



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**  
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**REKONSTRUKCE POŠKOZENÉ ČÁSTI OTISKU PRSTŮ**  
RECONSTRUCTION OF DAMAGED PARTS OF FINGERPRINTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**VLADISLAV HALVA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. ONDŘEJ KANICH**

**BRNO 2019**

## Zadání bakalářské práce



21983

Student: **Halva Vladislav**

Program: Informační technologie

Název: **Rekonstrukce poškozené části otisku prstů**

**Reconstruction of Damaged Parts of Fingerprint Image**

Kategorie: Zpracování obrazu

Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající biometrického rozpoznávání podle otisků prstů, soustředěte se na kroky zvyšující kvalitu otisku. Seznamte se s metodami pro rekonstrukci případně generování syntetických otisků prstů a detekci poškození.
2. Lokalizujte poškozené oblasti otisku prstu. Navrhněte metody pro rekonstrukci otisku prstu v lokalizovaných oblastech.
3. Implementujte navržené algoritmy z předchozího bodu.
4. Otestujte algoritmy na vhodné databázi (např. syntetických otisků). Analyzujte přesnost provedené rekonstrukce.
5. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná rozšíření Vašeho řešení.

Literatura:

- Maltoni, D., Maio, D., Jain, A.K. and Prabhakar, S.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2009, pages 512. ISBN 978-1-8488-2254-2.
- Barotová, Š.: *Detector of Skin Diseases by Fingerprint Technology*, 2017. Bachelor's thesis. FIT BUT in Brno, Brno.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

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

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

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

Datum zadání: 1. listopadu 2018

Datum odevzdání: 15. května 2019

Datum schválení: 1. listopadu 2018

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá rekonstrukcí poškozených oblastí otisků prstů. Cílem je návrh a implementace algoritmu pro rekonstrukci právě těchto oblastí. Navržený algoritmus se skládá ze tří hlavních částí. První částí je získání vlastností z otisku a jejich odvození v poškozených oblastech. Druhou částí je lokalizace poškozených oblastí, která je založena především na jasnosti struktury papilárních linií. Poslední částí je samotná rekonstrukce v lokalizovaných oblastech pracující s Gaborovým filtrem. Algoritmus je implementován v jazyce C++ s využitím knihovny OpenCV. Následně je provedeno vyhodnocení kvality rekonstrukce. Nejprve je úspěšnost vyhodnocena pomocí změny kvality vypočtené nástrojem NIST NFIQ 2.0 a dalším alternativním nástrojem hodnotícím kvalitu otisků prstů. V následujícím kroku je ručně vyhodnocena úspěšnost rekonstrukce jednotlivých typů poškození.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the reconstruction of damaged fingerprint areas. The main goal is the design and implementation of an algorithm for the reconstruction of these regions. The designed algorithm consists of three main parts. The first part is fingerprint feature extraction and their derivation in damaged areas. The second part is a localization of damaged areas, which is based mainly on the structure of papillary lines. The last part is the damaged areas reconstruction itself. Gabor filter is used in this part of the process. The algorithm is implemented in C++ using the OpenCV library. An analysis of the reconstruction success rate is done afterwards. It is at first evaluated using the difference of quality between the input and processed fingerprint image, estimated by NIST NFIQ 2.0 and one other alternative tool for fingerprint image quality evaluation. The next step is a manual evaluation of the reconstruction success rate in various types of damaged areas.

## **Klíčová slova**

otisky prstů, kvalita otisků prstů, simulace poškození, rekonstrukce otisků prstů, detekce, zpracování obrazu

## **Keywords**

fingerprints, fingerprints quality, damage simulation, damaged fingerprints reconstruction, detection, image processing

## **Citace**

HALVA, Vladislav. *Rekonstrukce poškozené části otisku prstů*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich

# Rekonstrukce poškozené části otisku prstů

## Prohlášení

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

.....  
Vladislav Halva  
15. května 2019

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Kanichovi za odbornou pomoc a cenné připomínky při psaní této práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Otisk prstu</b>	<b>3</b>
2.1	Papilární linie . . . . .	3
2.2	Klasifikace otisků prstů . . . . .	4
2.3	Markanty . . . . .	5
2.4	Kvalita otisku prstu . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Proces rozpoznávání otisků prstů</b>	<b>7</b>
3.1	Snímání otisku prstu . . . . .	7
3.2	Zlepšování kvality otisků prstů . . . . .	8
3.3	Binarizace . . . . .	13
3.4	Ztenčování papilárních linií . . . . .	13
3.5	Detekce a extrakce markantů . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Faktory snižující kvalitu otisků prstů</b>	<b>15</b>
4.1	Stav prstu uživatele . . . . .	15
4.2	Okolní faktory . . . . .	16
4.3	Kožní choroby mající vliv na otisk prstu . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Syntetický otisk prstu</b>	<b>18</b>
5.1	SFinGe . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Návrh a implementace aplikace</b>	<b>21</b>
6.1	Návrh aplikace . . . . .	21
6.2	Implementace . . . . .	23
<b>7</b>	<b>Testování a vyhodnocení výsledků</b>	<b>39</b>
7.1	Databáze otisků prstů . . . . .	39
7.2	Určení kvality pomocí NIST NFIQ 2.0 . . . . .	40
7.3	Alternativní metoda určení kvality otisku prstu . . . . .	42
7.4	Vyhodnocení kvality rekonstrukce poškozených oblastí . . . . .	43
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>49</b>
	<b>Literatura</b>	<b>51</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Otisky prstů jsou dnes nejpoužívanější [8] biometrikou používanou k rozpoznávání osob. Kromě použití ve forenzní analytice a bezpečnostních systémech, se v posledních letech hojně používají v běžném životě u zabezpečení počítačů, mobilních telefonů, domácností a podobně. Je tomu tak zejména díky jednoduchosti a přirozenosti jejich použití. Důležitým faktorem masivního rozšíření rozpoznávání podle otisků prstů je také fakt, že je dobře přijímáno společností.

Existuje ovšem řada faktorů, které mohou poškodit strukturu papilárních linií prstu, což může značně znehodnotit jejich otisk. Značný šum může vzniknout také během snímání otisku, ať už nesprávným zacházením se senzorem nebo vlivem okolí. Tako poškozený otisk by byl velice pravděpodobně rozpoznávacím přístrojem odmítnut, jelikož bude vyhodnocen jako neplatný. V takovém případě ovšem může pomoci mechanismus, který dokáže zlepšit kvalitu částí otisku, které nejsou fatálně poškozeny a také rekonstruovat části, u kterých typ poškození nedovoluje pouhé zlepšení kvality. Následně je možné z takového otisku extrahovat potřebné rysy a úspěšně provést rozpoznání.

Cílem této práce je přispět k metodice zlepšování kvality a rekonstrukce poškození otisků prstů, konkrétně návrhem a implementací nástroje pro rekonstrukci jejich poškozených částí.

Druhá kapitola této práce obsahuje základní informace o otiscích prstů a z oblasti jejich rozpoznávání. Třetí kapitola je zaměřena na proces jejich rozpoznávání. Jsou zde popsány jednotlivé kroky od snímání otisků, po extrakci markantů. Zvláštní důraz je kláden na metody zlepšování kvality. Čtvrtá kapitola popisuje faktory, které snižují kvalitu otisků, mezi které patří nečistoty, okolní faktory, a v neposlední řadě také kožní choroby. Pátá kapitola se věnuje generování syntetických otisků prstů, jehož metodiky jsou úzce spjaty s rekonstrukcí poškozených částí.

V šesté kapitole je podrobně popsán návrh a implementace navržené aplikace pro rekonstrukci poškozených částí otisku prstu. V první části je krok po kroku popsán navržený proces získávání vlastností z otisku prstu, lokalizace poškození a následné rekonstrukce těchto částí. V druhé části jsou představeny konkrétní části implementované aplikace a použité algoritmy. Sedmá kapitola je věnována testování vytvořené aplikace a vyhodnocení výsledků. Obsahuje výsledky testování kvality dvěma různými metodami, resp. nástroji, a také zhodnocení rekonstrukce různých typů poškození otisků prstů. Osmá kapitola obsahuje souhrn dosažených výsledků, doplněný o návrh na rozšíření zde popsáного řešení a případné vylepšení některých částí.

# Kapitola 2

## Otisk prstu

Otisky prstů jsou jednou z biometrických charakteristik, která se v současnosti používá k identifikaci osob. Jejich použitelnost pro účel identifikace osob poprvé publikoval *Henry Faulds* v roce 1880. Začátkem 20. století byla identifikace na základě otisků prstů formálně uznána a stala se standardním procesem forenzní analytiky. [9]

V této kapitole bude popsán jejich původ, charakteristiky, klasifikace a stručně také hodnocení kvality.

### 2.1 Papilární linie

Otisky prstů jsou grafickou reprezentací papilárních linií, které se nachází na povrchu spodní strany prstů, na rukou i nohou, každého jedince. Jedná se o vyvýšený reliéf kůže, který je formován ve spodnější vrstvě kůže tzv. škáře (dermis). Jejich výška se pohybuje v rozmezí 0,1 – 0,4 mm a šířka v rozmezí 0,2 – 0,5 mm. Struktura těchto linií je u každého člověka jedinečná, proto jej dokáže jednoznačně identifikovat. Jejich unikátnost, u každého jednotlivce, je známá již od roku 1788. Problémem při identifikaci pomocí otisků prstů mohou být různá kožní onemocnění a poškození kůže, která znemožní nebo ztíží rozpoznatelnost papilárních linií. [9] [11]

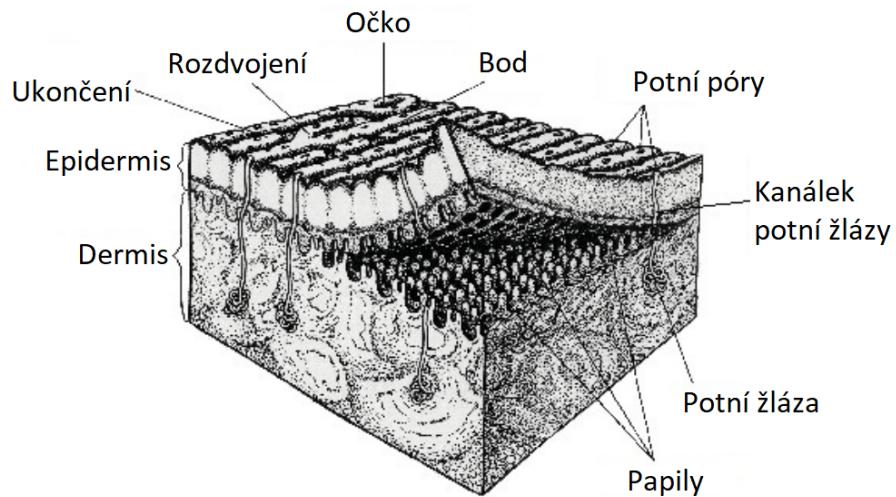
Utváření kůže je jako všechno v lidském těle řízeno genetickými a environmentálními faktory. Genetický kód v DNA tedy udává způsob utváření kůže. Přesný tvar papilárních linií je však výsledkem náhodných událostí. K jejich formování dochází již v embryonální fázi vývoje a pokud nedojde k jejich poškození, například v důsledku poranění, jsou s časem relativně neměnné. [13]

Na obrázku 2.1 lze vidět dvě svrchní vrstvy kůže, tedy epidermis (pokožka) a dermis (škára) a jejich rozhraní, na kterém se nachází papily, které se vlní za účelem dosažení větší plochy pro lepší vstřebávání živin. Tímto způsobem formují papilární linie. Pod těmito vrstvami se nachází třetí vrstva kůže tzv. *podkožní vazivo*, která je tvořena převážně tukovými buňkami, a její hlavní funkcí je izolace a nouzové dodávky energie. [20] [7]

Hlavní funkcí *epidermis* je tvořit bariéru mezi tělem a okolím. Skládá se z několika vrstvěho epitelu, jehož povrchové vrstvy neustále rohovatí a odumírají. To je způsobeno tím, že buňky ve spodních vrstvách kůže se neustále dělí, a tak svrchní vrstvy vytlačují dále od zdroje krve a živin. Kůže se takto neustále obnovuje. [20]

*Dermis* je elastická, vazivová vrstva, která je tvořena síti kolagenových a elastických vláken. Díky *dermis* je kůže pružná, celistvá a odolná, navíc se v ní nachází cévy a nervová zakončení. [7]

Na výše zmíněném obrázku 2.1 lze dále vidět právě papilární linie a některé markanty (viz 2.3), které tvoří.



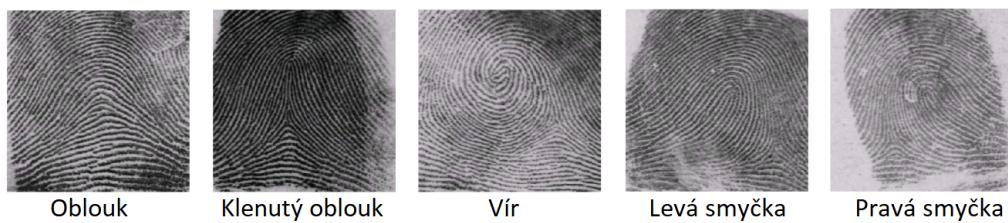
Obrázek 2.1: Řez kůží zobrazující její jednotlivé vrstvy a papilární linie. [9]

## 2.2 Klasifikace otisků prstů

Identifikace osoby vyžaduje porovnání jejího otisku prstu se všemi otisky v prohledávané databázi. Tato operace může být poměrně náročná, zejména pokud je databáze rozsáhlá, jak zpravidla bývá. Pro zrychlení identifikace je třeba snížit počet porovnání, která se provádí. Toho je možné docílit rozdělením otisků prstů v databázi do několika kategorií podle určité vlastnosti. Dnes se používá dělení do tzv. *tříd otisků prstu* (viz obrázek 2.2), na základě globálního pohledu na vzor, který vytváří papilární linie [9]. [17]

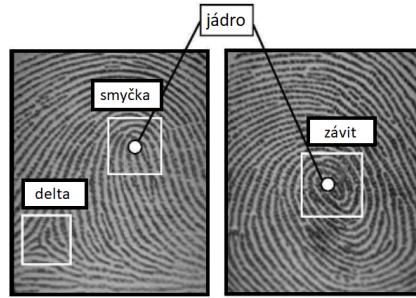
První pravidlo pro rozdělení otisků prstů do 9 tříd, na základě globálního pohledu na papilární linie, publikoval *Jan Evangelista Purkyně* v roce 1823 [9].

První hloubkovou studii otisků později, v roce 1892, provedl *Francis Galton*, který otisky rozdělil do třech základních tříd – oblouk, smyčka a vír. Dále pak jednotlivé třídy rozdělil do podtříd [17]. Na Galtonův klasifikační systém navázal o několik let později *Edward Henry*, který rozdělil otisky do pěti tříd – oblouk, klenutý oblouk, pravá a levá smyčka a vír. [9] [15]



Obrázek 2.2: Třídy otisků prstů. [9]

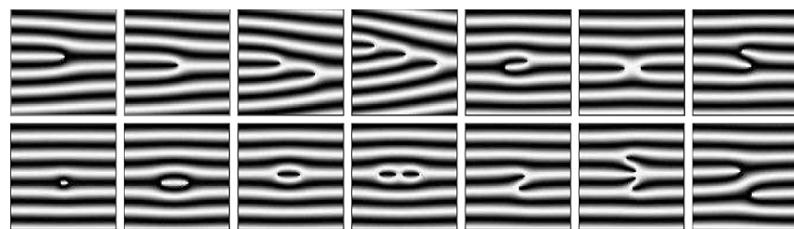
Důležitými rysy pro rozlišení otisků prstů a jejich klasifikaci do jednotlivých tříd jsou tzv. singulární body [19]. Prvním z těchto bodů je *delta*. Jedná se o místo, kde se papilární linie otisku prstu rozbíhají do tří směrů. *Jádro*, jako druhý typ singulárního bodu, může být dvojího typu a to konkrétně *smyčka* nebo *závit* [13]. Singulární body lze vidět na obrázku 2.3. [9]



Obrázek 2.3: Singulární body otisku prstu. [13]

## 2.3 Markanty

Rysy, které se používají pro rozlišování otisků prstů se nazývají *markanty*. Jedná se o lokální útvary, které tvoří papilární linie [13]. Těchto markantů se v daktyloskopických systémech pro kriminalistické účely používá mnoho. V jednom otisku se jich vyskytuje až několik desítek, poskytují tak dostatečně mnoho informací pro rozlišení jednotlivých otisků prstů. Na obrázku 2.4 lze vidět několik základních typů markantů, zleva doprava v tomto pořadí *ukončení*, *jednoduchá vidlička/rozdrojení*, *dvojitá vidlička*, *trojitá vidlička*, *hák*, *křížení*, *boční kontakt*, *bod*, *interval*, *jednoduchá smyčka*, *dvojitá smyčka*, *jednoduchý most*, *dvojitý most*, *průsečná linie*. Pro automatické/počítačové rozpoznávání otisků prstů se používají pouze dva typy markantů, těmi jsou ukončení a vidlička. Důvodem je, že je jejich automatické rozpoznání, oproti ostatním markantům, méně náročné [13]. [9]



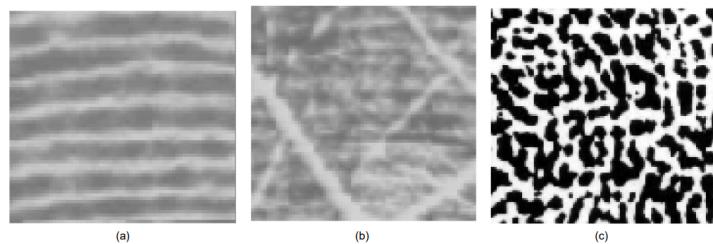
Obrázek 2.4: Základní typy markantů. [8]

## 2.4 Kvalita otisku prstu

Kvalitu oblastí nasnímaného otisku prstu může ovlivnit řada faktorů, viz kapitola 4. Obecně se dá kvalita rozpoznatelnosti těchto oblastí rozdělit do třech kategorií podle míry viditelnosti struktury papilárních linií a to konkrétně: [12]

- *Dobře rozeznatelné oblasti*, ze kterých lze bez vylepšování kvality extrahovat markanty.
- *Poškozené obnovitelné oblasti*, u kterých je čitelnost papilárních linií lehce snížena například drobnými nečistotami, ale je možné tyto faktory eliminovat.
- *Nevratně poškozené oblasti* jsou tak poškozené rušivými faktory, že není možné rekonstruovat podobu papilárních linií, a to ani na základě jejich okolí.

Příklady snímků takových oblastí lze vidět na obrázku 2.5.



