dole).

### 7.1.2 Zvýraznění otisku

*Cartoon + texture separation* algoritmus pracuje správně jen při nastavení správné hodnoty sigma. Ta ovlivňuje rozsah frekvence, která bude ještě považována jako popředí obrazu. Při nastavení moc nízké hodnoty nedojde k dostatečnému zvýraznění papilárních linií, ale šum a ostatní nechtěné části obrazu se ve výsledku neprojeví. Při zvolení příliš velké hodnoty sigma nedojde k lepšímu zvýraznění linií oproti ideální hodnotě, ale budou více zvýrazněny i ostatní části obrazu, které mohou způsobit chyby v segmentaci a dalších krocích. Na obrázku 7.3 je možné v pravé dolní části vidět výsledek použití algoritmu s příliš vysokou hodnotou sigma. Mezi papilárními liniemi jsou zvýrazněny nedokonalosti, mezitím kvalita samotných linií je zlepšena pouze mírným zvýrazněním rozmazaných částí. Naopak jsou zde víc zvýrazněny hrany keramického výrobku a jemné výstupky na něm, které nemají s otiskem nic společného.

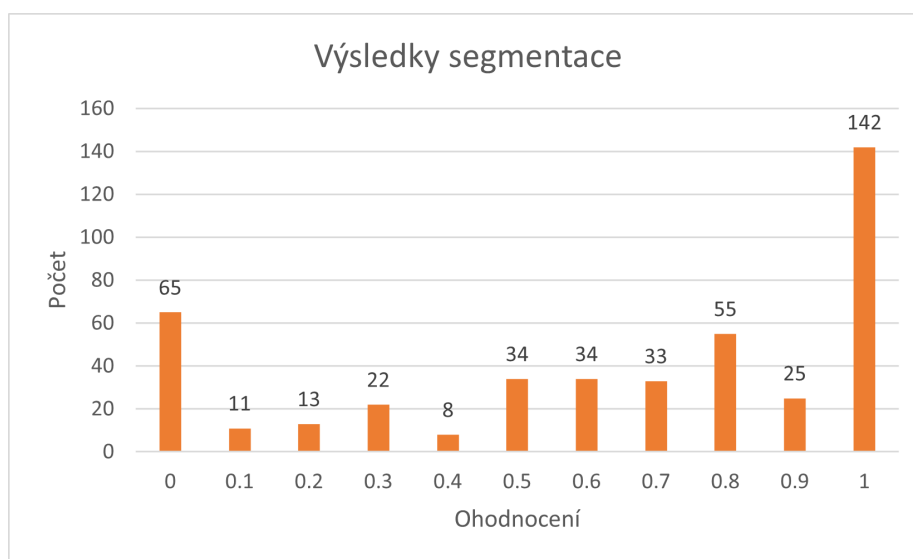
Dalším faktorem, který ovlivňuje výsledek tohoto kroku, jsou samotné rozměry obrazu. Algoritmus dokáže zpracovat i obrazy většího rozlišení, ale výrazně se zvětší doba běhu a je nutné příslušně zvětšit hodnotu sigma. Obrazy z databáze mají všechny rozměr  $(3088 \times 2056)$ . Experimentálně vyšel koeficient zmenšení 0,3 jako ideální hodnota, která kombinuje zachování dostatečného množství detailů s přijatelnou rychlostí zpracování. Příliš detailní obraz může přesnosti analýzy uškodit, jelikož se tyto detaily projeví už jen jako šum a žádné další hodnotné informace pro analýzu nepřinesou.



Obrázek 7.3: Výsledky použití algoritmus *Cartoon + texture separation* s různými hodnotami sigma na obrázku 6.2. Vlevo nahoře: sigma 3 (extrémně nízká), vpravo nahoře: sigma 5 (nízká), vlevo dole: sigma 10 (ideální), vpravo dole: sigma 20 (příliš vysoká).

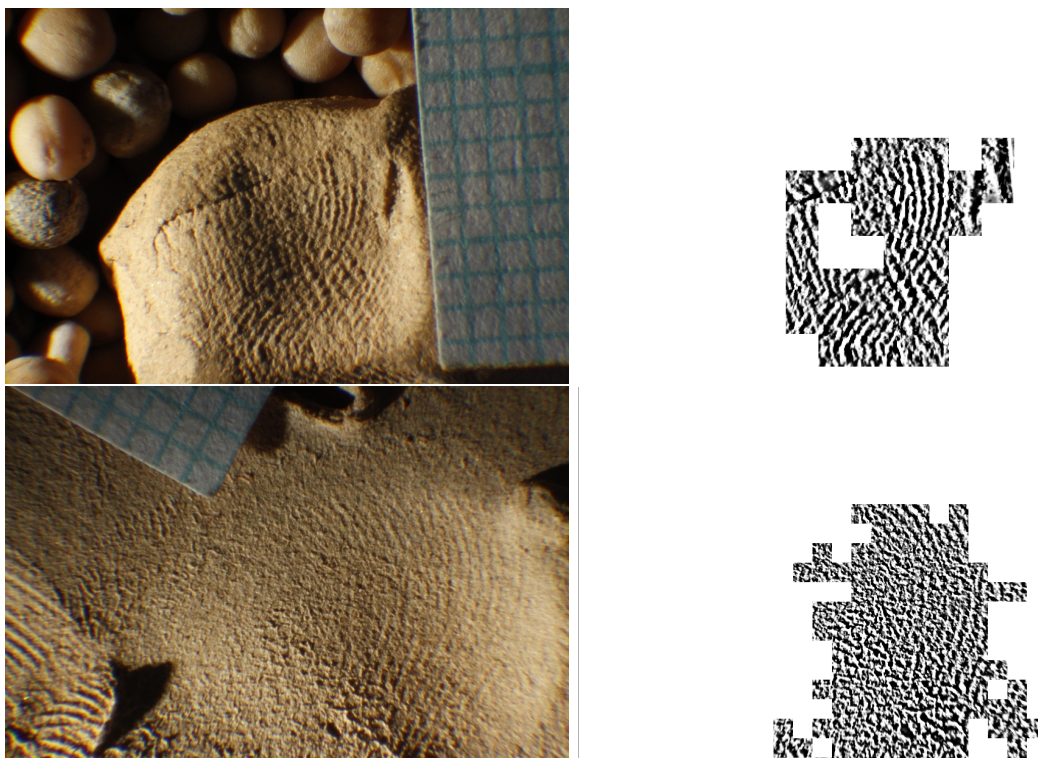
### 7.1.3 Segmentace

Jelikož je segmentace založena na rozptylu hodnot pixelů v bloku, je výsledek segmentace nejvíc závislý na kvalitě a výraznosti papilárních linií vůči pozadí a okolí. V případě, že se jedná o nejméně výraznější změny obrazu, může i zdánlivě nekvalitní otisk být po zvýraznění segmentací správně oddělen. Segmentaci silně negativně ovlivňují díry v otisku, které vytvářejí ostré a výrazné hrany. Na ideální otisky podobného rozložení lze najít vhodnou pevnou hodnotu hraničního rozptylu pixelů, nad kterou bude blok považován za popředí. Pevná hranice ale na větší databázi selže. Proto byla zvolena variabilní hranice, která se určuje jako 70 % hodnoty rozptylu bloku s největším rozptylem intenzity pixelů. Tato hranice pro správné fungování předpokládá, že otisk bude část zvýrazněného obrazu s největšími změnami intenzity pixelů. Pokud tomu tak není, segmentace selhává. Výsledky segmentace byly hodnoceny subjektivně na škále od 0 do 10, kde 0 znamená absolutní selhání segmentace a 10 perfektní ohraničení otisku (nemusí být celý, ale nesmí obsahovat nic jiného). V případech ohodnocených lépe než 7 se s otiskem dá rozumně pracovat, nižší hodnoty ale znamenají větší nepřesnosti segmentace, tudíž očekávané výrazně nepřesné konečné výsledky. V obrázku 7.4 jsou vidět statisticky zpracované výsledky. Lze z něho usoudit nadpoloviční úspěšnost segmentace a z velké části velmi přesnou segmentaci. Velmi přesnou segmentaci lze vidět na obrázku 6.3. Příklad méně přesného a nepoužitelného výsledku segmentace je vidět na obrázku 7.5.



Obrázek 7.4: Graf znázorňující úspěšnost segmentace na první části (jelikož druhá část byla dodána později) databáze.

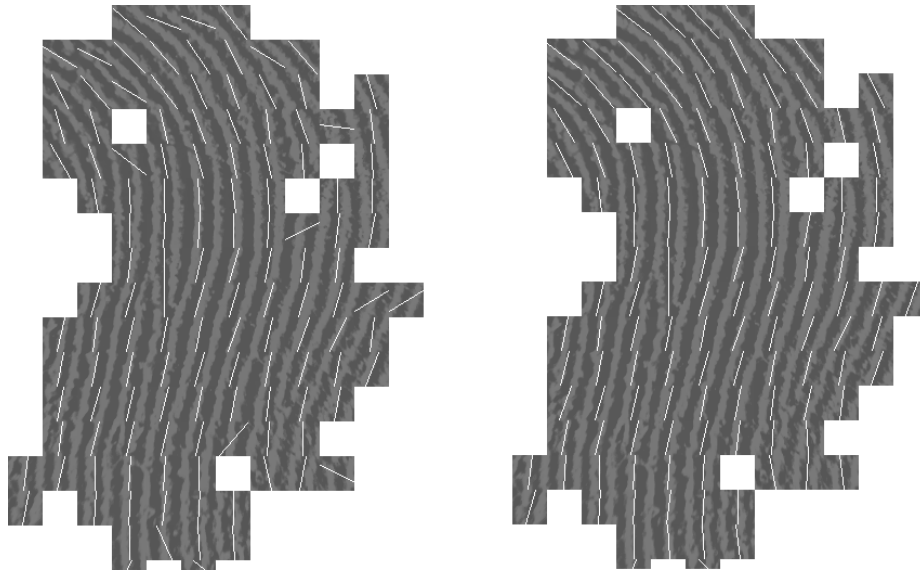




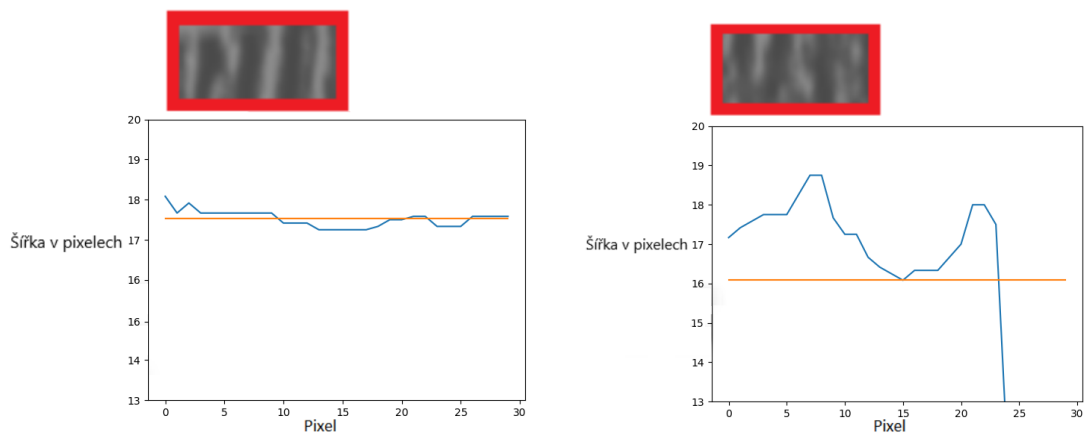
Obrázek 7.5: Porovnání ještě přijatelné segmentace (vrchní dva obrázky) a nepoužitelného výsledku segmentace (spodní dva obrázky).