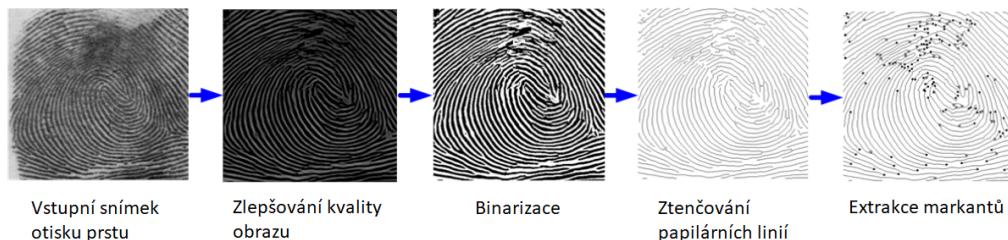
Obrázek 2.5: Rozdělení oblastí otisků prstů podle kvality: (a) dobře rozeznatelná oblast, (b) poškozené obnovitelná oblast, (c) nevratně poškozená oblast. [12]

## Kapitola 3

# Proces rozpoznávání otisků prstů

Automatické rozpoznávání na základě otisků prstů obvykle spočívá v extrakci a porovnávání markantů jednotlivých otisků prstů. V důsledku mnoha faktorů (poškození kůže, nevhodně použitý senzor apod.) jsou snímky otisků prstů často ve špatné kvalitě. Proto je kritickou částí proces zlepšení kvality obrazu a viditelnosti struktur papilárních linií tak, aby byly markanty co nejlépe identifikovatelné. [12]

Pokud nejsou papilární linie ve snímku kompletně nečitelné, je často možné vhodně zvolenými kroky výrazně zlepšit kvalitu otisku prstu. Proces zpracování a zlepšení kvality otisku prstu je schématicky znázorněn na obrázku 3.1. Jednotlivé kroky tohoto procesu budou podrobněji rozebrány v následujících podkapitolách. [9] [12]



Obrázek 3.1: Proces zpracování obrazu otisku prstu a detekce markantů. [8]

### 3.1 Snímání otisku prstu

Sejmutí otisku prstu je prvním nezbytným krokem. Nejčastěji se dnes používá tzv. *online snímání*, kdy je otisk prstu zachycen pomocí elektronického snímače (čtečkou otisků prstů) různého typu. Druhý způsob, tzv. *offline snímání*, kdy se nejprve prst otiskne na papírovou daktyloskopickou kartu a následně se pomocí skeneru načítá do počítače, se dnes již příliš nepoužívá. [17]

At už otisk prstu získáme metodou *online* či *offline snímání*, výstupem je digitální forma otisku prstu. Tento otisk prstu je však ve své základní formě a může obsahovat (často obsahuje) množství šumu, způsobeného okolními vlivy při snímání, jako například okolním světlem, vlhkostí senzoru nebo nesprávným tlakem působeným na prst během snímání. Z tohoto důvodu, je pro co nejvyšší efektivitu extrakce markantů, vhodné provést následující úpravy otisku. [9] [7]

## 3.2 Zlepšování kvality otisků prstů

Metody pro zlepšení kvality otisku prstu jsou v dalším kroku aplikovány na získaný otisk, jejich úkolem je zlepšit čitelnost papilárních linií v oblastech zatížených přiměřenou mírou šumu a identifikovat oblasti, které jsou natolik znehodnoceny, že jejich další zpracování není možné. Tato fáze je velice důležitá pro další zpracování otisku a její úspěšnost a kvalita závisí na konkrétních použitých metodách. Pokud otisk obsahuje vysoké množství šumu, mohou být následně detekovány markanty v místech, kde se nenachází, a naopak nemusí být detekovány některé skutečné markanty. [13] [17] [9]

V této fázi je možné použít řadu metod pro zlepšení kvality a zvýraznění/extrakci papilárních linií. Mezi ty nejčastější lze zařadit například škálování histogramu, výsledkem je otisk s vyšším dynamickým rozsahem intenzity, což může mít za následek zvýšení kontrastu snímku. [21]

Mezi další často používané metody patří filtrace v prostorové a spektrální oblasti. Pro filtrování v prostorové oblasti se často používá *2D Gaborův filtr*. Po převedení do spektra pomocí *Rychlé Fourierovy transformace (FFT)* jsou nejpoužívanějšími filtry *Dolní propust*, *filtr ButterWorth*, a *filtr Ikonomopoulos*. [9]

### 3.2.1 Filtrování v prostorové oblasti

Při filtrování v prostorové oblasti se pro redukci šumu a zlepšení rozpoznatelnosti papilárních linií často využívá banka Gaborových filtrov. Pro toto filtrování je nejdříve nutné provést nad otiskem několik operací, a to konkrétně *Normalizaci* a výpočet *Lokální orientace papilárních linií* a *Lokální frekvence papilárních linií*. Tyto kroky budou popsány níže. Pro zvýraznění hran lze dále použít filtr s charakterem horní propusti, níže bude popsán Laplaceův filtr, který má právě tento charakter. [7] [3]

#### Normalizace

Normalizace se používá zejména pro úpravu stupňů šedi (intenzity) jednotlivých pixelů snímku otisku prstu podél papilárních linií tak, aby se co nejvíce snížila jejich variace, což pomůže při dalším zpracování. Důležitou vlastností normalizace je, že nemění strukturu papilárních linií. [12] [22]

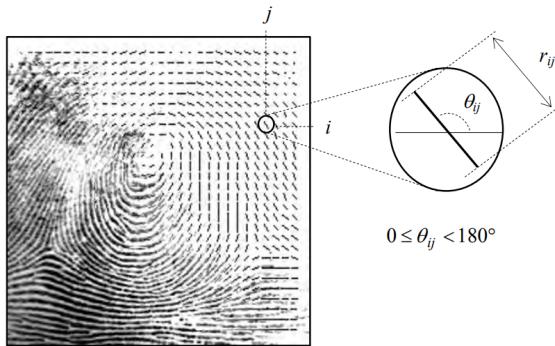
Nechť  $I(i, j)$  je stupeň šedi (intenzita) pixelu  $[i, j]$ ,  $M_0$  požadovaná střední hodnota a  $V_0$  požadovaná variace,  $M$  a  $V$  po řadě vypočítaná střední hodnota a variace obrazu  $I$ , pak lze normalizovanou hodnotu stupně šedi  $N(i, j)$  v bodě  $[i, j]$  vypočítat podle vzorce 3.1. [22]

$$N(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{V_0(I(i,j)-M)^2}{V}} & \text{pokud } I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{V_0(I(i,j)-M)^2}{V}} & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.1)$$

#### Lokální orientace papilárních linií

Lokální orientace papilární linie v pixelu  $[x, y]$  je úhel  $\theta_{xy}$ , který by papilární linie svírala s horizontální osou, kdyby dále pokračovala stále stejným směrem a je vypočítána vzhledem k malému okolí bodu, jehož středem je pixel  $[x, y]$ . Úhel  $\theta_{xy}$  nabývá pouze hodnot  $0^\circ - 180^\circ$  jelikož papilární linie nemají směr. [17]

Pro uložení informace o lokálních orientacích papilárních linií obrazu se používá tzv. *pole orientací*, což je matice  $\mathbf{D}$ , jejíž pole udržují hodnoty o lokálních orientacích. V praxi není počítán úhel  $\theta_{xy}$  pro každý pixel obrazu zvlášť. Původní obraz je rozdělen čtvercovou mřížkou velikosti  $[i, j]$  s bloky zahrnující několik polí původního obrazu. Pole orientací obsahuje jednu hodnotu  $\theta_{ij}$  pro každý blok zmíněné mřížky, úhel  $\theta_{ij}$  tohoto bloku je vypočítán jako průměr velikostí úhlů  $\theta_{xy}$  pro pixely původního obrazu, které zahrnuje tato buňka  $[i, j]$  matice  $\mathbf{D}$ . Ke každé velikosti úhlu  $\theta_{ij}$  dále náleží hodnota  $r_{ij}$ , která udává spolehlivost hodnoty  $\theta_{ij}$ . Tato spolehlivost  $r_{ij}$  nabývá vysokých hodnot v oblastech s dobrou kvalitou obrazu otisku prstu. V poškozených a špatně rozpoznatelných místech je její hodnota naopak nízká. [17]



Obrázek 3.2: Otisk prstu prolínající se s odpovídajícím polem orientací. [17]

Nejintuitivnějším přístupem pro výpočet lokálních orientací, uložených v blocích pole orientací, je výpočet pomocí gradientů.

Dominantní úhel  $\theta_{ij}$  pro blok  $[i, j]$  pole orientací lze vypočítat kombinací gradientů  $\nabla_x$  a  $\nabla_y$  všech pixelů obrazu otisku, náležícím tomuto bloku, pomocí následujících rovnic: [17]

$$\theta_{ij} = 90^\circ + \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{V_x}{V_y} \right), \quad (3.2)$$

$$V_x = \sum_{m=-q}^q \sum_{n=-q}^q 2 \cdot \nabla_x(x_i + m, y_j + n) \cdot \nabla_y(x_i + m, y_j + n), \quad (3.3)$$

$$V_y = \sum_{m=-q}^q \sum_{n=-q}^q (\nabla_x(x_i + m, y_j + n)^2 - \nabla_y(x_i + m, y_j + n)^2), \quad (3.4)$$

$$(3.5)$$

kde  $q$  je polovina počtu pixelů tvořících hranici okna okolí bodu  $[x, y]$ , které se účastní výpočtu. V případě použití čtvercového okna o rozměrech  $p \times p$  je tedy  $q = \frac{p-1}{2}$ . [17]

Výpočet gradientů  $\nabla_x$  a  $\nabla_y$ , pro směr  $x$  a  $y$ , pro každý pixel  $[x, y]$  obrazu otisku prstu lze provést pomocí *Sobelova operátora* rozměru  $3 \times 3$  viz obrázek 3.3. [17] [12] [22]

$$\begin{array}{c} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \\ \text{(a)} \qquad \qquad \qquad \text{(b)} \end{array}$$

Obrázek 3.3: Ukázka Sobelova operátoru pro: (a) směr osy y, (b) směr osy x.

### Lokální frekvence papilárních linií

Lokální frekvence papilárních linií  $f_{xy}$  je další podstatnou vlastností otisku prstu. Principem jejího výpočtu je fakt, že v oblasti otisku prstu bodu  $[x, y]$ , kde se nenachází žádné markanty, ani singulární body, lze úrovně šedotónové baryvy střídajících se hřebenů a údolí papilárních linií, ve směru kolmém na směr papilárních linií  $\theta_{xy}$ , modelovat jako sinusoidu. Lokální frekvence papilárních linií může být odhadnuta z frekvence této sinusoidy. [12] [23]

K výpočtu lokální frekvence je třeba normalizovaný obraz otisku prstu  $G$  a pole orientací  $O$ , jejichž získání bylo popsáno v předcházejících kapitolách. Analogicky k tomuto poli orientací  $O$ , lze vytvořit pole frekvencí  $F$ . [12]

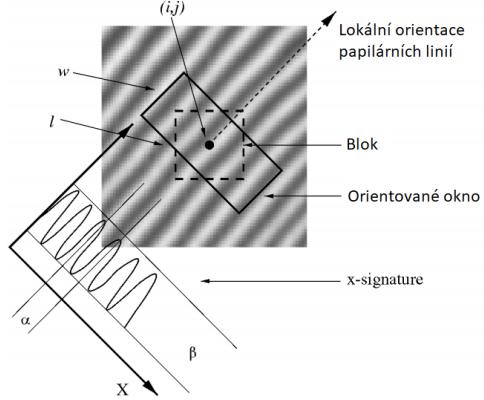
V tuto chvíli je tedy obraz otisku prstu rozdelený na bloky, se středem v pixelech  $[i, j]$ , o velikosti  $w \times w$ . Pro každý tento blok je nutné vytvořit orientované okno o velikosti  $l \times w$ , jehož orientaci udává lokální směr papilárních linií  $\theta_{ij}$ , na nějž je kolmé, viz obrázek 3.4. Následně je pro každý blok, pomocí orientovaného okna, vypočtena tzv. *x-signatura*,  $X[0], X[1], \dots, X[l-1]$ . Výpočet x-signatury je popsán pomocí následujících rovnic: [12] [17]

$$X[k] = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} G(u, v), k = 0, 1, \dots, l-1 \quad (3.6)$$

$$u = i + \left(d - \frac{w}{2}\right) \cos O(i, j) + \left(k - \frac{l}{2}\right) \sin O(i, j), \quad (3.7)$$

$$v = j + \left(d - \frac{w}{2}\right) \sin O(i, j) + \left(\frac{l}{2} - k\right) \cos O(i, j) \quad (3.8)$$

Z této signatury je následně odvozena vzdálenost jednotlivých papilárních linií (vlnová délka)  $T(i, j)$ . Lokální frekvence papilárních linií je pak převrácenou hodnotou této vzdálenosti, tedy  $F(i, j) = \frac{1}{T(i, j)}$ . Celý proces výpočtu je znázorněn na obrázku 3.4. [12] [17] [23]



Obrázek 3.4: Schématické znázornění výpočtu lokální frekvence papilárních linií. [12]

### Gaborův filtr

Lokální orientace a frekvence souběžně běžících papilárních linií poskytují dostatečné informace pro odfiltrování šumu otisku prstu. Sinusový průběh tvaru hřebenů a údolí papilárních linií se ve směru jejich orientace mírně mění. Z toho důvodů může pásmová propust, s parametry upravenými vzhledem k aktuální frekvenci a orientaci, úspěšně filtrovat šum, aniž by změnila strukturu papilárních linií. Jako pásmovou propust je vhodné použít např. Gaborův filtr, jelikož má směrově i frekvenčně selektivní vlastnosti. Ve své obecné podobě je Gaborův filtr  $g$  definován pomocí následujících rovnic: [23] [17] [12]

$$g(x, y, \theta, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2} \right] \right\} \cdot \cos(2\pi f \cdot x_\theta), \quad (3.9)$$

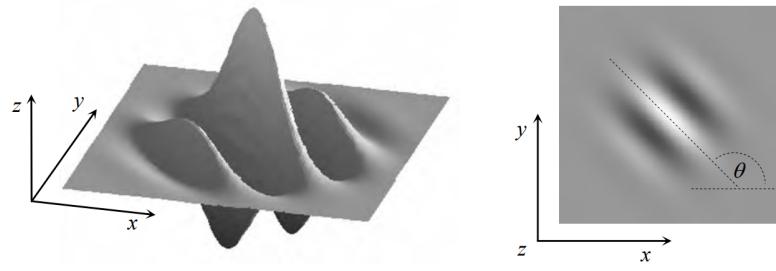
$$x_\theta = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta, \quad (3.10)$$

$$y_\theta = -x \cdot \sin \theta + y \cdot \cos \theta \quad (3.11)$$

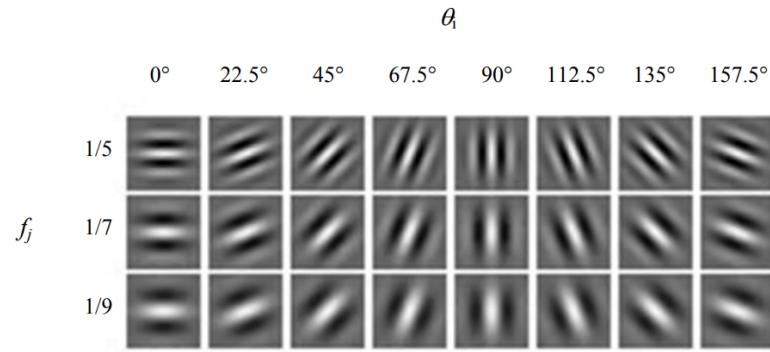
kde  $\theta$  je orientace filtru,  $f$  je frekvence sinusoidy,  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$  jsou standardní odchylky podél os  $x$  a  $y$ ;  $x_\theta$  a  $y_\theta$  jsou souřadnice os  $x$  a  $y$  kartézské soustavy po rotaci dané úhlem  $\theta$ .

Frekvence sinusoidy  $f$  je jasně dána lokální frekvencí papilárních linií, stejně tak orientace filtru  $\theta$  odpovídá lokální orientaci papilárních linií. Čím vyšší jsou hodnoty  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$ , tím robustnější bude filtr vůči šumu, a tím více je schopen ho redukovat. S touto robustností však roste i pravděpodobnost vygenerování falešných papilárních linií. Zvolením nižších hodnot je tato pravděpodobnost nižší, ale filtr nebude schopen redukovat takové množství šumu. Proto je nutné najít vhodný kompromis hodnot  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$ . [23]

Pro zrychlení filtrace lze vytvořit a uložit tzv. banku Gaborových filtrů  $G_{kl}$  pro předem definovaný počet frekvencí  $f_k$  a orientací  $\theta_l$ . Pro filtrace každého pixelu je následně použit filtr banky  $G_{kl}$ , jehož předdefinovaná frekvence  $f_k$  je nejbližší lokální frekvenci  $f_{xy}$  pixelu  $[x, y]$  a jehož orientace  $\theta_l$  je nejbližší lokální orientaci  $\theta_{xy}$  pixelu  $[x, y]$ . Příklad banky Gaborových filtrů je na obrázku 3.6. [17] [7]



Obrázek 3.5: Grafická reprezentace Gaborova filtru definovaného parametry  $\theta = 135^\circ$ ,  $f = \frac{1}{5}$ ,  $\sigma_x = \sigma_y = 3$ . [17]



Obrázek 3.6: Příklad grafické reprezentace banky Gaborových filtrů o kapacitě 24 s parametry  $\sigma_x = \sigma_y = 4$ . [17]

### Laplaceův filtr

Laplaceův filtr je lineární filtr s charakterem horní propusti, který se používá pro detekci hran v obrazu. Lze ho tedy použít pro zvýraznění papilárních linií otisku prstu. Zlepšení kvality vykazuje zejména u rozmazených otisků. Následující rovnice popisuje možnou definici Laplaceova filtru pro filtrování obrazu  $I$ : [3]

$$G(i, j) = I(x + 1, y) + I(x - 1, y) + I(x, y + 1) + I(x, y - 1) - 4I(x, y) \quad (3.12)$$

Filtr je následně aplikován na původní obraz tak, že je k němu po vynásobení zvolenou konstantou  $\alpha$  přičten: [3]

$$E(x, y) = I(x, y) + \alpha G(x, y) \quad (3.13)$$

kde  $I$  je původní otisk,  $G$  je výsledek filtrace a  $E$  je obraz otisku se zvýrazněnými papilárními liniemi.