#### 7.1.4 Výpočet pole orientací, šířky a frekvence papilárních linií

Základním předpokladem pro přesné určení šířky a frekvence papilárních linií je správně určené pole orientací. Experimenty vyšlo najevo, že pole orientací je v naprosté většině případů značně přesnější při použití pouze zvýrazněného otisku místo otisku normalizovaného. Rozdíl lze vidět na obrázku 7.6. Zlepšení je vidět hlavně v blocích, které mají nepřesné hranice linií a další poškození. V případě nepřesné orientace bude použito pro jejich výpočet špatně otočené rozšířené okno a v lepším případě budou hodnoty odpovídat papilárním liniím s větší šířkou. V horším případě je do výpočtu zaneseno tolik nepřesností, že jako výsledek bude nesmyslná hodnota. Program se snaží tyto hodnoty filtrovat pomocí označování bloků s moc velkým rozptylem šířky nebo frekvence jako nevalidní. Filtrování je vidět na obrázku 7.7 (hodnoty šířky jsou zde ještě v pixelech, převádí se v dalším kroku na reálné velikosti). Důsledkem tohoto filtrování je to, že je frekvenci a šířku neovlivňuje rozšíření okna u okrajových bloků. Tato filtrace může také označit jako nevalidní ty bloky, ve kterých jsou linie málo výrazné, nebo zde vůbec žádné linie nejsou (lokální selhání segmentace). Částečně lze tedy poznat celkovou úspěšnost běhu programu na poměru segmentovaných bloků a bloků s validními výsledky.



Obrázek 7.6: Porovnání výpočtu pole orientací na normalizovaném otisku (vlevo) a na pouze zvýrazněném otisku (vpravo). V obou případech je pole zobrazeno na normalizovaném otisku pro zlepšení viditelnosti čar. Originální otisk je vidět na obrázku 6.2



Obrázek 7.7: Ukázka dvou rozšířených bloků s vypočtenými šířkami linií pro každý řádek pixelů. Blok s malým rozptylem vypočtených šířek (vlevo) se považuje za validní a jeho výsledek je uložen do výsledné matice. Blok s větším rozptylem vypočtených šířek (vpravo) se považuje za chybný. V tomto případě je vypočtená průměrná hodnota (oranžová čára) v realistickém rozmezí, na samotném bloku (šedý obdélník ohraničený červeně v levém horním rohu) jsou ale vidět vady, kvůli kterým je lepší blok zahodit.

## 7.2 Ručně anotovaná databáze

Pro podrobné porovnání přesnosti automatické analýzy se skutečnými hodnotami bylo z databáze vybráno 5 otisků, které byly na vybraných blocích manuálně přeměřeny a výsledky porovnány s automatickou analýzou programu. Otisky byly vybrány tak, aby výběr pokryl větší interval věku a obě pohlaví. Výběr také obsahuje jeden otisk na zelené hmotě. Dále musely otisky splňovat tři základní požadavky:

1. Segmentace úspěšně vyčlenila popředí otisku a zbylé nepřesnosti byly v zanedbatelném počtu proti počtu správně segmentovaných bloků
2. Jelikož pole orientací výrazně ovlivňuje výsledek zjištění šířky a frekvence linie, musí být pole orientací na většině bloků odhadnuto dostatečně spolehlivě.
3. Výsledkem výpočtu ppi je správně otočená oblast milimetrového papíru bez výrazného počtu špatně detekovaných čar.

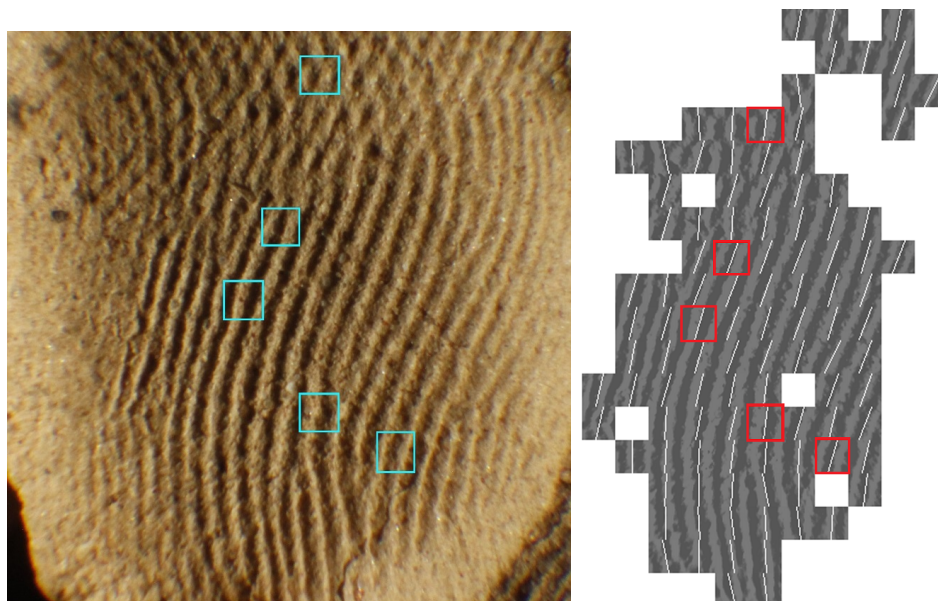
V každém otisku byla nejdříve zkontrolována vypočtená hodnota ppi (změřením počtu pixelů mezi středy čar na třech místech a zprůměrováním této hodnoty). Následně bylo náhodně vybráno 5 bloků pro porovnání výsledků. Orientace linií byla kontrolována změřením úhlu mezi osou x fotky a linií odhadnuté orientace. Šířka linií byla změřena jako počet pixelů mezi pravou hranou bílé oblasti a levou hranou černé oblasti linie. Frekvence byla vypočtena podělením 1 mm průměrnou vzdáleností vrcholů linií. Všechna měření byla provedena třikrát a výsledek zprůměrován. Vzdálenosti v pixelech byly převedeny pomocí manuálně zjištěného ppi. Jelikož výpočet ppi nebyl původně nutným požadavkem této práce, byly poté porovnány původní průměrné hodnoty a hodnoty získané jejich přepočítáním na správné ppi. V tabulkách 7.1 a 7.2 jsou uvedeny informace o vlastních otisků a jejich ppi. Obrázek 7.8 obsahuje ukázkou vybraných bloků z otisku a získané a změřené informace z nich. Zbýlých 5 otisků se nachází v příloze B.

Otisk	Pohlaví	Věk
1	m	4
2	m	0,83
3	m	6,6
4	m	15,89
5	f	15,27

Tabulka 7.1: Vybrané otisky a informace o osobách

Otisk	ppi z programu	Změřené ppi
1	4397	4394
2	6519	6731
3	4215	4521
4	4224	4445
5	4224	4318

Tabulka 7.2: Získané a změřené ppi u jednotlivých otisků



Obrázek 7.8: Otisk 1 (nalevo) a jeho segmentovaná, normalizovaná část s vypočteným polem orientací (napravo). Na obrázcích jsou vyznačené zkoumané bloky.

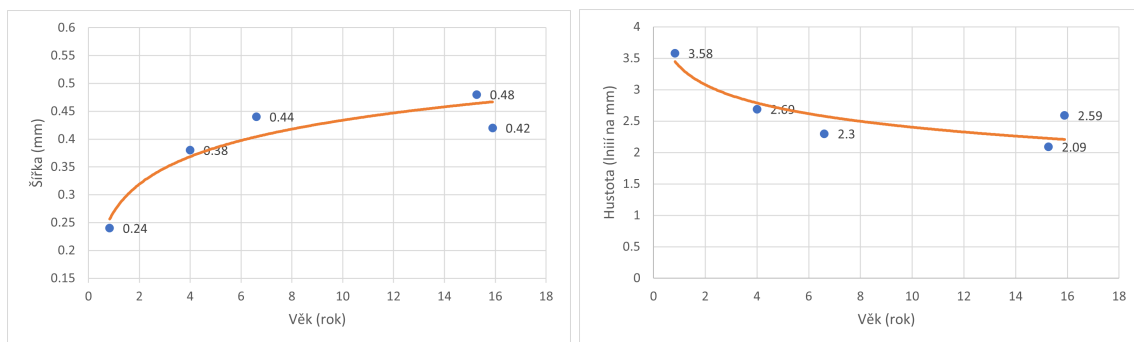
Šířka			Frekvence			Orientace	
Blok	Program	Změřená	Blok	Program	Změřená	Blok	Odchylka (°)
1	0,367	0,365	1	2,918	2,760	1	15
2	0,342	0,387	2	2,885	2,820	2	0
3	0,359	0,379	3	2,773	2,595	3	0
4	0,445	0,445	4	2,261	2,172	4	0
5	0,391	0,374	5	2,547	2,582	5	0
$\bar{x}$	0,381	0,390	$\bar{x}$	2,689	2,585	$\bar{x}$	3

Tabulka 7.3: Porovnávání manuálně změřených a z programu získaných hodnot z Otisku 1.

### 7.2.1 Zhodnocení

Průměrná chyba výpočtu ppi byla 94 ppi, což při zohlednění tloušťky čar milimetrového papíru a jejich nepřesnosti lze zanedbat. V přepočtu se jedná o chybu 3,7 pixelů na milimetr a čáry milimetrového papíru mohou být v některých případech i přes 30 pixelů tlusté. Díky tomuto faktu je možné považovat získané ppi za přesné, jelikož hodnoty přepočítané na naměřené ppi by se změnilo o nepodstatnou velikost. Je nutné zdůraznit, že (jak se psalo na začátku této kapitoly) byly otisky vybrány cíleně s výrazným papírem. Průměr naměřených šířek a hustot se lišil od průměru hodnot získaných z programu zanedbatelně. Naměřené hodnoty ve specifických blocích už měly větší nepřesnosti, které lze zdůvodnit nečistotami povrchu keramiky a dalšími nedokonalostmi otisku. Na obrázku 7.9 lze vidět odhad vývoje šířky a hustoty papilárních linií s věkem na ručně anotované databázi. Vzhledem k malému množství použitých otisků v tomto kroku je graf pouze orientační.

Vzhledem k věku a pohlaví osoby, které patří poslední otisk (na zelené hmotě, žena, 15,27 let, šířka 0,484 mm), je získaná i naměřená šířka linií nápadně vysoká. K porovnání



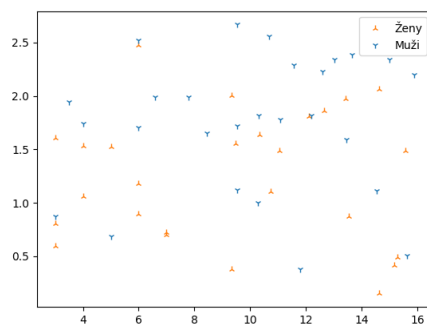
Obrázek 7.9: Graf znázorňující šířky (vlevo) a hustoty (vpravo) papilárních linií vybraných subjektů vzhledem k jejich věku.

otisk 4 (keramika, muž, 15,89 let, 0,421 mm) má podstatně nižší šířku papilárních linií. Otisk je výjimečný v sadě (kromě pohlaví) i jiným materiálem pozadí. Ten mohl způsobit nepřesnosti v měření kvůli jeho větší matnosti a nevýrazným hranám linií. Třetí otisk (keramika, muž, 6,6 let, 0,438 mm) má šířku linií také větší, než by se dalo u muže tohoto věku očekávat. Celkově je ale v grafu vidět stoupající trend šířky linií s věkem a naopak klesající trend frekvence linií s věkem, což odpovídá předpokladům souvisejícím s růstem prstu popsaném v podkapitole 2.2.