### 3.3 Binarizace

Binarizace je proces, kdy je šedotónový obraz otisku prstu převeden do podoby obrazu binárního, tedy obrazu obsahujícího pouze dvě barvy, černou a bílou. Tato úprava maximálně zvýší kontrast mezi hřebeny a údolími papilárních linií, a tak zjednoduší následnou extrakci markantů. Většina algoritmů pro extrakci markantů pracuje právě s binárními obrazy. [23]

Pro binarizaci se používají různé varianty prahování. Jednou z metod je například schéma *RAT* (*Regional Average Thresholding*). Tato metoda nejprve rozdělí obrázek na bloky  $8 \times 8$ , následně vypočte průměrnou úroveň šedi v tomto bloku a nastaví hodnotu levé části  $8 \times 4$  na získanou hodnotu. Pro další krok posune operační okno o 4 body doprava. Pokud algoritmus dosáhne pravého okraje obrazu, posune se o 8 bodů dolů a opakuje předchozí kroky od levého okraje. [9]

S krokem binarizace některé algoritmy pro extrakci markantů nepracují, jelikož přináší i některé nevýhody, jako ztrátu některých detailů. Binarizace je také časově náročná a u snímků špatné kvality nepřináší příliš dobré výsledky. [17]

### 3.4 Ztenčování papilárních linií

Další fází je ztenčování papilárních linií, jejíž účelem je ztenčit papilární linie různé šířky na šířku jednoho bodu. Pro ztenčování se používají poměrně jednoduché iterativní či paralelní algoritmy, které postupně odstraňují redundantní vrstvy pixelů, dokud nevznikne papilární linie o šířce jednoho bodu. Mezi nejpoužívanější metody patří například metoda *Emyoglu*, která dělí body do dvou kategorií – *Ridge Meeting Point* a *Ridge Continuity Point* [9]. Podmínkou je, že nesmí dojít k přerušení papilární linie nebo změně její charakteristiky. [17] [21] [9]

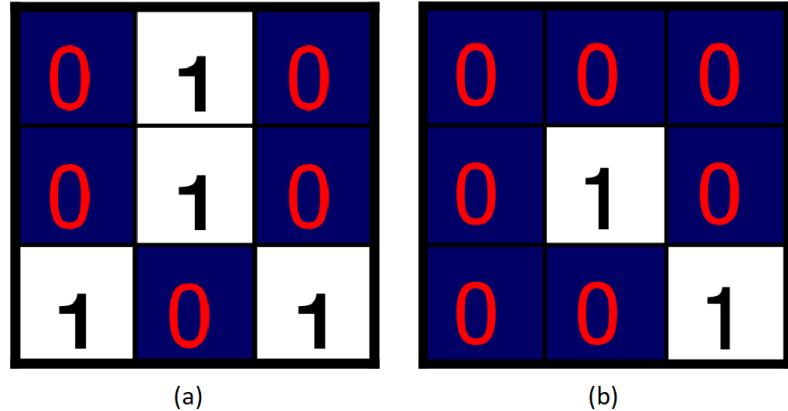
Stejně jako u binarizace, některé algoritmy pro extrakci markantů neprovádí ztenčování papilárních linií. Důvodem je, že použitím špatného algoritmu se mohou v otisku objevit falešné markanty. [17]

### 3.5 Detekce a extrakce markantů

Většina metod pro detekci markantů pracuje s obrazem, který prošel fází binarizace a ztenčením papilárních linií, některé však, z již výše uvedených důvodů, pracují přímo s šedotónovým obrazem. [13]

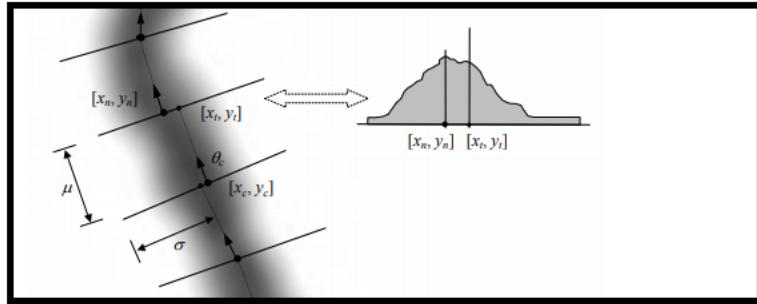
U binárních obrazů otisků prstů, které obsahují papilární linie ztenčené na šířku jednoho bodu je detekce markantu poměrně snadná. Pro ukázkou lze uvést například tzv. *cross numbering* algoritmus. Spočívá v posunování okna velikosti  $3 \times 3$  po obrazu otisku prstu. Pokud je prostřední bod bodem papilární linie a v jeho okolí (v rámci definovaného okna) jsou právě 3 další takové body, jedná se o *vidličku / rozdrojení*, pokud je v tomto okolí právě jeden další bod naležící papilární linii, jedná se o *ukončení*. Ilustraci lze vidět na obrázku 3.7. [21]

Z důvodu potlačení negativních důsledků binarizace a ztenčování papilárních linií některé algoritmy pro detekci markantů pracují přímo s šedotónovým obrazem. Příkladem může být následující algoritmus tzv. *Ridge line following*, jehož myšlenkou je následovat papilární linie podle směru jejich lokální orientace. V každém řezu papilární linie, kolmém na její lokální orientaci, lze určit maximum šedého odstínu. Algoritmus hledá v jednotlivých úsecích papilární linie právě tato maxima a ta se snaží spojovat. Jejich spojením lze



Obrázek 3.7: Ilustrace *Cross numbering* algoritmu: (a) detekované rozdvojení, (b) detekované ukončení. [21]

aproximovat původní papilární linii. Schéma tohoto algoritmu lze vidět na obrázku 3.8, kde  $[x_c, y_c]$  je počáteční bod,  $\theta_c$  je počáteční orientace,  $[x_t, y_t]$  je následující bod vypočtený algoritmem s krokem  $\mu$ . Bod  $[x_n, y_n]$  je novým bodem vypočteným jako lokálním maximum v daném ortogonálním řezu papilární linií o šířce  $2\sigma + 1$ . [17]



Obrázek 3.8: Schéma jednotlivých kroků algoritmu pro detekci markantů přímo z šedotónového obrazu. [17]

## Kapitola 4

# Faktory snižující kvalitu otisků prstů

V následujících podkapitolách budou popsány faktory, které mohou ovlivnit kvalitu otisku prstu, rozdělené do několika skupin. První skupinou je stav prstu uživatele při snímání prstu. Druhou skupinou jsou okolní faktory, které jsou různé vzhledem ke konkrétnímu typu samotného senzoru. Poslední skupinou jsou kožní choroby, které mají vliv na otisk prstu.

Všechny tyto faktory mohou mít velice zásadní vliv na kvalitu nasnímaného otisku prstu. A mohou způsobit, že otisk nebude, ani po použití metod zlepšujících jeho kvalitu, možné použít, nebo budou chybě vyhodnoceny jeho charakteristiky a dojde tak například k chyběnému odmítnutí otisku při porovnávání. [7]

### 4.1 Stav prstu uživatele

Tato kapitola popisuje možné faktory, ve většině případů spíše stavu prstu uživatele při snímání otisku, které můžou mít negativní vliv na výsledný otisk prstu. Kromě poškození prstu, jako například jizvy a řezná poranění jsou nejčastějšími vlivy nečistoty a nepřiměřený tlak vyvíjený na senzor.

#### 4.1.1 Nečistoty a tlak

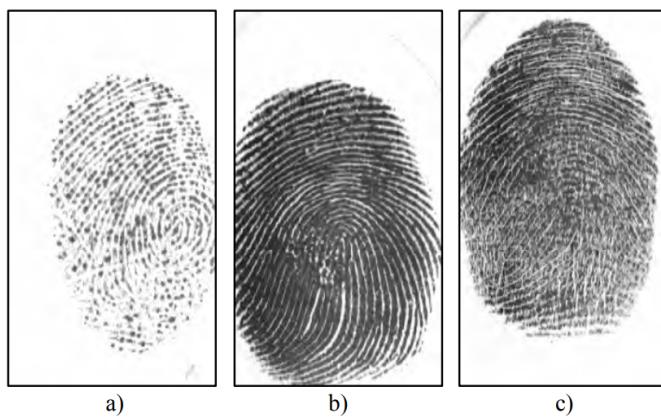
Nečistoty na snímaném prstu a tlak, kterým uživatel při snímání otisku působí na senzor jsou kategorií, kterou může uživatel přímo ovlivnit.

Nečistoty zahrnují smítka prachu, drobky od jídla, inkoust, mastnotu, různé mycí prostředky apod.

Dopady nečistot a špatné míry tlaku na výsledný otisk prstu, by se daly rozdělit do několika následujících kategorií: [8] [7]

- *Zesílení papilárních linií* – k zesílení papilárních linií může dojít z mnoha důvodů. Nejčastěji je to následek příliš vysokého tlaku vyvíjeného prstem na senzor, nebo mastné či vlhké prsty. Různá mýdla či čistící prostředky mohou mít na výsledný otisk podobný vliv. Ukázka otisků se zesílenými papilárními liniemi je na obrázku 4.1. [8]

- *Ztráta struktury papilárních linií* – u spousty technologií snímání otisků, zejména optických, může ztrátu struktury způsobit příliš suchý prst. Způsobují ji ale i jiné faktory, jako například jemný písek nebo v zásadě jakékoli drobky na snímaném prstu. Několik otisků s porušenou strukturou papilárních linií je na obrázku 4.1. [8]
- *Vytvoření falešných markantů* – tento stav může nastat v případě, že je tloušťka nečistot podobná šířce papilárních linií. Nejčastěji to jsou vlasy či různá vlákna, obecně se ale může jednat o jakýkoli dlouhý objekt podobné tloušťky. Detekci falešných markantů může navíc způsobit i malé smítko prachu nebo malý drobek, který opticky spojí nebo rozdělí papilární linie. Na tomto místě může být v případě spojení několika papilárních linií detekováno rozdvojení, v případě rozdělení papilární linie naopak ukončení. [8]



Obrázek 4.1: Ukázka otisků prstů špatné kvality: (a) porušená struktura papilárních linií, (b) zesílené papilární linie, (c) zesílené linie s porušenou strukturou. [17]

## 4.2 Okolní faktory

Vliv faktorů, které ovlivňují proces snímání otisků prstů, se velice liší podle použité technologie a mohou mít fatální vliv na kvalitu otisku, stejně jako u většiny biometrických vlastností. V následujících podkapitolách budou představeny ty nejzásadnější faktory společně s výčtem technologií, u kterých hrají roli. [7]

### Okolní světlo

Okolní světlo hraje roli pouze u senzorů, které disponují jednotkou citlivou na světlo, to jsou konkrétně *optické* a *elektro-optické* senzory.

U běžných senzorů není vliv okolního světla příliš velkým rizikem, jelikož jejich plocha odpovídá průměrné velikosti prstu, a tudíž je prostor, kudy do senzoru může proniknout světlo z okolí, velice malý. Problém je výraznější u senzorů, které snímají více než jeden prst, jsou uzpůsobeny pro válené otisky, nebo jsou bezkontaktní. U těchto senzorů je plocha, kterou může proniknout okolní světlo značně větší a může způsobit, že otisk prstu bude nečitelný. [7] [8]

## **Elektro-magnetická radiace**

Elektro-magnetická radiace může ovlivnit nejen samotný senzor, ale také všechny ostatní komponenty zařízení. Silné elektro-magnetické pole může způsobit například rozmazání obrazu otisku. [7]

## **Vibrace**

Vibrace mohou především způsobit poškození senzoru. Při snímání v silněji vibrujícím prostředí se ale může prst na senzoru lehce pohybovat, a to může způsobit rozmazání otisku. [8]

## **Teplota**

Teplota není faktorem, který by za normálních podmínek přímo ovlivňoval jakýkoliv typ senzorů. Vedlejším účinkem vysoké, resp. nízké teploty však může být příliš vlhký, resp. příliš suchý prst. Jediným typem senzoru, který může být přímo ovlivněn okolní teplotou je senzor využívající termální technologii, ale to pouze v extrémních teplotách. [7]

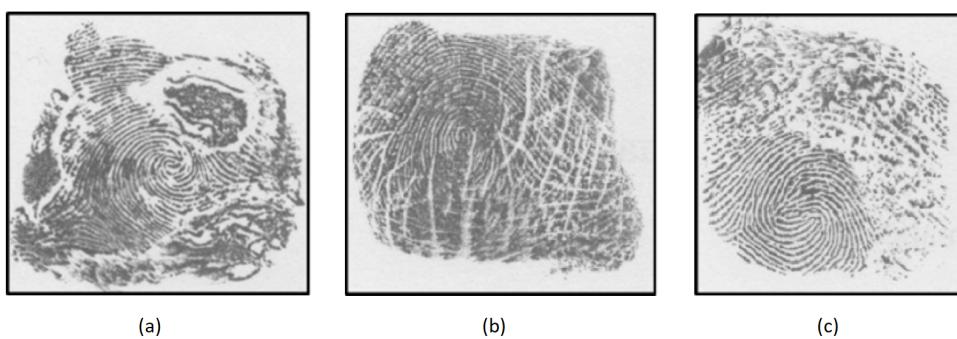
## **4.3 Kožní choroby mající vliv na otisk prstu**

Existuje spousta kožních chorob, které mají vliv na prsty rukou, zejména strukturu papilárních linií a jejich barvu.

Pro využívání biometrických technologií snímajících otisky prstů je podstatné, zda choroba narušila strukturu papilárních linií ve vrstvách kůže epidermis a dermis. Pokud dojde k porušení ve vrstvě dermis, nebudou již papilární linie obnoveny v původní struktuře nebo vůbec. Uživatel tak, v případě rozsáhlějších poškození, může přijít o možnost používat systémy pro rozpoznávání na základě otisku prstů.

Obecně některé změny, jako změna barvy kůže nebo poškození svrchní vrstvy kůže, může mít vliv na pouze některé typy senzorů. [8]

Ukázky otisků prstů poškozených kožními chorobami lze vidět na obrázcích 4.2.



Obrázek 4.2: Ukázka otisků prstů poškozených kožními chorobami: (a) Lupénka (Psoriasis vulgaris), (b) Kolagenóza, (c) Hyperkeratotický ekzém [8]

## Kapitola 5

# Syntetický otisk prstu

Počet systémů a algoritmů pro rozpoznávání podle otisků prstů se stále zvyšuje, společně s nimi roste také potřeba na kvalitní a přesné testování. Výsledky testování na malém vzorku jsou vysoce závislé na datech, proto vzniká potřeba rozsáhlých databází otisků prstů. Tyto databáze je navíc třeba obměňovat, aby nedocházelo k trénování algoritmů na specifické testovací sady. Generování syntetických otisků prstů umožňuje vytváření této rozsáhlých databází bez vysokých nároků na zdroje, a bez potíží s ochranou osobních údajů a právních předpisů, vztahujících se k využívání biometrických údajů. Přesné charakteristiky syntetických otisků prstů mohou být navíc upraveny vzhledem k jejich aplikaci. Je tedy možné generovat například otisky s jistým typem poškození a podobně. [6] [8] [17]

Od chvíle, kdy byly techniky generování syntetických otisků prstů poprvé představeny se prokázaly v několika aplikacích, ty nejvýznamnější z nich jsou následující: [6]

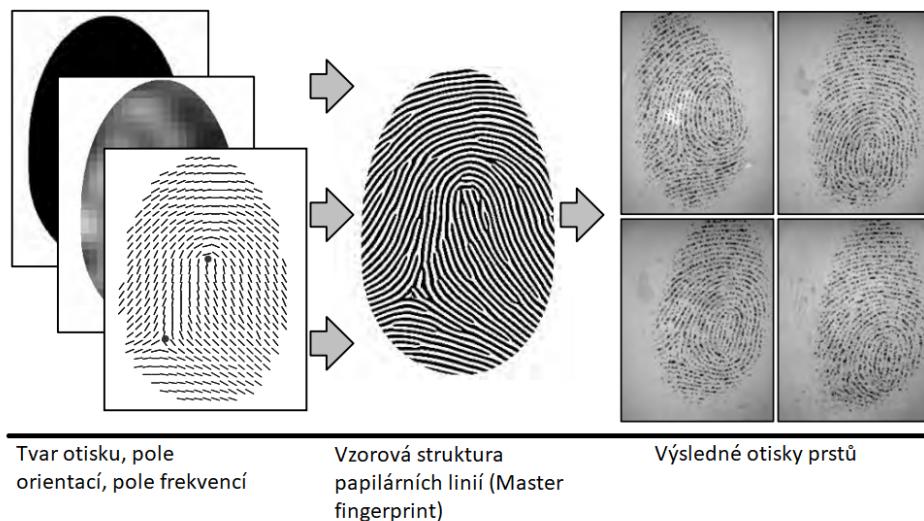
- *Vyhodnocování kvality a testování* – syntetické otisky prstů se v tomto odvětví osvědčily jako efektivní prostředek pro hodnocení technologií, například porovnávání algoritmů porovnávajících otisky prstů. Ukázalo se, že výsledky pro skutečné a syntetické otisky jsou mnohdy velice podobné.
- *Trénování* – trénování klasifikátorů a nástrojů rozpoznávajících vzory pro fungování vyžaduje rozsáhlou sadu trénovacích vzorků. Fázi jejich učení může také urychlit skutečnost, že lze parametry ovlivnit charakteristiky generovaných vzorků a specifikovat tak jejich podobu. Trénovací sety jsou zásadní například pro trénování konvolučních neuronových sítí, které se dnes běžně používají.
- *Testování bezpečnosti* – testování bezpečnosti biometrických zařízení opět vyžaduje rozsáhlou databázi. U syntetických otisků lze také měnit některé charakteristiky nezávisle na jiných, což může být pro vyhodnocení bezpečnosti přínosné.
- *Kontrola sémantické správnosti algoritmů vzhledem ke standardům* – může se například stát, že při extraheování markantů z jednoho otisku dvěma různými algoritmy můžeme získat dvě různé sady markantů. To můžezpůsobit problémy při spolupráci systémů. U syntetických otisků známe jejich přesnou klasifikaci, a proto se dají použít pro potvrzení sémantické správnosti algoritmů vzhledem k danému standardu.

Metoda SFinGe je jedním z prvních přístupů ke generování syntetických otisků prstů. Její přístup je v různých modifikacích používán mnoha metodami [17], proto je tato metoda popsána v následující podkapitole 5.1 jako vzorová.

## 5.1 SFinGe

Jak již bylo řečeno SFinGe je jeden z prvních přístupů pro generování syntetických otisků prstů, který vznikl na Univerzitě v Boloni (Itálie). Je dostupný také jako aplikace [1] schopná generovat rozsáhlé databáze společně s přesnými charakteristikami a vlastnostmi syntetických otisků. [6]

SFinGe realizuje tzv. *statical ridge pattern model*, vychází tedy z charakteristik otisků, které byly získány empirickou analýzou. Proces vytváření syntetických otisků touto metodou obsahuje téměř identické kroky jako proces extrakce charakteristik, který je znázorněn na obrázku 3.1, ale v opačném pořadí. Jednotlivé kroky metody SFinGe jsou schématicky znázorněny na obrázku 5.1 a jsou následující: [6] [17]



Obrázek 5.1: Schéma generování syntetických otisků prstů metodou SFinGe. (převzato a upraveno z [17])

1. *Tvaru otisku* – prvním krokem je definice globálního tvaru otisku prstu na základě modelu založeném na eliptických segmentech, které můžou být měněny tak, aby bylo dosaženo požadovaného tvaru.
2. *Pole orientací* – tato část využívá *Sherlock and Monroe* [6] modelu. Nejprve je náhodně zvolena třída otisku, na základě třídy je náhodně zvolena pozice singularit (delt a jader). S těmito parametry je následně vygenerováno pole orientací.
3. *Pole frekvencí* – na základě heuristických kriterií, které byly získány z mnoha pozorování skutečných otisků prstů, se v této fázi vygeneruje pole frekvencí. Frekvence vypovídá hustotě papilárních linií v daném místě. Tato hustota se v různých oblastech jednoho otisku liší.

4. *Vzorová struktura papilárních linií* – z tvaru otisku, pole orientací a pole frekvencí je v této fázi vytvořena vzorová struktura papilárních linií – otisk (tzv. Master fingerprint). Tento otisk je vytvořen iterativní metodou za použití Gaborova filtru, který je aplikován na každý pixel. Jeho parametry jsou vždy přizpůsobeny lokální orientaci a frekvenci papilárních linií. Generování může být zahájeno i z několika počátečních míst obrazu najednou, to způsobí vznik více markantů v místech, kde se střetávají samostatně generované oblasti.
5. *Výsledné otisky* – V této fázi může být z vzorové struktury papilárních linií vytvořen, resp. vytvořeno několik výsledných otisků. Na každý tento otisk je aplikováno několik faktorů (na každý s jinými parametry), čímž je docíleno realistického vzhledu. Mezi faktory patří kontaktní oblast, tloušťka papilárních linií (variabilní), zkreslení, rotace apod.

Několik příkladů syntetických otisků prstů vygenerovaných metodou SFinGe lze vidět na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Příklady syntetických otisků vygenerovaných aplikací SFinGe. [1]

Vedle metody SFinGe existují přístupy, které generují syntetický otisk pouze z informace o markantech. Takové přístupy provádí tzv. *rekonstrukci otisku prstu*, a provádí krok za krokem invertovaný proces extrakce charakteristik otisku prstu viz. obrázek 3.1. Různé přístupy dále například místo náhodného generování třídy a pozice singularit zavádějí jejich deterministické určení apod. [14]

# Kapitola 6

## Návrh a implementace aplikace

Na základě informací uvedených v předchozích kapitolách byla navržena a implementována aplikace pro rekonstrukci poškozených částí otisku prstu. Tato aplikace a její jednotlivé části budou popsány v následujících kapitolách.

### 6.1 Návrh aplikace

Hlavním cílem aplikace je rekonstrukce poškození předaného otisku prstu. Před samotnou rekonstrukcí je však třeba provést několik kroků, které z otisku získají informace potřebné ke korektní rekonstrukci poškození. Těmito kroky jsou:

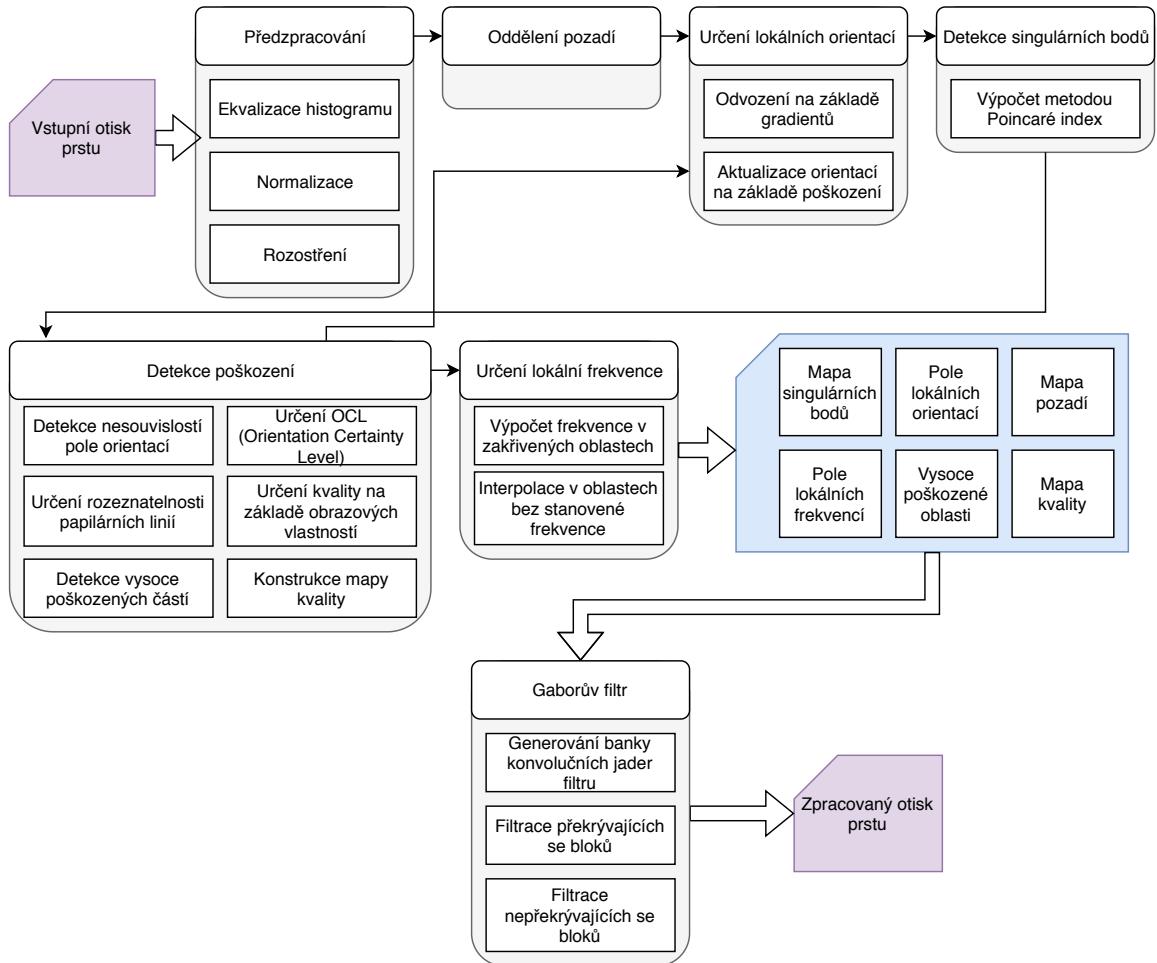
- Oddělení pozadí
- Výpočet lokální orientace papilárních linií
- Výpočet lokální frekvence papilárních linií
- Lokalizace poškozených částí
- Lokalizace singulárních bodů

Po provedení těchto kroků je možné provést samotnou rekonstrukci v lokalizovaných částech, na základě získaných parametrů. Výstupem aplikace by tedy měl být rekonstruovaný obraz otisku prstu.

Vzhledem k výše zmíněným cílům je tedy nutné aplikaci rozdělit na několik oddělených, komunikujících částí, které budou reprezentovat jednotlivé kroky procesu rekonstrukce otisku. Podle funkce lze aplikaci rozdělit na následující sekce:

- Předzpracování otisku
- Získávání vlastností
- Detekce poškození
- Rekonstrukce - filtrování

Rozdělení aplikace na jednotlivé sekce a posloupnost zpracování otisku lze vidět na diagramu 6.1. Nyní následuje popis těchto sekcí.



Obrázek 6.1: Diagram posloupnosti zpracování otisku prstu.

### 6.1.1 Předpracování otisku

V této části je nutné připravit otisk pro správné fungování algoritmů v následujících sekcích. Parametry, které je třeba optimalizovat jsou kontrast, střední hodnota a variace jasu a ostrosti obrazu.

### 6.1.2 Získávání vlastností

Korektní odvození vlastností je u poškozených otisků poměrně náročné a jeho obtížnost roste s mírou a rozsahem poškození otisku. Je však naprostě nezbytné pro uspokojivou rekonstrukci poškozených částí. Nejdůležitějšími získávanými vlastnostmi jsou lokální orientace a frekvence papilárních linií, jelikož jsou hlavními vstupními parametry Gaborova filtru, který aplikace používá k filtraci poškozených částí. Další získávanou vlastností je pozice singulárních bodů, tedy jader a delt, které slouží k minimalizaci falešných označení těchto míst jako poškozených oblastí, vzhledem k jejich vyšší míře zakřivení.

### 6.1.3 Detekce poškození

Úkolem fáze detekce poškození je určení míry poškození v jednotlivých oblastech otisku prstu na základě vlastností extrahovaných v předchozí sekci.

Následně je také nutné provést lokalizaci oblastí s vyšší mírou poškození, u nichž je třeba získat informaci o velikosti, tvaru, výčtu pixelů náležícím této oblasti, a míře poškození. Tyto informace budou také použity k predikci lokální orientace a lokální frekvence papilárních linií v těchto poškozených oblastech.

### 6.1.4 Rekonstrukce - filtrování

Jedná se o stěžejní část aplikace. Jejím vstupem jsou výstupy všech předchozích sekcí aplikace, tedy předzpracovaný obraz otisku prstu, extrahované vlastnosti a lokalizované poškozené oblasti.

Jejím úkolem je samotná rekonstrukce otisku v lokalizovaných oblastech a zvýšení kvality otisku obecně. Je možné ji tedy rozdělit na dvě oddělené části: rekonstrukci poškozených oblastí a zvýšení kvality otisku (postprocessing).

## 6.2 Implementace

Navržená aplikace byla implementována v jazyce C++ s použitím knihovny *OpenCV (Open Source Computer Vision Library)* verze 4.0.1. [5] Jedná se o konzolovou aplikaci. V následující kapitole budou popsány stěžejní části aplikace, použité algoritmy a jejich implementace. Budou zde také diskutovány výhody a nevýhody použitých postupů.

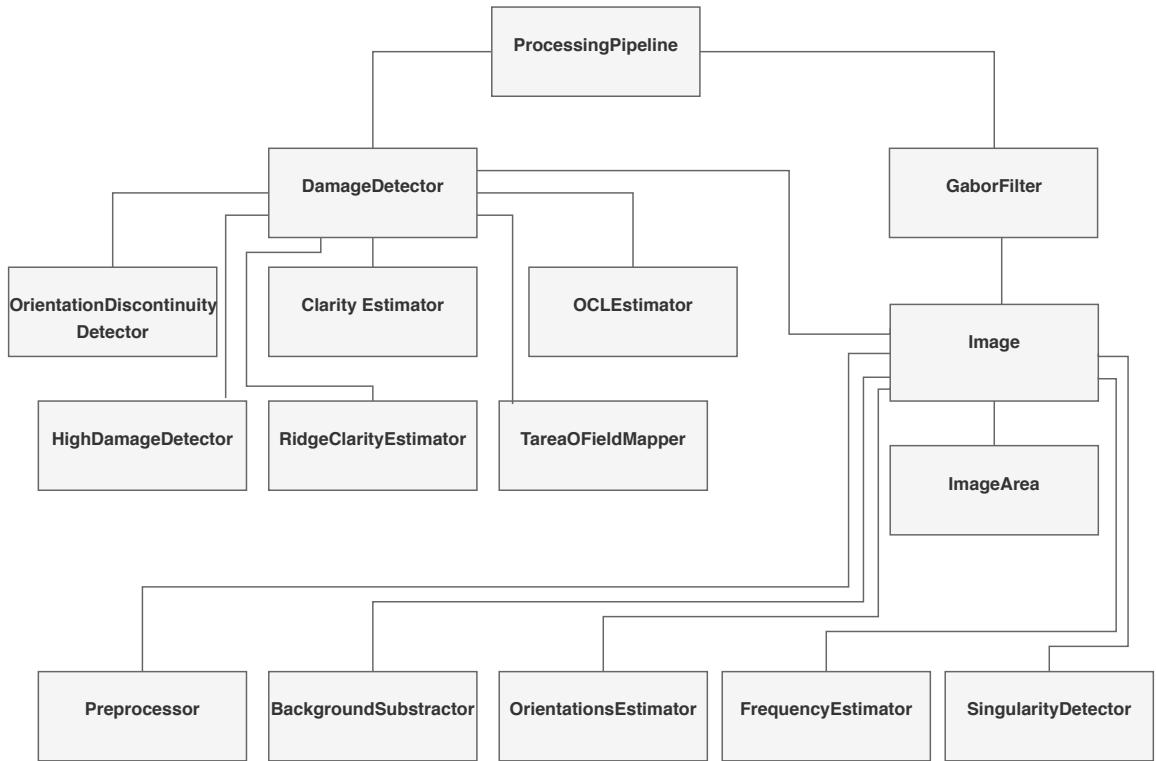
Vzhledem k požadavkům na aplikaci uvedeným v sekci 6.1 byly implementovány odpovídající třídy reprezentující jednotlivé úkony, které aplikace vykonává.

Během procesu rekonstrukce je třeba udržovat si informace o dosud extrahovaných vlastnostech otisku. K tomuto účelu slouží třída *Image*. Atributy této třídy jsou samotný obraz otisku prstu, jeho předzpracovaná podoba a dále jednotlivé vlastnosti získané dalším zpracováním. Mimo jiné je při její inicializaci odvozena velikost bloků (čtvercových oblastí), se kterou se bude pracovat v následujících fázích zpracování tak, aby odpovídala šířce dvou až tří papilárních linií.

K uložení a práci s obrázky je použita datová struktura *cv::Mat*, kterou poskytuje knihovna *OpenCV*. V podstatě se jedná o matici hodnot definovaného datového typu. Tato datová struktura je dále použita nejen k uložení mezistavů a výsledku zpracování obrázku, ale také k uložení získaných vlastností otisku, v podobě masek a map.

Samotný proces rekonstrukce předaného otisku zaštiťuje třída *ProcessingPipeline*. Tato třída poskytuje metodu *processImage* řídící posloupnost kroků, které předzpracují otisk prstu, extrahují vlastnosti a provedou filtrace. Jednotlivé úkony deleguje na další třídy implementující tyto jednotlivé kroky. Dále si také udržuje instanci třídy *Image* reprezentující aktuálně zpracovávaný otisk prstu.

Na obrázku 6.2 lze vidět zjednodušený diagram navržených tříd.



Obrázek 6.2: Zjednodušený diagram navržených tříd.

### 6.2.1 Předzpracování otisku prstu

Pro účel předzpracování otisku prstu slouží třída *Preprocessor*. Poskytuje metody reprezentující tři operace, které jsou provedeny před zahájením získávání vlastností otisku. Těmito operacemi jsou ekvalizace histogramu, normalizace a rozostření.

#### Ekvalizace histogramu

Účelem ekvalizace histogramu je využití celého rozsahu poskytovaného datovým typem obrázku (*unsigned char*). Tohoto výsledku je docíleno aplikováním následující formule na každý pixel obrazu:

$$Q'_{ij} = \frac{255 \cdot Q_{ij}}{\max - \min} + \frac{255 \cdot \min}{\max - \min} \quad (6.1)$$

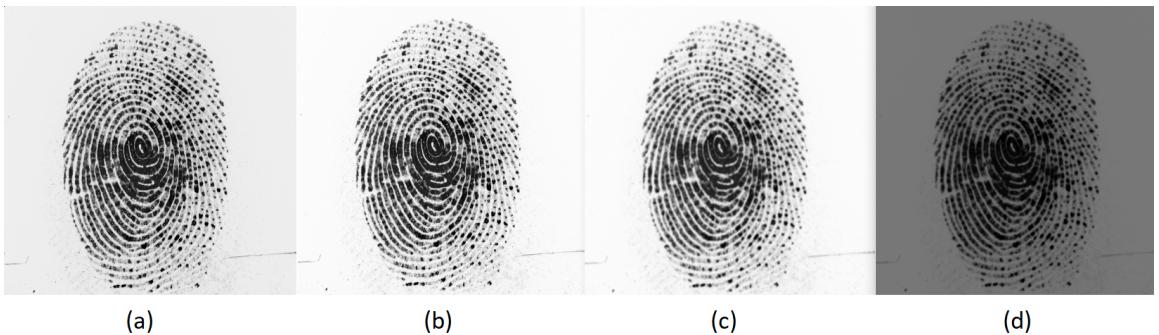
, kde  $Q'_{ij}$  je nová hodnota pixelu,  $Q_{ij}$  původní hodnota pixelu,  $\max$  je maximální hodnota pixelu v obraze a  $\min$  je minimální hodnota pixelu v obraze.

## Normalizace

Normalizace je proces snižující variaci intenzity stupňů šedi v obrazu, což má pozitivní vliv na efektivitu algoritmu použitého pro určení lokálních orientací, vzhledem k využití gradientů. Pro normalizaci byl použit postup popsaný v kapitole 3.2.1. Na každý pixel obrazu tedy byla aplikována rovnice 3.1.

## Rozostření

Rozostření obrazu otisku prstu je realizováno aplikací Gaussova filtru na původní obraz. Tato úprava eliminuje skokové změny intenzity šedé barvy v obrazu. Z takto vyhlazených obrazů otisků prstů lze přesněji určit gradienty a tím pádem lokální orientace papilárních linií. Vyhlazení má pozitivní vliv také na určení lokální frekvence papilárních linií, jelikož zjednoduší rozeznatelnost sinusového tvaru změny intenzity šedé barvy ve směru kolmém na lokální orientaci papilárních linií. Jednotlivé fáze předzpracování otisku lze vidět na obrázcích 6.3.



Obrázek 6.3: Fáze předzpracování otisku prstu. (a) Původní obrázek. (b) Obrázek po ekvalizaci. (c) Rozostřený obrázek. (d) Normalizovaný rozostřený obrázek otisku.

### 6.2.2 Oddělení pozadí obrázku

Oddělení pozadí obrázku od samotného otisku provádí třída *BackgroundSubstractor*. Základním parametrem pro rozlišení pozadí a popředí je variace stupně šedi v jednotlivých blocích, která slouží jako hodnota pro prahování. Experimentálně byla jako hodnota prahu určena na hodnotu 30. Následně je provedeno několik iterací korekce pozadí na základě počtu bloků pozadí v okolí  $3 \times 3$  aktuálního bloku.

Posledním krokem je pak odstranění chybně označených bloků, které jsou uvnitř otisku prstu. Tato korekce je pro každý blok, označený jako pozadí, realizována kontrolou, zda je možné jej přes ostatní bloky, označené jako pozadí, spojit s nějakým blokem pozadí, který leží na okraji obrázku. Tento algoritmus se provádí iterativně. V první iteraci jsou zkонтrolovány všechny bloky náležící okraji obrazu. V každé další iteraci se kontrolují bloky o jednu pozici vzdálenější od okraje. Výsledek takto provedeného oddělení pozadí lze vidět na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Proces oddělení pozadí. (a)(c) Původní obrázky. (b)(d) Obrázky se znázorněným odděleným pozadím.

### 6.2.3 Výpočet lokální orientace papilárních linií

Algoritmy pro výpočet lokální orientace papilárních linií zapouzdřuje třída *OrientationsEstimator*. Tato třída implementuje algoritmus pro výpočet lokální orientace s použitím gradientu šedého tónů v jednotlivých blocích otisku, jak je popsáno v 3.2.1.

Po provedení tohoto výpočtu je provedena korekce v okrajových oblastech otisku, kde se při výpočtu často chybně zaměňuje okraj otisku za papilární linii, jelikož je gradient ve směru kolmém na ni nejvyšší. Tato korekce je provedena přenesením orientace bloků sousedících s hraničními bloky do právě těchto bloků.