### 7.3 Statistické zpracování databáze

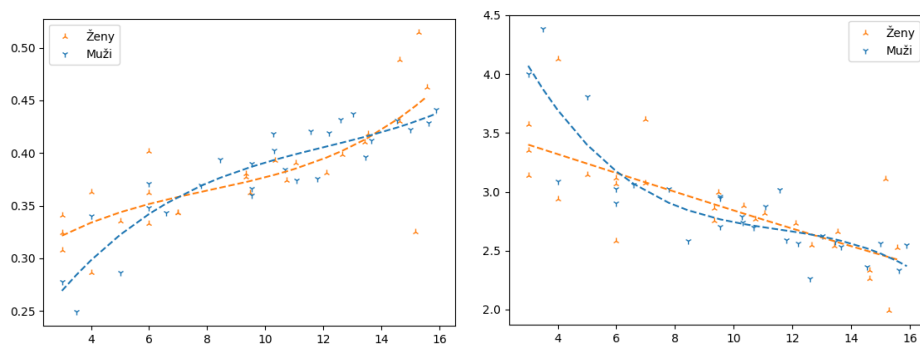
Pro statistické zpracování celé databáze bylo nutné oddělit otisky s viditelně nepoužitelnou segmentací, z větší části špatným polem orientací nebo špatně zpracovaným milimetrovým papírem (jak oddělení, tak zvýraznění čar, tak otočení). Databáze byla ručně ohodnocena pro identifikaci otisků, které by potenciálně mohly mít dobrý výsledek (u některých otisků sám program vyhodnotil ppi jako nevalidní). Cesta k nim byla zaznamenána do textového souboru, který byl následně použit jako vstup pro skript, který z nich extrahoval vypočítané údaje a statisticky je zpracoval. Po protřídění otisků na použitelné a nepoužitelné zbylo z celkového množství 1334 otisků pouze 409 použitelných (necelých 31 %) patřící celkem 107 různým lidem (52 žen a 55 mužů). Tento pokles byl z velké míry způsoben naprosto špatně detekovaným milimetrovým papírem (u jednoho otisku chyběl papír úplně) a špatnou segmentací otisku způsobenou málo výrazným otiskem na originální fotce. Dva subjekty nemohly být zahrnuty do výsledné statistiky vůbec kvůli chybějícím informacím o jejich věku a pohlaví.

Hodnoty získané z těchto otisků byly sjednoceny podle jejich vlastníků, zprůměrovány a rozděleny podle pohlaví. Následně byly odebrány krajní hodnoty určené intervalem spolehlivosti 95 %. První získanou hodnotou byly orientace linií. Vzhledem ke skutečnosti, že otisky mohou být různých velikostí, orientací a tvarů, jsou výsledky orientace papilárních linií statisticky nevýznamné. Graf těchto hodnot je možné vidět na obrázku 7.10. Hodnoty orientace jsou přibližně rovnoměrně rozloženy u všech věků.



Obrázek 7.10: Graf znázorňující orientaci papilárních linií v radiánech u otisků lidí z databáze vzhledem k jejich věku.

Zajímavější a užitečnější výsledky jsou vidět na grafech zobrazených na obrázku 7.11, které znázorňují vývoj šířky a frekvence papilárních linií s věkem. Z grafů lze vidět zejména u mužů jasný stoupající trend šířky papilárních linií s věkem. Očekávaně opačný trend je u frekvence linií u mužů. U otisků patřícím ženám se hodnoty šířek linií také zvětšují, ale intenzita těchto změn je podstatně nižší, než je tomu u mužů. V intervalu do 7 let jsou šířky linií u žen průměrně větší než u mužů. Tento výsledek odporuje naměřeným hodnotám z [23] a informacím z podkapitoly 2.2. V intervalu 7 až 13,5 let je šířka linií již podle předpokladů statisticky větší u mužů a menší u žen. U frekvence jsou intervaly rozloženy podobně, jen po třináctém roku se průměr hodnot již nerozestupuje. Přerušované čáry jsou polynomiální funkce třetího stupně proložené body pro obě pohlaví. Slouží pro ilustraci korelace šířky a frekvence papilárních linií s věkem.



Obrázek 7.11: Graf znázorňující šířky (vlevo) a hustoty (vpravo) papilárních linií otisků lidí z databáze vzhledem k jejich věku.

# Kapitola 8

## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnutí, implementace a testování aplikace, která získává informace z plastických otisků prstů a následně je graficky a textově exportuje. Aplikace z otisků získává šířku, frekvenci a orientaci papilárních linií. Plastické otisky jsou oproti úmyslně zanechaným otiskům prakticky vždy v horším stavu a jsou hůř analyzovatelné. Proto jsem v aplikaci použil algoritmy pro rozpoznávání klasických otisků prstů, které jsem modifikoval pro použití na plastických otiscích.

V rámci práce jsem nastudoval literaturu ohledně zpracování, zvýrazňování a rozpoznávání otisků, vytvořil návrh aplikace pro zjišťování šířky a frekvence papilárních linií, aplikaci implementoval a otestoval na malé databázi s ručním měřením a na větší databázi s měřením automatickým. Aplikace musela nad rámec zadání automaticky detekovat ppi obrazu, což znatelně zlepšilo výsledky. Všechny body zadání byly tedy splněny včetně rozšíření o detekci ppi.