Během výpočtu orientací jsou orientace dále převáděny na vektorové pole podle následujících formulí: [12]

$$\delta_x = \cos(2 \cdot \theta_{ij}) \quad (6.2)$$

$$\delta_y = \sin(2 \cdot \theta_{ij}) \quad (6.3)$$

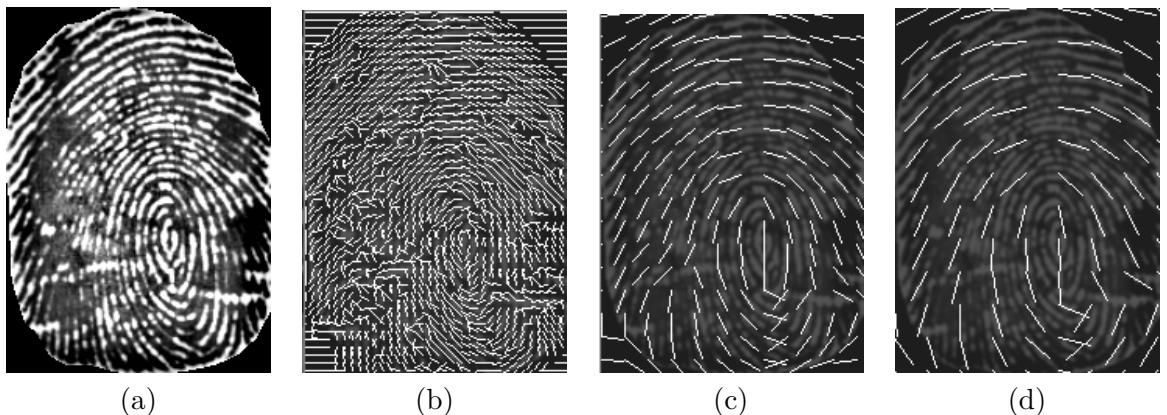
, kde  $\theta_{ij}$  je úhel v rozmezí  $0 - \pi$  reprezentující orientaci papilární linie v aktuálně zpracovávaném bloku obrazu. Nad takto určeným vektorovým polem je následně provedeno vyhlazení pomocí Gaussova filtru. Práce s vektorovým polem zajistí nezávislost orientace na směru a nedochází tak k chybám při vyhlazování jím způsobeným. Po vyhlazení jsou z vektorového pole znovu určeny orientace podle vzorce: [12]

$$\theta_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \arctan\left(\frac{\delta_y}{\delta_x}\right) \quad (6.4)$$

#### Určení lokální orientace papilárních linií ve vysoce poškozených oblastech

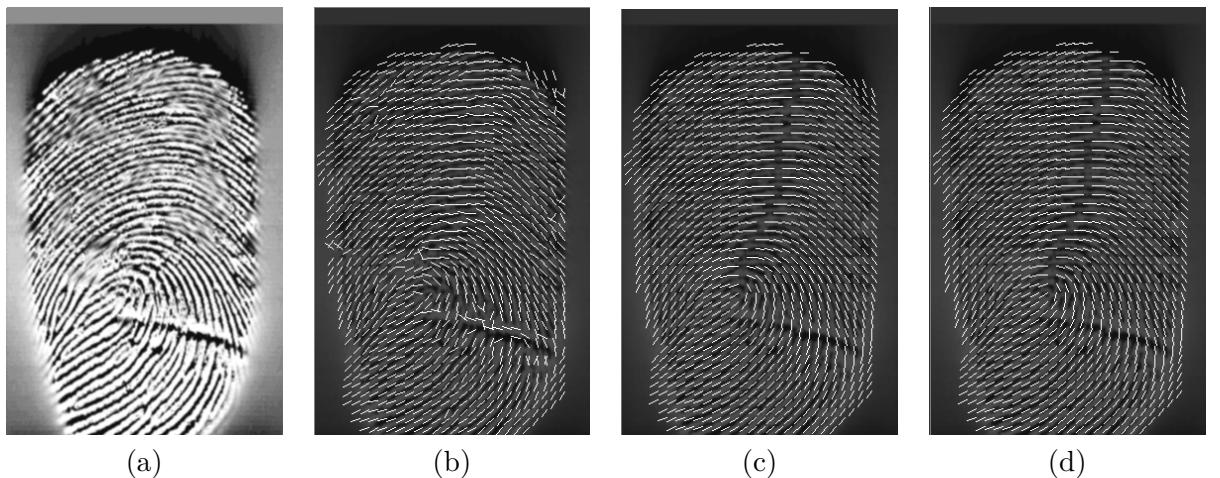
Pro účel odvození lokální orientace papilárních linií ve vysoce poškozených oblastech, poskytuje třída *OrientationsEstimator* metodu *updateOrientationsBasedOnDamage* pro zvýšení kvality pole lokálních orientací v závislosti na velikosti, tvaru a pozici poškozených oblastí.

Pro poškozené oblasti je zde vždy určeno pole orientací lokálního charakteru o velikosti bloků rovné polovině menšího z rozměrů poškozené oblasti. Orientace v blocích náležících přímo poškozené oblasti je pak z velké části odvozena z okolních bloků. Po vložení takto vypočtených orientací do původního pole orientací a provedení jedné iterace vyhlazování je dosaženo lepšího odvození pravděpodobné orientace v poškozené oblasti. Zlepšení odhadu lokální orientace papilárních linií se zvětšující se velikostí bloků lze vidět na obrázcích 6.5.



Obrázek 6.5: Změna vlivu poškozených oblastí na určení lokální orientace papilárních linií, vzhledem k velikosti použitých bloku. (a) Původní otisk prstu. (b)(c)(d) Pole lokálních orientací s postupně stoupající velikostí bloků.

Posloupnost zlepšování kvality pole lokálních orientací použitím vyhlazovacích metod a výše popsané metody pro odvození lokální orientace v poškozených oblastech je znázorněna na obrázcích 6.6.

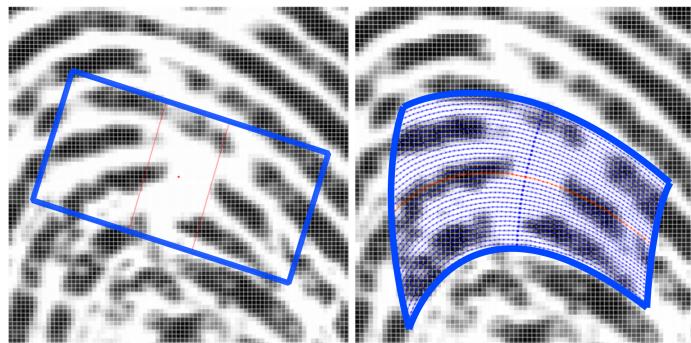


Obrázek 6.6: Posloupnost výpočtu pole orientací. (a) Původní otisk prstu. (b) Prvotní pole orientací. (c) Pole orientací po vyhlazování a úpravě v okrajových oblastech. (d) Pole orientací po úpravě v závislosti na poškozených oblastech.

#### 6.2.4 Výpočet lokální frekvence papilárních linií

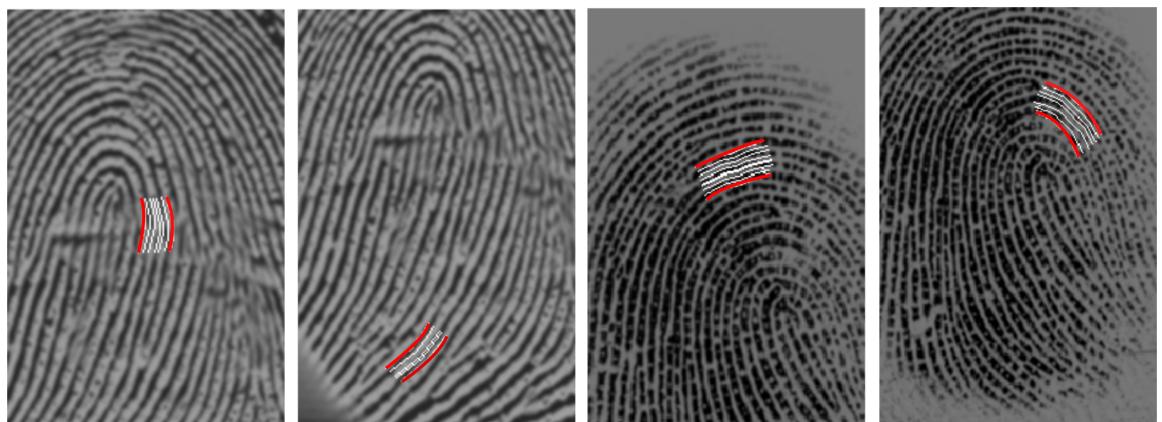
Výpočet lokální frekvence papilárních linií realizuje třída *FrequencyEstimator*. První implementace algoritmu výpočtu lokální frekvence odpovídala algoritmu, který pracuje s orientovanými okny, ve kterých odvozuje frekvenci papilárních linií ze sinusového tvaru funkce měnící se intenzity šedé barvy v tomto okně, ve směru kolmém na lokální orientaci papilárních linií odpovídajícího bloku. Algoritmus je podrobněji popsán v sekci 3.2.1. Tento algoritmus ale vykazoval značné nepřesnosti v oblastech s vyšším zakřivením, a v některých místech nebyl zcela schopen frekvenci určit.

Následně byl tedy tento algoritmus upraven tak, jak je navrženo v [10]. Vylepšení spočívá v použití zakřivených oblastí, místo oken obdélníkového tvaru, znázornění lze vidět na obrázku 6.7.



Obrázek 6.7: Obdélníková a zakřivená oblast pro určení frekvence papilárních linií.[10]

Zakřivené oblasti jsou definovány jednotlivými křivkami, ze kterých jsou následně určovány hodnoty *x signature*. Nejprve jsou tedy určeny body, které reprezentují středy rovnoběžných křivek. Tyto body leží na přímce kolmé na lokální orientaci v daném bloku, která prochází středem tohoto bloku. Následně je pro každou křivku, vždy na základě orientace v aktuálním bodě křivky určen bod následující. Délka takto určených křivek byla stanovena na dvojnásobek šířky bloku. Algoritmus dále pokračuje stejně jako algoritmus popsáný dříve v 3.2.1. Příklad křivek určujících zakřivené okno lze vidět na obrázku 6.8.



Obrázek 6.8: Ukázky křivek určujících zakřivené okno pro výpočet lokální frekvence papilárních linií se zvýrazněným okrajem.

Následně je provedena interpolace frekvencí v blocích, ve kterých nebylo možné frekvenci určit. Hodnota v těchto blocích je určena podle rovnice: [12]

$$f'xy = \begin{cases} fxy & \text{pokud } f_{xy} \neq -1 \\ \frac{\sum_{u=-w/2}^{w/2} \sum_{v=-w/2}^{w/2} W\mu(f(x-u,y-v))}{\sum_{u=-w/2}^{w/2} \sum_{v=-w/2}^{w/2} W\delta(f(x-u,y-v)+1)} & \text{jinak} \end{cases} \quad (6.5)$$

, kde

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{pokud } x \leq 0 \\ x, & \text{jinak} \end{cases}$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 0, & \text{pokud } x \leq 0 \\ 1, & \text{jinak} \end{cases}$$

,  $W$  je Gaussovo konvoluční jádro o velikosti  $w \times w$ .

### 6.2.5 Lokalizace poškozených oblastí

Lokalizaci poškozených oblastí provádí třída *DamageDetector*. Funkcionalita této třídy je rozdělena do tří větších celků.

Prvním celkem je určení kvality oblastí otisku prstu, jehož výstupem je mapa poškození otisku prstu. Druhým celkem je lokalizace vysoce poškozených oblastí, jehož výstupem jsou jednotlivé oblasti otisku s vysokou mírou poškození. Třetím celkem je identifikace černých a bílých skvrn a jejich odstranění. Tyto celky budou popsány v následujících sekcích.

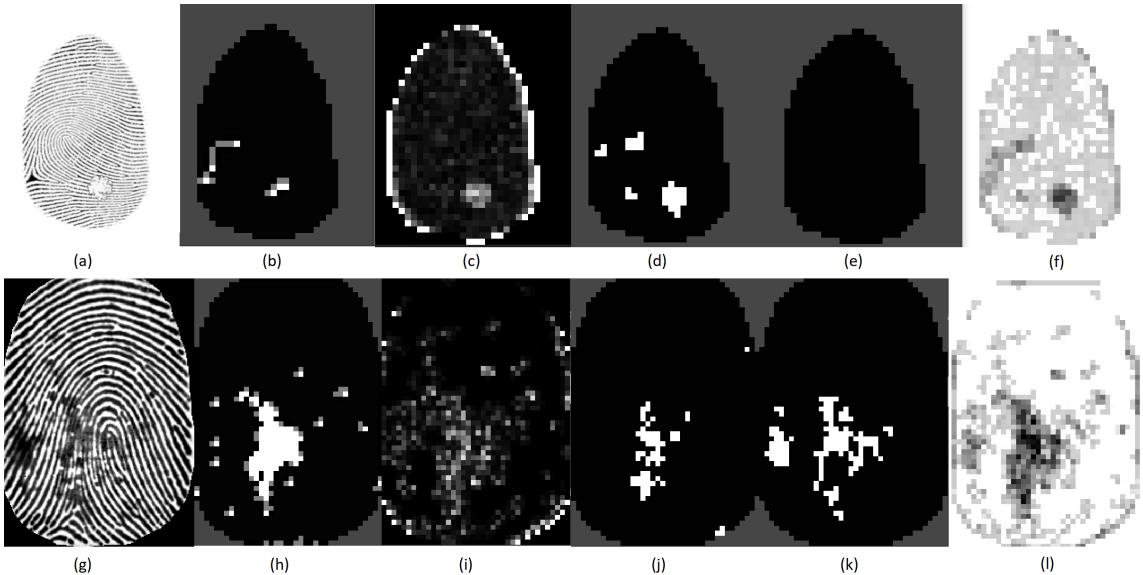
#### Určení kvality oblastí otisku prstu

Prvním celkem lokalizace poškození jsou kroky sloužící k určení kvality jednotlivých oblastí otisku. Výstupem této části je kompletní mapa kvality pro daný otisk, která obsahuje hodnoty míry poškození každého z bloků. Kvalita bloků je reprezentována hodnotou v rozmezí 0 – 1, kde 0 znamená nejnižší kvalitu a 1 nejvyšší.

Kvalita bloků otisku je určována pomocí čtyř vlastností. Každá z těchto vlastností určuje míru poškození jednotlivých bloků otisku pomocí určitého algoritmu. Z těchto hodnot je následně určena celková míra poškození těchto bloků. Použity jsou následující vlastnosti, každá uvedena s vahou, jakou přispívá k výslednému určení kvality:

- 0,2 - Souvislost orientace papilárních linií.
- 0,4 - OCL (Orientation Certainty Level).
- 0,2 - Variace intenzity šedého tónu ve směru lokální orientace.
- 0,2 - Variace a kontrast šedého tónu.

Posloupnost určení kvality lze vidět na obrázku 6.9.



Obrázek 6.9: Ukázky postupu určení kvality jednotlivých bloků otisku. (a)(g) Původní obrázek. (b)(h) Souvislost orientace papilárních linií. (c)(i) Orientation certainty level. (d)(j) Variace intenzity šedého tónu ve směru lokální orientace. (e)(k) Variace a kontrast šedého tónu (f)(l) Výsledná mapa kvality.

### Souvislost orientace papilárních linií

Určení souvislosti orientace papilárních linií probíhá kontrolou každého pixelu na změnu orientace v horizontálním a vertikálním směru. Předpokladem je, že v oblastech s vyšší mírou poškození budou změny orientace v sousedících blocích nespojitě/skokové. [2]

Na počátku je inicializováno dvourozměrné pole s jednou hodnotou náležící každému bloku obrazu. Hodnoty pro všechny bloky jsou v tomto poli inicializovány na nulu. Při změně v jednom ze směrů o více, než  $45^\circ$  se příznak pro daný pixel inkrementuje o 0,5. Příznak každého pixelu tedy může nabývat hodnoty 0 - u souvislé změny, 0,5 - u pixelů se změnou v jednom směru, a 1 - u pixelů se změnou v horizontálním i vertikálním směru. Tento výpočet je implementován třídou *OrientationDiscontinuityDetector*.

### OCL (Orientation Certainty Level)

Orientation Certainty Level je příznak popsáný v [16]. Jeho hodnota určuje míru energie koncentrované ve směru lokální orientace papilárních linií v konkrétním bloku obrazu. Čím nižší je hodnota, tím vyšší je energie. Na základě tohoto faktu lze OCL index použít k určení síly směrové informace obsažené v bloku obrazu. Tato metoda je implementována třídou *OCLEstimator*.

Nejprve je vypočten gradient ve směru osy  $x$  a  $y$ . Následně je určena kovariance, tedy míra vazby pro každý blok podle následující rovnice: [16]

$$C = \frac{1}{N} \sum_N \left\{ \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx & dy \end{bmatrix}^T \right\} = \begin{bmatrix} a & c \\ c & b \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

, kde  $C$  je kovariance,  $N$  je počet pixelů bloku,  $dx$  je gradient ve směru osy  $x$ , a  $dy$  gradient ve směru osy  $y$ .

OCL index je následně hodnota v rozmezí  $0 - 1$  určená vzorcem: [16]

$$ocl = \frac{(a+b) - \sqrt{(a-b)^2 + 4c^2}}{(a+b) + \sqrt{(a-b)^2 + 4c^2}} \quad (6.7)$$

### Variace intenzity šedého tónu ve směru lokální orientace

Variace intenzity šedého tónu ve směru lokální orientace je určena v orientovaných oknech o velikosti  $l \times w$  určených pro každý blok.

Nejprve je nad celým obrazem provedena binarizace - tedy převedení šedotónového obrazu na černobílý. Binarizace je provedena s adaptativní prahovou funkcí, která je vypočtena pro každý pixel. Hodnota prahu pro pixel je tak určena konvolucí okolí pixelu o velikosti bloku s dvourozměrným Gaussovým konvolučním operátorem, také o velikosti bloku.

Pixely tohoto okna jsou poté rozděleny do přímek, které jsou rovnoběžné s lokální orientací papilárních linií. Následně je pro každou přímku vypočten průměr intenzity barvy podle vzorce:

$$AVG[k] = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} BIN(u, v), k = 0, 1, \dots, l - 1 \quad (6.8)$$

$$u = i + \left(d - \frac{w}{2}\right) \cos O(i, j) + \left(k - \frac{l}{2}\right) \sin O(i, j), \quad (6.9)$$

$$v = j + \left(d - \frac{w}{2}\right) \sin O(i, j) + \left(\frac{l}{2} - k\right) \cos O(i, j) \quad (6.10)$$

, kde  $AVG[k]$  je průměrná intenzita barvy přímky  $k$ ,  $l$  a  $w$  jsou rozměry orientovaného okna,  $BIN$  je binarizovaný obrázek,  $u$  a  $v$  jsou souřadnice bodů náležících přímce a  $O$  je pole lokálních orientací papilárních linií.

Vzhledem k faktu, že algoritmus pracuje s binarizovaným obrazem lze tvrdit, že pokud je variace barvy v oblasti konkrétní přímky nízká, bude průměrná hodnota intenzity barvy ve stejně oblasti nízká (pro údolí) nebo vysoká (pro hřebeny). Na základě tohoto tvrzení jsou za oblasti s vysokou variací označeny oblasti přímek, jejichž průměrná hodnota barevné intenzity je v rozmezí 50 – 200. Následně jsou jako poškozené označeny bloky, u kterých je podíl oblastí s nízkou variací nižší než 50 %. Tato metoda je implementována ve třídě *RidgeClarityEstimator*.

### Variace a kontrast šedého tónu

Posledním použitým příznakem kvality je variace a průměrná intenzita šedého tónu v oblasti bloku. Předpokladem pro toto hodnocení je, že oblasti s nízkou kvalitou mají nízkou hodnotu variace šedého tónu a průměrná hodnota bude příliš nízká či příliš vysoká.

Za práh variace intenzity šedého tónu byla empiricky určena hodnota 200. Pokud je hodnota variace pro blok nižší, než tato hodnota, je označen jako poškozený.

Aby blok nebyl označen za poškozený na základě průměrné intenzity šedého tónu, musí být tato hodnota vyšší než 100. Tento práh byl opět určen na základě pozorování této hodnoty u různých vzorků otisků prstů. Výpočet těchto vlastností je implementován v metodách třídy *ClarityEstimator*.

## Lokalizace vysoce poškozených oblastí

Druhým celkem lokalizace poškození je lokalizace vysoce poškozených oblastí a získání základních informací o nich. Tato funkčnost je implementována ve třídě *HighDamageDetector*.

Proces nalezení vysoce poškozených oblastí začíná určením vysoce a lehce poškozených bloků mapy kvality, která je výstupem předchozího kroku. Empiricky byly určeny prahy pro vysoce a mírně poškozené oblasti, konkrétně  $q < 0,44$  pro vysoce poškozené oblasti a  $q < 0,62$  pro mírně poškozené oblasti.

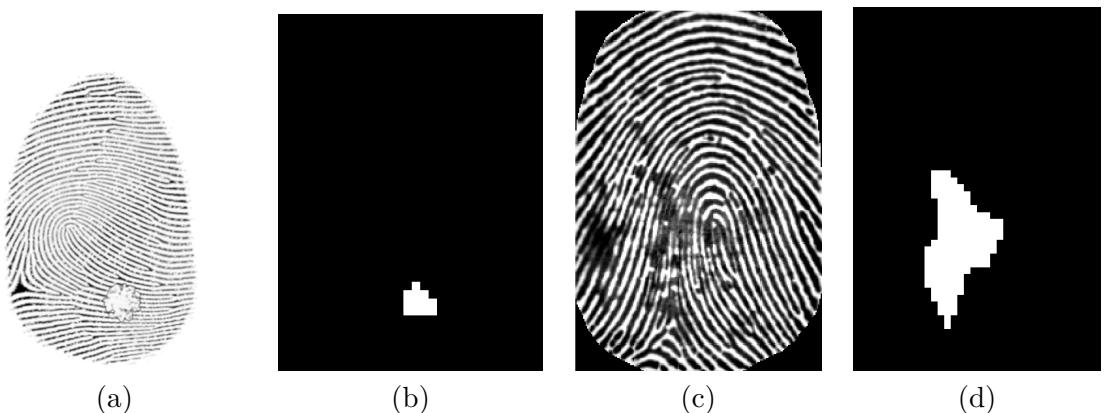
Následně je podle pozice a počtu vysoce a mírně poškozených bloků v okolí  $3 \times 3$  každého bloku určeno, zda se jedná o vnitřní, či hraniční blok poškozené oblasti.

Dalším krokem je odstranění bloků, které byly klasifikovány jako hraniční bloky poškozené oblasti, ale nejsou připojeny k žádnému vnitřnímu bloku poškozené oblasti. Zjištění, zda je blok připojen k alespoň jednomu vnitřnímu bloku poškozené oblasti je realizováno pomocí algoritmu floodfill (semínkové vyplňování) upraveného tak, že skončí s návratovou hodnotou *true* ve chvíli, kdy v okolí bloku tvořeného bloky stejného typu naleze blok označený jako vnitřní blok poškozené oblasti. V opačném případě končí s návratovou hodnotou *false*.

Jednotlivé oblasti s vysokým poškozením jsou následně identifikovány pomocí standardního algoritmu floodfill, jehož implementace je přizpůsobena účelu tak, že vrací všechny body náležící vyplňené oblasti.

Následuje připojení bloků označených jako okrajové bloky poškozené oblasti k odpovídajícím, již rozlišeným, poškozeným oblastem. K tomu dochází pomocí iterativního připojování přímo sousedících okrajových bloků k jednotlivým poškozeným oblastem. V každé iteraci jsou k jedné poškozené oblasti připojeny okrajové bloky, které s oblastí přímo sousedí. Tím, že je tato akce prováděna v iteracích je zamezeno rozšíření pouze jedné poškozené oblasti na úkor oblastí s ní sousedících. Ukázku lokalizovaných vysoce poškozených oblastí lze vidět na obrázcích 6.10.

Pro uložení informací o poškozených oblastech slouží třída *ImageArea*. Atributy této třídy jsou vektor obsahující všechny body náležící oblasti a typ bodů (například poškozené). Třída také umožňuje zjistit šířku, výšku či rozsah oblasti.



Obrázek 6.10: Ukázka lokalizace vysoce poškozených částí otisků a černých či šedých skvrn. (a)(c) Původní snímky otisků prstů. (b) Oblast identifikovaná jako černá či bílá skvrna. (d) Oblast s vysokou mírou poškození.

## Identifikace černých a bílých skvrn

Posledním celkem je identifikace černých a bílých skvrn a jejich odstranění. Funkčnost identifikace implementuje metoda `recognizeSpots` třídy `HighDamageDetector`. Metoda vykonává následující kontrolu nad každou oblastí, která byla identifikována jako vysoce poškozená. Kontrola je založena především na střední hodnotě a variaci intenzity šedého tónu v oblasti. Pokud je střední hodnota nízká (pro černé skvrny) či vysoká (pro bílé skvrny) a variace intenzity také nepřekročí stanovený práh, oblast je označena jako skvrna. Experimentálně byla spodní hranice pro střední hodnotu šedého tónu určena na 40, horní hranice na 190 a variace na 7. Rozměry oblasti také nesmí překročit velikost  $9 \times 9$  bloků. Ukázku detekce lze vidět na obrázku 6.10.

Po provedení identifikace černých a bílých skvrn následuje jejich odstranění, resp. nahrazení pruhovým vzorem, který je do obrazu generován na základě již odvozené lokální orientace a frekvence papilárních linií v oblasti skvrny. Tuto funkčnost implementuje třída `fillBawSpotsWithStripedPattern` třídy `DamageDetector`. Toto odstranění skvrn má pozitivní vliv na výsledek následující filtrace obrazu otisku, jelikož filtr nepracuje s chybným vzorem, který vytváří skvrnu, tedy poškozená oblast, ale s vzorem, který je podobný papilárním liniím, které by se v místě skvrny nacházely. Ukázku generovaného pruhového vzoru a jeho vliv na výslednou filtrace lze vidět na obrázcích 6.11.



Obrázek 6.11: Ukázka odstranění bílých a černých skvrn. (a) Vstupní syntetický otisk prstu s bradavicí - bílou skvrnou. (b) Skvrna nahrazena generovaným pruhovým vzorem. (c) Rekonstruovaný otisk bez odstranění skvrn. (d) Rekonstruovaný otisk po odstranění skvrn.

### 6.2.6 Lokalizace singulárních bodů

Lokalizace singulárních bodů slouží jako prevence proti chybnému označení oblastí těchto bodů jako poškozených, jelikož se vyznačují vysokou mírou zakřivení, stejně jako některé poškozené oblasti.

Pro lokalizaci singulárních bodů byla použita metoda *Poincaré Index* [4]. Tato metoda je pro účely této aplikace dostatečně úspěšná v lokalizaci jader a delt. Výhodný je také fakt, že metoda pracuje pouze s lokálními orientacemi, které byly určeny v předcházejících krocích. Její grafické znázornění lze vidět na obrázku 6.12. Poincaré Index lze určit pomocí následující rovnice: [4]

$$\tau_{ij} = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} \Delta k \quad (6.11)$$

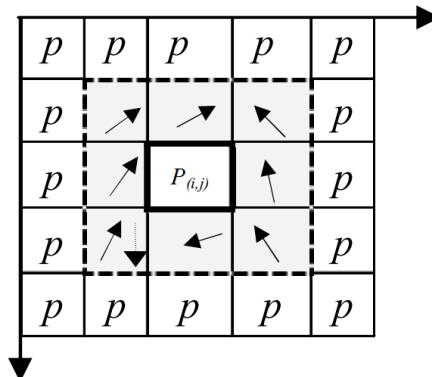
, kde  $\tau_{ij}$  je Poincaré Index v bodě  $(i, j)$  a  $N$  je počet bodů v okolí bodu  $(i, j)$ , které se účastní výpočtu indexu, v tomto případě 9.  $\Delta k$  je akumulovaná změna orientace v okolí, kterou lze určit jako: [4]

$$\Delta k = \begin{cases} \delta k & \text{pokud } |\delta k| < \pi/2 \\ \pi + \delta k & \text{pokud } \delta k \leq -\pi/2 \\ \pi - \delta k & \text{jinak} \end{cases} \quad (6.12)$$

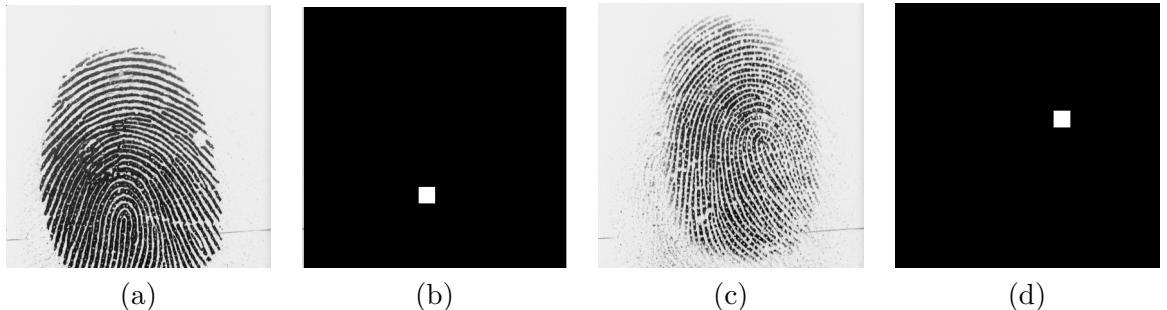
, kde

$$\delta k = \theta(i_{(k+1)mod(N)}, j_{(k+1)mod(N)}) - \theta(i_k, j_k) \quad (6.13)$$

Odstranění chybně detekovaných singulárních bodů probíhá na základě počtu bloků v okolí označených jako singulární body, minimální počet sousedících bloků označených jako singulární bod byl stanoven na 3. Pro uložení singulárních oblastí je opět použita třída *ImageArea*. Ukázka detekovaných singulárních bodů je na obrázku 6.13.



Obrázek 6.12: Znázornění výpočtu Poincaré indexu. [4]



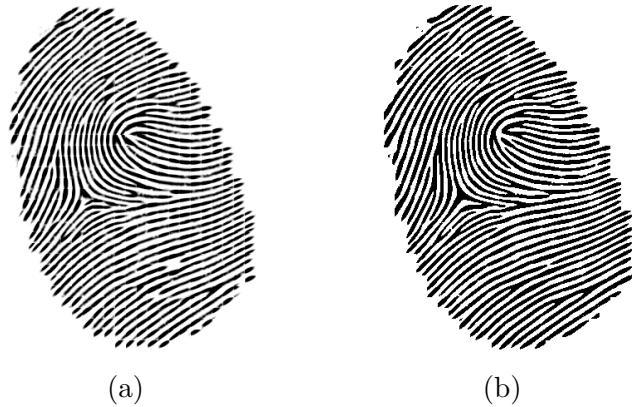
Obrázek 6.13: Ukázka detekovaných singulárních bodů.

### 6.2.7 Rekonstrukce poškozených částí

Rekonstrukce poškozených částí otisku prstu je realizována pomocí Gaborova filtru. Ten je implementován třídou *GaborFilter*. Pro použití tohoto filtru je nutné provést výpočet lokálních orientací a frekvencí papilárních linií, oddělení pozadí a popředí, detekci poškozených oblastí a detekci singulárních bodů, jelikož se všemi těmito vlastnostmi filtr pracuje, pro docílení co nejpřesnější rekonstrukce poškozeného otisku prstu. Všechny výše zmíněné extrahované vlastnosti jsou mu předány společně s obrazem otisku prstu ve třídě *Image*.

Při inicializaci třídy *GaborFilter* je nejprve vytvořena banka konvolučních jader Gaborova filtru jako dvourozměrné pole o velikosti  $30 \times 30$ . Vytvoření těchto jader je popsáno rovnicí 3.9 a zajišťuje jej funkce *getGaborKernel* knihovny *OpenCV*. Z pole lokálních orientací a frekvencí papilárních linií jsou nejprve zjištěny maximální a minimální hodnoty. Intervaly mezi minimem a maximem jsou vždy navzorkovány tak, aby rovnoměrně reprezentovaly dané intervaly. Všechny kombinace těchto vzorků nakonec tvoří dvojice parametrů orientace - frekvence jednotlivých jader Gaborova filtru. Velikost jader je fixně nastavena na  $6 \times 6$  pixelů.

Následuje samotná filtrace, která je rozdělena do dvou kroků, tedy filtrace překrývajících se bloků a filtrace nepřekrývajících se bloků. Nejprve je vždy provedena filtrace v překrývajících se blocích, která má obecně kvalitnější výsledky. Jelikož se filtrované bloky překrývají, vykazuje výsledný obraz otisku plynulejší změnu struktury nově zrekonstruovaných papilárních linií. V ojedinělých případech ale filtrace touto metodou vede ke ztrátě viditelnosti papilárních linií v některých oblastech. Důvodem je, že filtr, používající banku konvolučních jader, není schopen reagovat na fázový posun sinusového tvaru papilárních linií. V těchto případech je na obraz otisku aplikována druhá metoda, tedy filtrace v nepřekrývajících se blocích, kterou tento faktor neovlivňuje. U této metody se však v některých případech objevují nechtěné artefakty na rozhraní blokových oblastí, jak lze vidět na obrázku 6.14. Metoda je také méně účinná v rekonstrukci poškození, která jsou v obrazu otisku prstu tmavá.



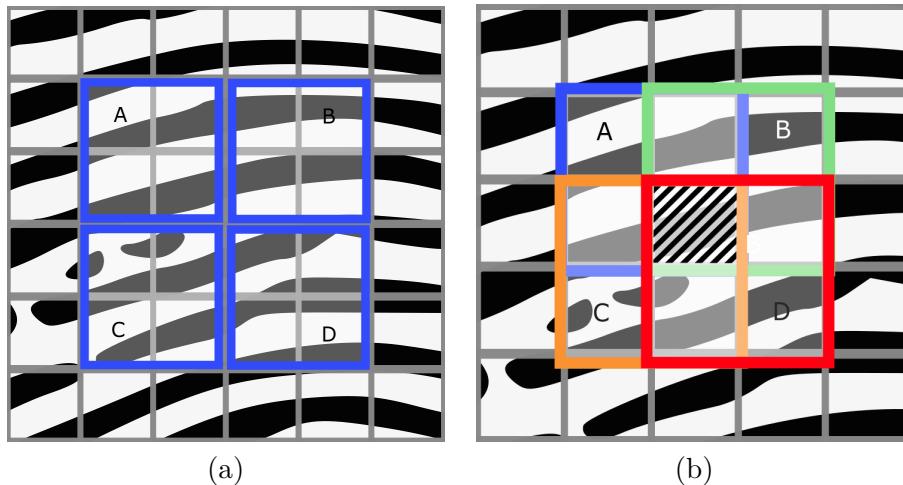
Obrázek 6.14: Ukázka rozdílných výsledků filtrace implementovanými metodami. (a) Metoda filtrace v nepřekrývajících se blocích. (b) Metoda filtrace v překrývajících se blocích.

### Filtrace překrývajících se bloků

Nejprve je tedy provedena filtrace překrývajících se bloků, jejichž středy jsou umístěny na mřížce, ve vzdálenosti rovné polovině velikosti bloku. Na každý pixel obrazu je tedy v této fázi aplikován filtr v rámci filtrování čtyř bloků, jak je znázorněno na obrázku 6.15. Na každý blok je v této fázi aplikován různý počet filtrovacích cyklů v závislosti na jeho kvalitě, podle pravidla:

$$iterace = (1 - kvalita) \cdot 30 \quad (6.14)$$

Pro filtrace je pro každý blok z banky konvolučních jader vybráno takové jádro, jehož orientace a frekvence je nejbližší lokální orientaci a frekvenci papilárních linií aktuálně filtrovaného bloku. Jelikož použité bloky neodpovídají blokům použitým ve fázi detekce poškození, je vždy použita hodnota, která byla stanovena pro pixel nacházející se ve středu použitého bloku.



Obrázek 6.15: Ukázka rozdílných metod výběru bloků metod filtrace. (a) Nepřekrývající se bloky. (b) Překrývající se bloky.

### Filtrace nepřekrývajících se bloků

Druhou fází rekonstrukce otisku je filtrace nepřekrývajících se bloků, které odpovídají blokům použitým při extrakci vlastností otisku. Znázornění výběru bloků lze vidět na obrázku 6.15. Na každý blok je v této etapě opět aplikován různý počet filtrovacích cyklů, podle stejného pravidla, jako u etapy filtrace překrývajících se bloků, tedy rovnici 6.14.