V práci jsem prezentoval výsledky programu na dvou datových sadách. První sadou byla ručně anotovaná databáze pěti otisků (vybraných na základě kritérií pro kvalitu segmentace, orientačního pole a zjištěného ppi), na které se zkoumala přesnost výpočtu po jednotlivých blocích v porovnání s manuálním měřením hodnot v těchto blocích. Výsledky ukázaly dostatečně přesné měření na většině otisků a stoupající šířku linií s věkem subjektu. Druhou sadou byla celá databáze získaná od doc. RNDr. Miroslava Králíka, Ph.D. z ústavu antropologie na Masarykově Univerzitě. Výsledky analýzy databáze ukázaly, že s přibývajícím věkem jsou papilární linie širší a jejich frekvence se postupně zmenšuje. Rozdíly byly nejvíce poznat hlavně u mladších dětí (ve věku do osmi let). Pohlaví subjektu nemělo na zjištěnou šířku a frekvenci papilárních linií dle výsledků velký vliv.

Prostor pro zlepšení aplikace vidím hlavně ve verifikaci výsledků. Před statistickým zpracováním výsledků běhu aplikace nad databází bylo nutné všechny výsledky projít a podle kvality segmentace, pole orientací a ilustrace detekovaného milimetrového papíru a vybrat jen ty otisky, u kterých tyto tři kroky proběhly úspěšně. Kdyby aplikace výsledky dokázala zhodnotit sama, ušetřilo by to hodiny práce. Další zlepšení by bylo možné u zjišťování ppi. Pro dosažení přesnějších výsledků je nutné zdokonalit jak detekci milimetrového papíru, tak jeho binarizaci a detekci čar. Jedná se hlavně o detekci tmavšího a více znečištěného papíru.

# Literatura

- [1] ARDELL. *How to detect lines in OpenCV?* [StackOverflow]. 2017. (<https://stackoverflow.com/users/6230266/ardell>). Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/45322630/how-to-detect-lines-in-opencv>.
- [2] ASHER, D. C. *Why do identical twins have different fingerprints?* [online]. Immediate Media Company Limited, září 2021 [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.sciencefocus.com/the-human-body/why-do-identical-twins-have-different-fingerprints-2/>.
- [3] BARBIERI, J., WANAT, K. a SEYKORA, J. *Pathobiology of Human Disease*. Academic Press, 2014. 1134-1144 s. ISBN 978-0-12-386457-4. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123864567035012>.
- [4] BHANOO, S. N. *New technique can classify a fingerprint as male or female* [online]. The New York Times, Nov 2015 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2015/11/24/science/new-technique-can-identify-gender-from-a-fingerprint.html>.
- [5] BIGA, L. M., DAWSON, S., HARWELL, A. a KOL. *Anatomy and Physiology*. OpenStax/Oregon State University, 2019. 217-223 s. ISBN 978-1-955101-15-8.
- [6] BIRADAR, V. G. a SAROJADEVI, H. Fingerprint ridge orientation extraction: a review of state of the art techniques. *International Journal of Computer Applications*. Citeseer. 2014, sv. 91, č. 3, s. 8–13. DOI: 10.5120/15859-4773.
- [7] BLEAY, S. M., CROXTON, R. S. a PUIT, M. D. *Fingerprint development techniques: Theory and application*. Wiley, 2018. 520 s. ISBN 9781119992615.
- [8] BOVIK, A. C. *The Essential Guide to Image Processing*. Academic Press, 2009. 672 s. ISBN 978-0-12-374457-9.
- [9] BRISSOM, J. *Efficiently detect sign-changes in python* [StackOverflow]. 2010. (<https://stackoverflow.com/users/407438/jim-brissom>). Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/3843017/efficiently-detect-sign-changes-in-python>.
- [10] BUADES, A., LE, T., MOREL, J.-M. a VESE, L. Cartoon+Texture Image Decomposition. *Image Processing On Line*. 2011, sv. 1, s. 200–207. [https://doi.org/10.5201/ipol.2011.blmv\\_ct](https://doi.org/10.5201/ipol.2011.blmv_ct).
- [11] CHAKRABARTY, J. *Fingerprint scanner on phones: History and evolution* [online]. iGadgetsWorld, Jan 2020 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.igadgetsworld.com/fingerprint-scanner-history-evolution-but-do-we-really-need-that/>.