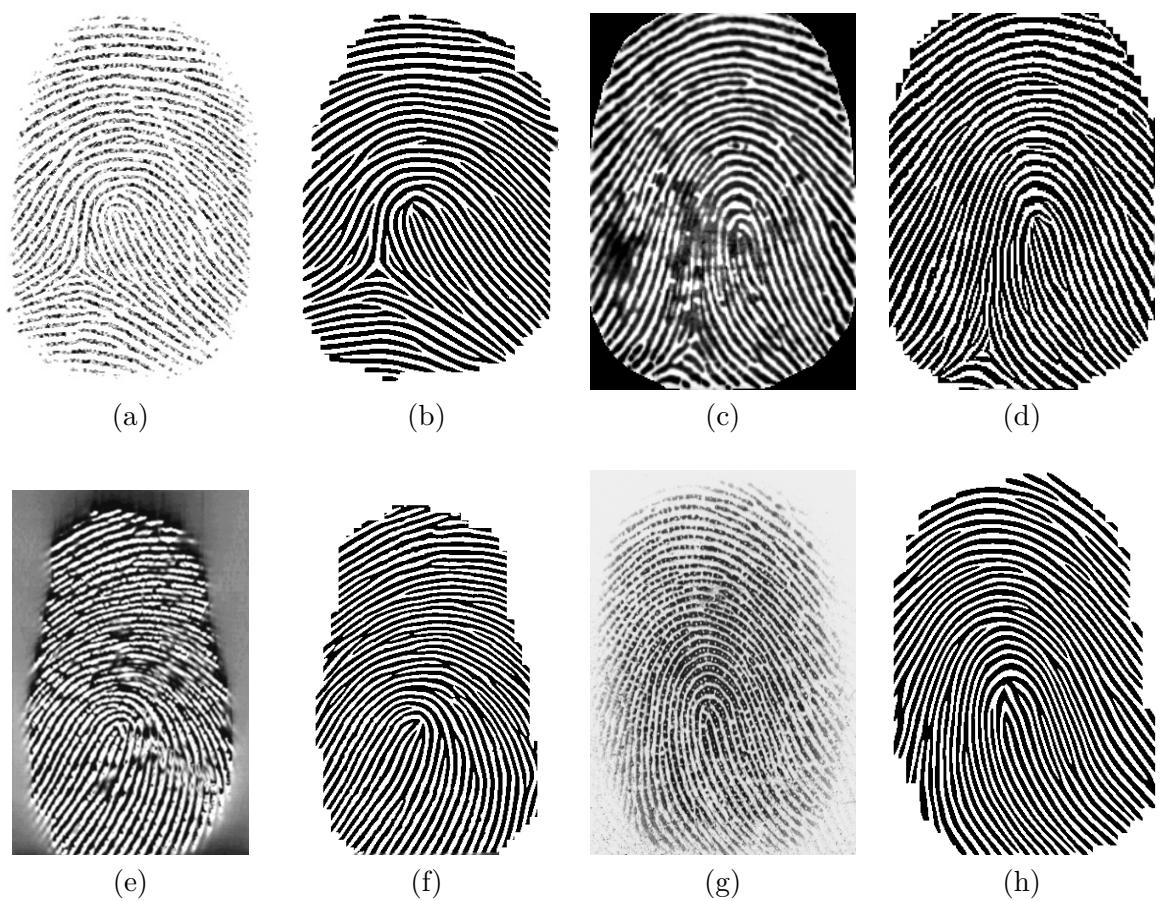
Pro filtraci se z banky opět vždy vybere jádro, jehož orientace a frekvence je nejbližší lokální orientaci a frekvenci papilárních linií filtrovaného bloku.

### Následné zpracování otisku (postprocessing)

Po provedení etap filtrace je nutné upravit obraz otisku prstu tak, aby působil celistvě a papilární linie v jednotlivých blocích na sebe intenzitou barvy co nejlépe navazovaly. Proto je na každý blok obrazu otisku následně aplikována následující transformace:

$$Q'_{ij} = \begin{cases} Q_{ij} - 0,5 \cdot |Q_{ij} - \mu| & \text{pokud } Q_{ij} < \mu \\ Q_{ij} + 0,3 \cdot |Q_{ij} - \mu| & \text{jinak} \end{cases} \quad (6.15)$$

, kde  $Q'_{ij}$  je nová hodnota pixelu,  $Q_{ij}$  je původní hodnota pixelu a  $\mu$  je střední hodnota intenzity šedotónové barvy pixelů bloku. Příklady takto rekonstruovaných otisků prstů lze vidět na obrázcích 6.16.



Obrázek 6.16: Ukázka rekonstrukce některých typů poškozených otisků prstů. (a)(c)(e)(g) Původní obrázky otisků prstů. (b)(d)(f)(h) Rekonstruované otisky prstů.

## Kapitola 7

# Testování a vyhodnocení výsledků

Tato kapitola se věnuje testování aplikace a vyhodnocení kvality provedené rekonstrukce. Testování bylo provedeno na databázi syntetických a reálných otisků prstů, která je popsána v sekci 7.1. Testování bylo rozděleno na 3 následující části:

- Porovnání hodnot pro vstupní a rekonstruované otisky, získaných nástrojem pro hodnocení kvality otisků prstů *NIST NFIQ 2.0*<sup>1</sup>.
- Porovnání hodnot pro vstupní a rekonstruované otisky, získaných alternativním nástrojem pro hodnocení kvality otisků prstů, který byl implementován v rámci diplomové práce Ing. Tomášem Oravcem [18].
- Manuální vyhodnocení kvality rekonstrukce, tj. zachování markantů, singulárních bodů a úspěšnost rekonstrukce různých typů poškození otisků prstů.

### 7.1 Databáze otisků prstů

Použitá databáze se skládá z celkem 1700 syntetických a reálných otisků prstů. Sada syntetických otisků se skládá z otisků získaných pomocí generátorů syntetických otisků prstů Anguli<sup>2</sup> a SFinGe<sup>3</sup>. Syntetické otisky generované nástrojem SFinGe navíc obsahují opět synteticky generovaná poškození, konkrétně atopický ekzém a bradavice. Databáze obsahuje také několik tzv. *master fingerprint* (viz 5.1), generovaných metodou SFinGe, s doplněným poškozením, jako například drobná i rozsáhlější přerušení papilárních linií, černé čáry v obraze otisku nebo změny v tloušťce papilárních linií.

Sada reálných poškození je opět členěna do dvou podkategorií, tedy otisky s rozsáhlejším poškozením a otisky bez úmyslného poškození, které ve většině případů vykazují nižší míru poškození. Ukázky otisků prstů zastupujících jednotlivé kategorie lze vidět na obrázcích 7.1.

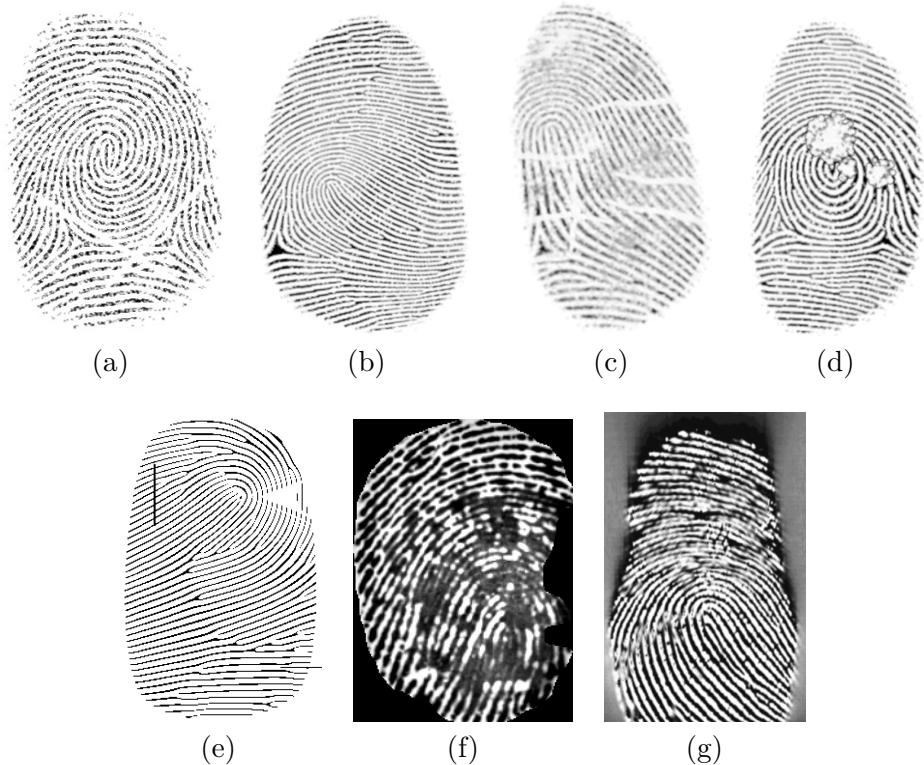
Výše zmíněné kategorie otisků prstů použité databáze budou, pro lepší porozumění, ve zbytku kapitoly nazývány jako *Anguli*, *SFinGe*, *SFinGe Master*, *SFinGe ekzém*, *SFinGe bradavice*, *Vysoko poškozené* a *Poškozené*.

---

<sup>1</sup><https://www.nist.gov/services-resources/software/development-nfiq-20>

<sup>2</sup><http://dsl.cds.iisc.ac.in/projects/Anguli/>

<sup>3</sup><http://biolab.csr.unibo.it>



Obrázek 7.1: Ukázka typů otisků prstů v použité databázi: (a) Otisk generovaný pomocí Anguli. (b) Otisk generovaný pomocí SFinGe. (c) Otisk s generovanými příznaky ekzému. (d) Otisk s generovanými bradavicemi. (e) tzv. Master fingerprint doplněný o poškození. (f) Vysoce poškozený, reálný otisk prstu. (g) Reálný, poškozený otisk prstu.

## 7.2 Určení kvality pomocí NIST NFIQ 2.0

První metodou zvolenou pro testování kvality rekonstrukce otisků prstů je nástroj *NFIQ 2.0*. Jedná se o nástroj pro hodnocení kvality otisků prstů vydaný institutem *NIST (National Institute of Standards and Technology)*.

NFIQ 2.0 určuje kvalitu otisku prstu tzv. skóre, tedy hodnotou z intervalu  $\langle 0, 100 \rangle$ , kde 0 znamená otisk bez užitečné informace, tedy nekvalitní a 100 otisk s vysokou mírou užitečné informace, tedy kvalitní. Toto skóre je určeno na základě vektoru vypočtených vlastností otisku o 69 hodnotách. Mezi získávané vlastnosti patří například počet a kvalita markantů, OCL (popsáno v 6.2.5), variace frekvence papilárních linií v obraze a podobně.

V rámci této fáze bylo nejdříve určeno skóre nástrojem NFIQ 2.0 pro vstupní otisky, následně bylo stanoveno také pro otisky rekonstruované navrženou aplikací a bylo vypočteno průměrné zlepšení skóre a průměrné skóre, pro všechny kategorie otisků testovací sady. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.1. Změna skóre u jednotlivých otisků rozdělených do dvou agregovaných kategorií, tedy syntetické a reálné lze vidět na obrázku 7.2.

Tabulka 7.1: Průměrná změna NFIQ 2.0 skóre u otisků rekonstruovaných navrženou aplikací a průměrné skóre zpracovaných otisků v jednotlivých kategoriích testovací sady.

	$\Delta$ skóre	$\bar{x}$ skóre
<b>Anguli</b>	5,43	64,4
<b>SFinGe</b>	2,01	61,7
<b>SFinGe Master</b>	2,75	54,5
<b>SFinGe ekzém</b>	2,15	63,7
<b>SFinGe bradavice</b>	1,46	62,0
<b>Vysoce poškozené</b>	11,87	62,0
<b>Poškozené</b>	9,20	60,6
<b>Celkem</b>	7,55	58,19

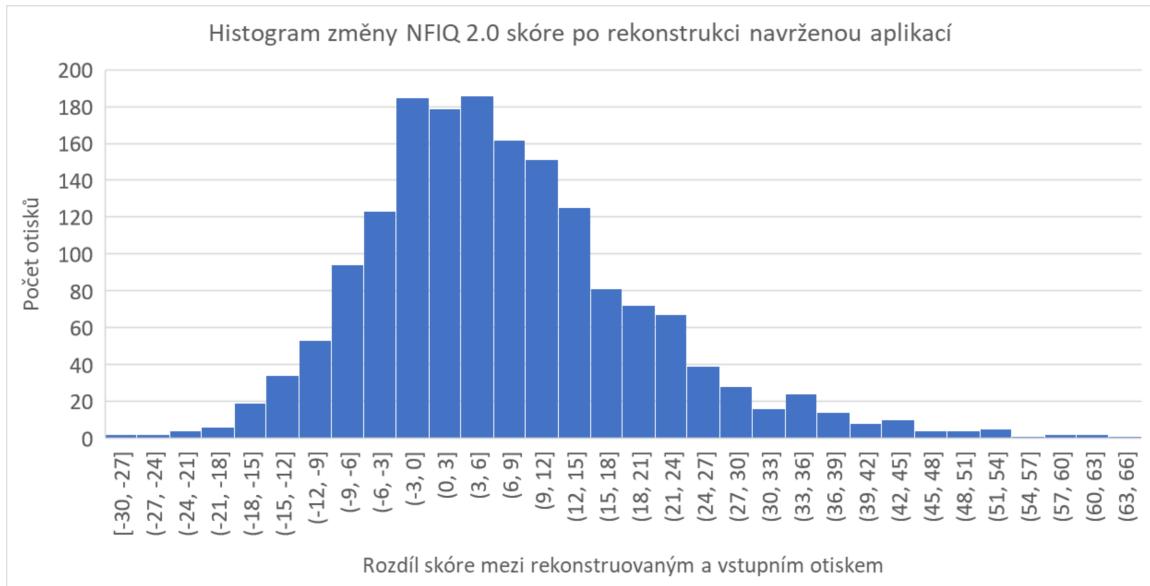
Z výsledků zobrazených v tabulce 7.1 lze vidět, že průměrné skóre se mezi vstupními a rekonstruovanými otisky liší průměrně o 7,55 bodů skóre. Vzhledem k faktu, že NFIQ 2.0 skóre je určováno z 69 různých vlastností, z nichž má každá na výsledné skóre jinou váhu, jsou následně rozebrány některé vybrané vlastnosti, které jsou provedenou rekonstrukcí nejvíce ovlivněny. Těmito vlastnostmi jsou *kvalita markantů*, *OCL* a *RFD - standardní odchylka frekvence papilárních linií*. Výsledky pro tyto vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách 7.2 a 7.3. U těchto vlastností lze pozorovat výraznější zvýšení kvality zejména potom u reálných poškozených otisků, kde se výrazně zlepšily všechny z uvedených parametrů, nejvíce potom kvalita markantů, kde změna dosáhla hodnoty 67,3 %. K mírnému zhoršení naopak došlo u otisků kategorie SFinGe Master, což může být způsobeno faktem, že otisky jsou již při vstupu celkově velice kvalitní a filtrace tak může naopak přinést zhoršení některých z těchto parametrů, zejména standardní odchylky frekvence papilárních linií, která se u použitých metod filtrace nejhůře kontroluje. Všechny analyzované hodnoty dodané nástrojem NFIQ 2.0 jsou uvedeny v dokumentu nacházejícím se na přiloženém DVD.

Tabulka 7.2: Průměrná změna kvality markantů, OCL (Orientation Certainty Level) a standardní odchylky frekvencí papilárních linií mezi vstupním a zpracovaným otiskem, vypočteny pomocí NFIQ 2.0.

	$\Delta$ kvality markantů (%)	$\Delta$ OCL (%)	$\Delta$ RFD (%)
<b>Anguli</b>	6,2	24,9	-26,2
<b>SFinGe</b>	12,1	-4,5	1,3
<b>SFinGe Master</b>	-1,5	0,5	-7,4
<b>SFinGe ekzém</b>	27,9	0,5	-10,1
<b>SFinGe bradavice</b>	19,6	-3,3	-5,0
<b>Vysoce poškozené</b>	29,9	7,7	-37,0
<b>Poškozené</b>	67,3	18,8	-45,7
<b>Celkem</b>	43,9	14,7	-34,3

Tabulka 7.3: Průměrná kvalita markantů, OCL (Orientation Certainty Level) a standardní odchylka frekvencí papilárních linií zpracovaných otisků, vypočteny pomocí NFIQ 2.0. Uvedené hodnoty jsou průměrem z hodnot vypočtených pro všechny z otisků použité sady.

$\bar{\sigma}$ kvalita markantů (%)	$\bar{\sigma}$ OCL (%)	$\bar{\sigma}$ RFD (%)
88,4	82,7	44,1



Obrázek 7.2: Histogram zobrazující zlepšení, resp. změnu skóre určeného nástrojem NFIQ 2.0 mezi vstupním a zpracovaným otiskem.

### 7.3 Alternativní metoda určení kvality otisku prstu

Druhou částí testování je použití nástroje pro určení kvality otisků prstů navrženého a implementovaného v rámci diplomové práce Ing. Tomášem Oravcem, který je podrobně popsán v [18]. Výsledkem hodnocení tohoto nástroje je percentuální vyjádření kvality, kde 0 % znamená nejhorší kvalitu a 100 % kvalitu nejvyšší. Nástroj používá k určení kvality několik vlastností, které z otisku získává a to konkrétně: [18]

- Zřetelnost papilárních linií (OCL).
- Překrývání distribucí barev hřebenů a údolí podle lineární regrese.
- Poměr hřebenů a údolí.
- Kontinuita struktury v rámci jednoho bloku.
- Kontinuita orientací vzhledem k okolním blokům.
- Rozsah kontrastu.

U testování tímto nástrojem byly opět nejdříve určeny hodnoty pro vstupní otisky prstů a následně pro otisky rekonstruované. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 7.4.

Tabulka 7.4: Průměrná změna kvality a kvalita zpracovaných otisků, resp. zlepšení kvality pro jednotlivé kategorie použité sady otisků metodou Ing. Oravce.

	$\Delta$ kvality (%)	$\varnothing$ kvalita (%)
<b>Anguli</b>	7,14	95,7
<b>SFinGe</b>	2,33	94,2
<b>SFinGe Master</b>	1,69	90,0
<b>SFinGe ekzém</b>	12,27	93,0
<b>SFinGe bradavice</b>	4,09	93,9
<b>Vysoko poškozené</b>	15,8	84,2
<b>Poškozené</b>	13,13	94,3
<b>Celkem</b>	10,73	93,0

V tabulce 7.4 lze vidět, že zpracované otisky dosahují poměrně vysoké kvality, průměrně 93,0 % a také vyššího průměrného zlepšení kvality, než u metody NFIQ 2.0, tedy 10,73 %. K nejvyšší míře zlepšení dochází opět u reálných poškozených otisků, kde zlepšení dosahuje hodnoty 13,13 %. Nejnižší míru zlepšení lze pozorovat u otisků kategorie SFinGe Master, kde se jedná o hodnotu 1,69 %. Poměrně markantní rozdíly ve výsledné kvalitě naměřené tímto nástrojem a nástrojem NFIQ 2.0 jsou pravděpodobně způsobeny rozdílnými vlastnostmi, které metody z otisků získávají a následně je používají pro samotné určení kvality. Navzdory rozdílné hodnotě výsledné kvality lze ale pozorovat, že změna kvality má u obou metod podobný trend, dosahuje tedy podobných hodnot u stejných kategorií testovaných otisků prstů.

## 7.4 Vyhodnocení kvality rekonstrukce poškozených oblastí

V této sekci bude vyhodnocena kvalita rekonstrukce poškozených částí a případný negativní vliv rekonstrukce na některé části otisků prstů, zejména singulární body. Jedná se o parametr, který nelze velice dobře automaticky testovat a proto bude hodnocení provedeno bez použití automatického nástroje. V následujících částech bude rozebrána úspěšnost rekonstrukce pro jednotlivé typy poškození, která lze u otisků prstů z použité sady pozorovat a v případě nepříznivých výsledků bude diskutováno možné zlepšení.