- [12] DRAHANSKÝ, M., ORSÁG, F., DOLEŽEL, M. a KOL. *Biometrie*. Computer Press a. s., 2011. 294 s. ISBN 978-80-254-8979-6.
- [13] DYRE, S. a SUMATHI, C. Reliable orientation field estimation of fingerprint based on adaptive neighborhood analysis. *ICTACT Journal on Image & Video Processing*. 2017, sv. 7, č. 3, s. 1456–1462. DOI: 10.21917/ijivp.2017.0209.
- [14] EDUCATION, I. C. *Three-Tier Architecture*. Říjen 2020. Dostupné z: <https://www.ibm.com/cloud/learn/three-tier-architecture>.
- [15] EVATT, E. J. The Development and Evolution of the “Papillary” Ridges and Patterns on the Volar Surface of the Hand. *Journal of anatomy and physiology*. Wiley-Blackwell. 1906, sv. 41, Pt 1, s. 66. Dostupné z: [https://embryology.med.unsw.edu.au/embryology/index.php/Paper\\_-\\_The\\_development\\_and\\_evolution\\_of\\_the\\_%22papillary%22\\_ridges\\_and\\_patterns\\_on\\_the\\_volar\\_surface\\_of\\_the\\_hand\\_\(1906\)](https://embryology.med.unsw.edu.au/embryology/index.php/Paper_-_The_development_and_evolution_of_the_%22papillary%22_ridges_and_patterns_on_the_volar_surface_of_the_hand_(1906)).
- [16] FOUNDATION, P. S. *PySide6*. Prosinec 2021. Dostupné z: <https://pypi.org/project/PySide6/>.
- [17] GUTH, F. *Create a rectangle around a binary image mask* [StackOverflow]. 2018. (<https://stackoverflow.com/users/1344369/fred-guth>). Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/51879090/create-a-rectangle-around-a-binary-image-mask>.
- [18] HARIS. *Draw a line using an angle and a point in OpenCV* [StackOverflow]. 2014. (<https://stackoverflow.com/users/1573209/haris>). Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/22252438/draw-a-line-using-an-angle-and-a-point-in-opencv>.
- [19] HAWTHORNE, M. R. *Fingerprints: Analysis and understanding*. 1. vyd. CRC Press, 2009. 142 s. ISBN 978-1420068641.
- [20] HE, J. a BAO, J. Normalization of fingerprint image using the local feature. In: IEEE. *2012 International Conference on Computer Science and Service System*. 2012, s. 1643–1646. ISBN 978-0-7695-4719-0.
- [21] HONG, L., WAN, Y. a JAIN, A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. IEEE. 1998, sv. 20, č. 8, s. 777–789. DOI: 10.1109/34.709565.
- [22] JAIN, A. K., FLYNN, P. J. a ROSS, A. A. *Handbook of biometrics*. Springer, 2010. 556 s. ISBN 978-0-387-71041-9.
- [23] KRALIK, M. a NOVOTNÝ, V. Epidermal ridge breadth: An indicator of age and sex in paleodermatoglyphics. *Variability and Evolution*. Leden 2003, sv. 11, s. 5–30.
- [24] KUMAR, R., SINGH, J. P. a SRIVASTAVA, G. Altered Fingerprint Identification and Classification Using SP Detection and Fuzzy Classification. In: Springer. *Proceedings of the Second International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2012), December 28-30, 2012*. 2014, s. 1343–1349. ISBN 978-81-322-1602-5.

- [25] LIU, M., LIU, S. a YAN, W. Latent fingerprint segmentation based on ridge density and orientation consistency. *Security and Communication Networks*. Hindawi. May 2018, s. 1–10, [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/scn/2018/4529652/>.
- [26] MALGO. *How to find the largest white pixel region from a binary image* [StackOverflow]. 2020. (<https://stackoverflow.com/users/10484156/malgo>). Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/35476741/how-to-find-the-largest-white-pixel-region-from-a-binary-image>.
- [27] MALTONI, D. *Handbook of Fingerprint Recognition*. 2. vyd. Springer, 2009. 494 s. ISBN 978-1-84882-254-2.
- [28] MALÍNSKÝ, J., LICHNOVSKÝ, V. a MALÍNSKÁ, Z. *Přehled embryologie člověka v obrazech*. 5. vyd. Univerzita Palackého v Olomouci, Lékařská fakulta, 2015. 387–388 s. Dostupné z: <https://mefanet.upol.cz/clanky.php?aid=81>.
- [29] NANAVATI, S., THIEME, M. a NANAVATI, R. *Biometrics: Identity verification in a networked world: A wiley tech brief*. Wiley Computer Publishing, 2002. 320 s. ISBN 978-0-471-09945-1.
- [30] OEHLMANN, L., HUCKEMANN, S. a GOTTSCHLICH, C. Performance evaluation of fingerprint orientation field reconstruction methods. In: IEEE. *3rd International Workshop on Biometrics and Forensics (IWBF 2015)*. 2015, s. 1–6. ISBN 9781479981069.
- [31] SADLER, T. W. *Langmanova Lékařská Embryologie*. 10. vyd. Grada, 2011. 387–388 s. ISBN 978-80-247-2640-3.
- [32] SARANYA, R. a INDU, M. G. An Effective Method for Forensic Latent Fingerprint Enhancement and Dictionary Construction. *International journal of engineering research & technology (IJERT)*. IJERT. 2014, sv. 3, č. 4, s. 13–17. ISSN 2278-0181. Dostupné z: <https://www.ijert.org/research/an-effective-method-for-forensic-latent-fingerprint-enhancement-and-dictionary-construction-IJERTV3IS040161.pdf>.
- [33] SHAH, A. *Through the eyes of Gabor Filter* [online]. Medium, Jun 2018 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: [https://medium.com/@anuj\\_shah/through-the-eyes-of-gabor-filter-17d1fdb3ac97](https://medium.com/@anuj_shah/through-the-eyes-of-gabor-filter-17d1fdb3ac97).
- [34] THAI, R. *Fingerprint image enhancement and minutiae extraction*. Perth, Australia, 2003. Dizertační práce. School of Computer Science and Software Engineering, The University of Western Australia. Dostupné z: <https://www.peterkovesi.com/studentprojects/raymondthai/RaymondThai.pdf>.
- [35] UNITED STATES DEPARTMENT OF JUSTICE. *The Fingerprint Sourcebook*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. 563 s. ISBN 978-1502828422.
- [36] ČEŠKA, P. *Extrakce podrobných informací z otisku prstu*. Brno, CZ, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/24033/>.

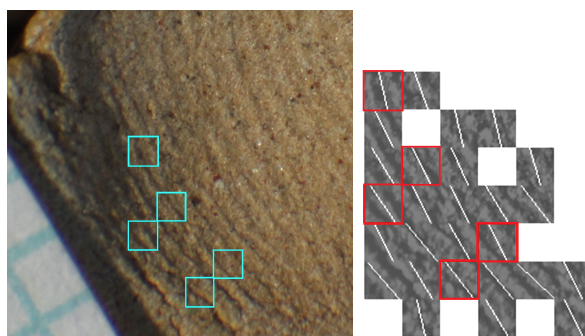
## Příloha A

# Obsah přiložené SD karty

- thesis – zdrojové soubory k textu bakalářské práce
- xkrsic00.pdf – text bakalářské práce ve formátu pdf
- source – zdrojové soubory k aplikaci
- readme.md – návod na spouštění aplikace

## Příloha B

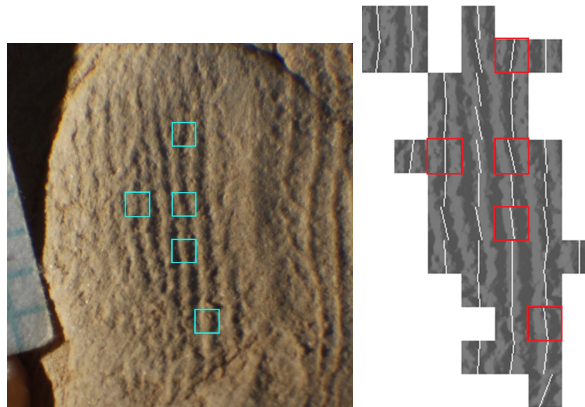
# Výsledky ručně anotované databáze



Obrázek B.1: Otisk 2 (nalevo) a jeho segmentovaná, normalizovaná část s vypočteným polem orientací (napravo). Na obrázcích jsou vyznačené zkoumané bloky.

Šířka			Frekvence			Orientace	
Blok	Program	Změřená	Blok	Program	Změřená	Blok	Odchylka (°)
1	0,242	0,242	1	3,850	3,630	1	0
2	0,290	0,239	2	3,788	3,732	2	10
3	0,226	0,237	3	4,393	4,184	3	0
4	0,230	0,240	4	4,690	4,015	4	25
5	0,244	0,254	5	5,861	3,581	5	10
$\bar{x}$	0,244	0,242	$\bar{x}$	3,577	3,8284	$\bar{x}$	15

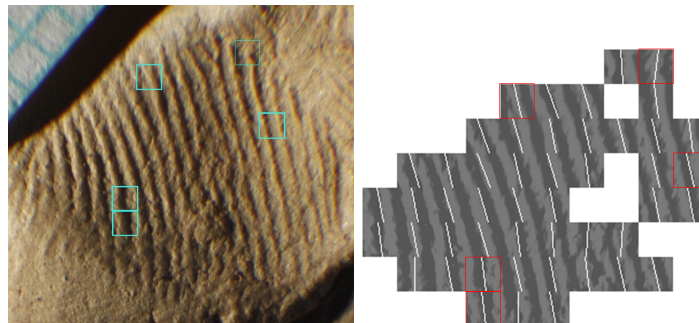
Tabulka B.1: Porovnávání manuálně změřených a z programu získaných hodnot z Otisku 2.



Obrázek B.2: Otisk 3 (nalevo) a jeho segmentovaná, normalizovaná část s vypočteným polem orientací (napravo). Na obrázcích jsou vyznačené zkoumané bloky.

Šířka			Frekvence			Orientace	
Blok	Program	Změřená	Blok	Program	Změřená	Blok	Odchylka (°)
1	0,405	0,443	1	2,618	2,484	1	0
2	0,397	0,383	2	2,467	2,363	2	0
3	0,445	0,434	3	2,232	2,342	3	0
4	0,467	0,421	4	2,202	2,282	4	0
5	0,476	0,506	5	1,974	1,874	5	0
$\bar{x}$	0,438	0,437	$\bar{x}$	2,299	2,269	$\bar{x}$	0

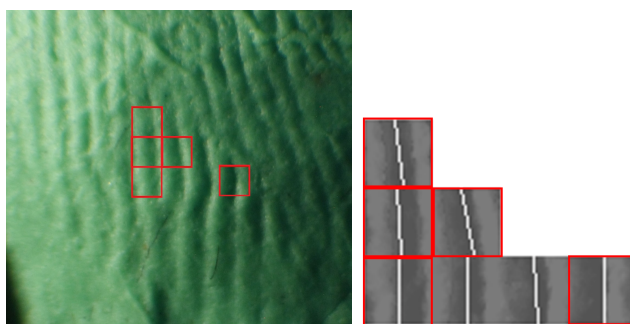
Tabulka B.2: Porovnávání manuálně změřených a z programu získaných hodnot z Otisku 3.



Obrázek B.3: Otisk 4 (nalevo) a jeho segmentovaná, normalizovaná část s vypočteným polem orientací (napravo). Na obrázcích jsou vyznačené zkoumané bloky.

Šířka			Frekvence			Orientace	
Blok	Program	Změřená	Blok	Program	Změřená	Blok	Odchylka (°)
1	0,422	0,425	1	2,121	2,465	1	20
2	0,351	0,375	2	2,702	2,283	2	0
3	0,376	0,387	3	2,915	2,549	3	0
4	0,472	0,493	4	2,878	2,354	4	10
5	0,465	0,508	5	2,324	2,160	5	0
$\bar{x}$	0,421	0,437	$\bar{x}$	2,588	2,362	$\bar{x}$	6

Tabulka B.3: Porovnávání manuálně změřených a z programu získaných hodnot z Otisku 4.



Obrázek B.4: Otisk 5 (nalevo) a jeho segmentovaná, normalizovaná část s vypočteným polem orientací (napravo). Na obrázcích jsou vyznačené zkoumané bloky.

Šířka			Frekvence			Orientace	
Blok	Program	Změřená	Blok	Program	Změřená	Blok	Odchylka (°)
1	0,441	0,484	1	2,537	2,329	1	0
2	0,523	0,508	2	1,944	1,969	2	0
3	0,537	0,539	3	1,875	1,924	3	0
4	0,528	0,512	4	1,944	1,925	4	0
5	0,392	0,453	5	2,126	1,917	5	0
$\bar{x}$	0,484	0,499	$\bar{x}$	2,085	2,0128	$\bar{x}$	0

Tabulka B.4: Porovnávání manuálně změřených a z programu získaných hodnot z Otisku 5.