### 7.4.1 Méně rozsáhlá přerušení papilárních linií a nízký kontrast

Prvním typem poškození, která lze u otisků prstů z použité sady pozorovat jsou přerušení papilárních linií menšího charakteru, nejčastěji v podobě bílých či černých míst úzkého a protáhlého tvaru. Zástupcem této kategorie jsou například otisky prstů generované nástrojem Anguli a otisky generované nástrojem SFinGe doplněné o příznaky ekzému. Příklady těchto otisků a úspěšnosti jejich rekonstrukce jsou na obrázcích 7.3.

Na obrázcích 7.3 lze vidět, že navržený nástroj je poměrně úspěšný v rekonstrukci poškození menšího rozsahu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u otisků generovaných nástrojem Anguli, kde byla přerušení často zcela rekonstruována. U těchto otisků bylo navíc dosaženo celkového zlepšení kontrastu a viditelnosti papilárních linií, a to s velice nízkou variací změny tloušťky papilárních linií v celém obraze otisku.

U otisků generovaných nástrojem SFinGe bylo dosaženo podobných výsledků, ovšem s mírně nižší úspěšností. V některých případech byly v oblasti generovány papilární linie

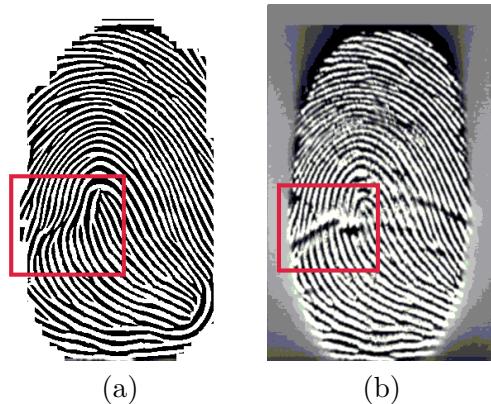
s mírně rozdílnou tloušťkou, než v oblastech okolních. V ojedinělých případech také vznikly v oblasti přerušení nové markantní body.

U otisků kategorie SFinGe Master fingerprint byla opět poškození úspěšně rekonstruována. Ve většině případů bez vzniku nových markantních bodů, s plynule navazujícími papilárními liniemi. U těchto otisků však často dochází k generování papilárních linií rozdílné tloušťky, než je tomu v okolí poškození. Důvodem může být fakt, že papilární linie jsou u těchto otisků často velice tenké a filtr se takto úzkým liniím nedokáže přizpůsobit.

U reálných otisků je situace podobná jako u otisků syntetických. Pokud se jedná o otisky s bílými poškozenými oblastmi protáhlého tvaru, byla rekonstrukce ve většině případů opět poměrně úspěšná, jak lze vidět na obrázku 7.3. Poněkud horších výsledků bylo dosaženo u poškození, která byla tmavá, nebo měla podobnou strukturu jako papilární linie. U těchto poškození v některých případech došlo během fáze získávání vlastností k mylnému označení poškození za papilární linii, zejména v případech, kdy orientace poškození byla podobná orientaci papilárních linií v daném místě. To mělo za následek chybně vytvořené pole lokálních orientací a následně i chybnou rekonstrukci. Ukázku takové rekonstrukce lze vidět na obrázku 7.4.



Obrázek 7.3: Ukázka rekonstrukce otisků prstů s menší mírou poškození. (a) Vstupní otisk generovaný nástrojem Anguli. (b) Vstupní otisk generovaný nástrojem SFinGe s doplněnými příznaky ekzému. (c) Vstupní SFinGe master fingerprint s doplněným poškozením. (d) Vstupní reálný otisk. (e) Zpracovaný otisk generovaný nástrojem Anguli. (f) Zpracovaný otisk generovaný nástrojem SFinGe s doplněnými příznaky ekzému. (g) Zpracovaný SFinGe master fingerprint s doplněným poškozením. (h) Zpracovaný reálný otisk.



Obrázek 7.4: Ukázka chybné rekonstrukce reálného otisku prstu s tmavým poškozením protáhlého tvaru, které bylo nástrojem mylně považováno za papilární linii.

#### 7.4.2 Černé a bílé skvrny

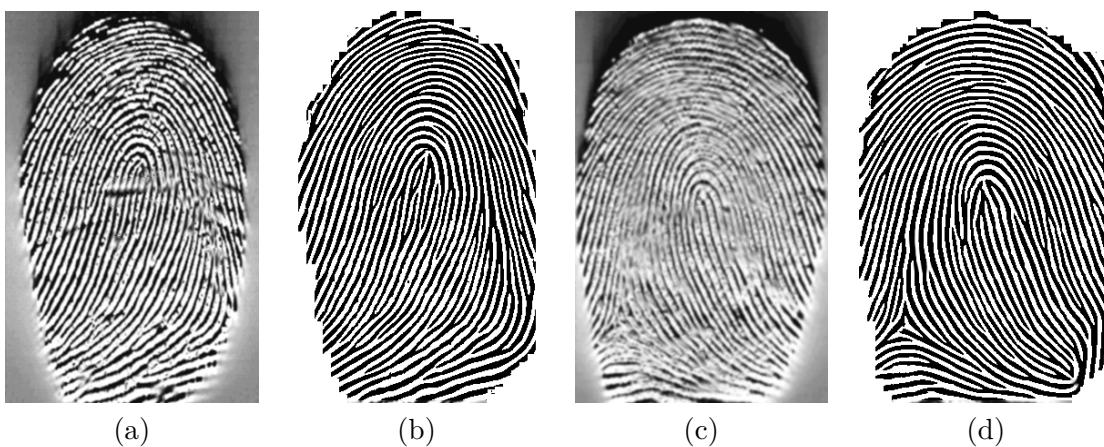
Dalším typem poškození, který lze pozorovat u otisků použité sady, jsou černé a bílé skvrny. Zjevným zástupcem jsou otisky prstů generované nástrojem SFinGe s bradavicemi. U tohoto typu poškození byla provedena úprava otisku prstu v jiných náležících oblastech, která je popsána v kapitole 6.2.5. Tato úprava celkově zvýšila kvalitu rekonstrukce skvrn. Jejich detekce byla úspěšná u 70% syntetických otisků s generovanými bradavicemi a to především u těch větších. U menších skvrn (do šířky dvou papilárních linií) není jejich vliv na výstup filtru tak znatelný a jejich detekce tedy není nezbytná. Výsledky rekonstrukce takových skvrn jsou na obrázcích 7.5.



Obrázek 7.5: Ukázka rekonstrukce otisků prstů s černými a bílými skvrnami, konkrétně bradavicemi. (a)(c) Vstupní otisky prstů. (b)(d) Rekonstruované otisky prstů.

### 7.4.3 Rozmazání a splývající struktura papilárních linií

U reálných otisků lze často pozorovat, že papilární linie splývají v důsledku pohybu prstu při snímání či jiného faktoru. Papilární linie tak působí rozmazaně a je obtížné rozeznat jejich strukturu. Otisky s tímto typem poškození lze nalézt v kategorii Reálné poškozené, jejich ukázku a také výsledky rekonstrukce lze vidět na obrázcích 7.6. Výsledek rekonstrukce tohoto typu poškození je vysoce závislý na jeho rozsahu (velikosti poškozené oblasti) a míře porušení struktury papilárních linií. Rekonstrukce je poměrně úspěšná, pokud je rozsah poškození menší než přibližně 40 % otisku prstu. Rekonstrukce je také znatelně kvalitnější, pokud papilární linie nejsou zcela slity v jeden celek, tj. jejich struktura není z obrazu na prostě ztracena. Rekonstrukce otisků s poškozením vyšším než zmíněných 40 %, je rozebrána v sekci 7.4.4.



Obrázek 7.6: Ukázka rekonstrukce reálných otisků prstů s rozmazanou strukturou papilárních linií v důsledku různých příčin. (a)(c) Vstupní otisky prstů. (b)(d) Rekonstruované otisky prstů.

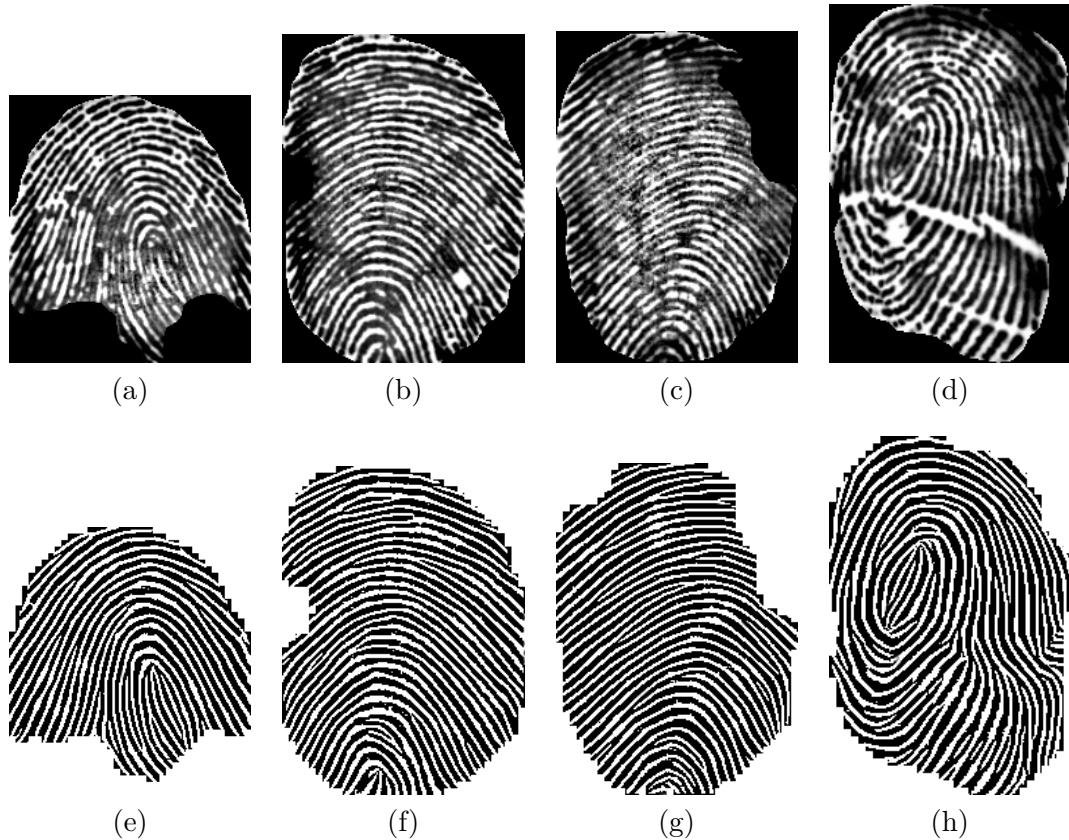
### 7.4.4 Rozsáhlá poškození (více než 40% otisku prstu)

Poslední skupinou jsou tedy rozsáhlá poškození, která se v použité sadě otisků vyskytuje výhradně u reálných otisků. Jejich původ se u jednotlivých otisků liší, některá jsou způsobena kožními onemocněními, některá chybným sejmutím otisku apod. U těchto otisků lze pozorovat také rozdílnou strukturu obrazu v poškozené oblasti. Kvalita rekonstrukce v těchto oblastech je závislá na několika faktorech, konkrétně:

- Rozsah (velikost) poškozených oblastí.
- Rozmístění poškozených oblastí v rámci otisku.
- Míra poškození, tj. do jaké míry je, či není možné rozeznat papilární linie.
- Struktura poškozené oblasti.
- Střední hodnota intenzity šedé barvy, resp. tmavost poškozené oblasti.
- Kvalita otisku mimo tyto vysoce poškozené oblasti.

Ukázky výsledků rekonstrukce ve vysoce poškozených oblastech lze vidět na obrázcích 7.7. Všechny zde zobrazené otisky disponují celkově nízkou kvalitou. Tento fakt velice komplikuje již fázi získávání vlastností, jelikož v obraze nejsou téměř žádné oblasti, ze kterých lze odvodit vlastnosti v oblastech vysoce poškozených. Výsledky rekonstrukce s chyběně získanými vlastnostmi pak nejsou příliš kvalitní. Výsledný otisk také často působí méně kvalitně v důsledku nízkého rozlišení vstupních obrázků.

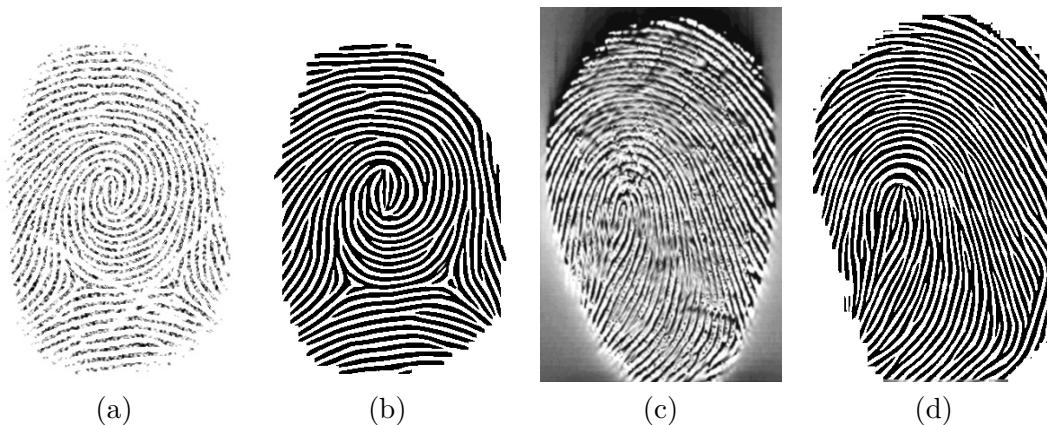
Zlepšení rekonstrukce takto poškozených otisků prstů by mohlo přinést přizpůsobení pole lokálních orientací a pole lokálních frekvencí jejich předpokládané struktury, vzhledem k počtu a typu singulárních bodů, tedy třídě otisku. Takto přizpůsobené vlastnosti by mohly eliminovat dopad nízké kvality otisků. Pro použití tohoto přístupu by ovšem bylo nutné korektně získat pozice všech singulárních bodů nacházejících se v otisku prstu, což může být při takto vysoké míře poškození velice obtížné.



Obrázek 7.7: Ukázka rekonstrukce reálných vysoce poškozených otisků prstů. (a)(b)(c)(d) Vstupní otisky prstů. (e)(f)(g) Poměrně úspěšně rekonstruované poškozené otisky. (h) Chyběně rekonstruovaný otisk prstu v důsledku celkové nízké kvality a výrazné poškozené oblasti.

#### 7.4.5 Vliv zpracování na singulární body a markanty

Posledním analyzovaným faktorem je dopad rekonstrukce na singulární body a markanty otisku prstu. Vzhledem k tomu, že nejlepšímu zachování struktury singulárních bodů byla implementována detekce těchto bodů, jelikož byly lokalizátorem poškození často označeny jako body poškozené. Následně se v těchto bodech neprovádí aktualizace lokálních orientací na základě získané mapy kvality. Tato detekce má za následek zlepšení podoby singulárních bodů ve zpracovaných otiscích, resp. jejich struktura je procesem rekonstrukce méně ovlivněna. Z rekonstruovaných otisků lze odvodit, že míra změny struktury singulárních bodů je přímo úměrná míře poškození otisku prstu, tohoto faktu si lze všimnout na obrázcích 7.8. Důvodem může být skutečnost, že u otisků nižší kvality je obtížnější určit polohu singulárních bodů a často tak nemusí být nástrojem rozeznáno. Druhým faktorem, který může ovlivnit změnu struktury singulárních bodů je nižší přesnost získaných vlastností v okolích oblastech singulárního bodu, to může mít za následek například přenesení orientace z oblasti singulárního bodu do oblastí okolních.



Obrázek 7.8: Ukázka vlivu míry poškození otisku prstu na výslednou míru změny struktury singulárních bodů. (a) Vstupní otisk vyšší kvality. (b) Zpracovaný otisk s téměř nepozměnou strukturou singulárního bodu. (c) Vstupní otisk nižší kvality. (d) Zpracovaný otisk s vyšší mírou změny struktury singulárního bodu.

Markanty se často používají k rozpoznávání otisků prstů, proto je jejich zachování důležitým parametrem. Zvýšení jejich kvality podle nástroje *NIST NFIQ 2.0* bylo již zmíněno výše v kapitole 7.2. Stejným nástrojem byl také určen počet markantů u vstupních i rekonstruovaných otisků a následně vypočtena průměrná změna tohoto počtu. Tyto hodnoty byly vyhodnoceny pouze pro otisky generovaného nástrojem SFinGe bez dalšího generovaného poškození. Výsledkem je průměrné zvýšení počtu markantů o 4,88. Po bližší prozkoumání bylo zjištěno, že se často jedná o vygenerování nových markantů v oblasti okrajů a v některých případech také v oblastech singulárních bodů. Tento negativní jev může být způsoben tím, že při metodách získávání vlastností a následné filtrace, pracuje aplikace s bloky obrazu o průměrné velikosti 10 pixelů. Bloky vyskytující se na hranici otisku prstu tak ve většině případů obsahují také část pozadí. Nové markanty tak mohou vznikat při aplikaci filtru právě na tyto hraniční oblasti. Řešením by mohlo být použití menších bloků při oddělování pozadí a popředí otisku a při filtrování následně použít masku, která by pozadí jednoznačně oddělovala od popředí. Tato změna by ale měla zásadní vliv na rychlosť filtrace a tím by výrazně zpomalila běh aplikace.

# Kapitola 8

## Závěr

Cílem této práce byl návrh algoritmů pro rekonstrukci poškozených částí otisků prstů a následná implementace těchto algoritmů. K dosažení tohoto cíle bylo nejprve třeba seznámit se obecně s biometrickou charakteristikou otisků prstů, jejich klasifikací a hodnocením kvality. Získané poznatky jsou uvedeny v druhé kapitole. Dále byly studovány dosavadní metody vedoucí ke zlepšení kvality otisků prstů a metody generování syntetických otisků prstů, jejichž metodiky je možné použít či přizpůsobit k účelu rekonstrukce poškozených oblastí, těmto bodům se věnuje třetí a pátá kapitola.

Následně byl navrhnut postup zpracování otisku a dílcí algoritmy, vedoucí k rekonstrukci poškozených částí, který byl posléze také implementován. Navržená posloupnost zpracování se skládá ze tří větších celků, konkrétně získání vlastností z otisku prstu, lokalizace poškození, která pracuje se čtyřmi vlastnostmi každého z definovaných bloků obrazu, a následné rekonstrukce, která je založena na filtraci v prostorové oblasti pomocí Gaborova filtru. Tato část práce je popsána v šesté kapitole.

Výsledná aplikace a jí provedená rekonstrukce poškozených otisků prstů byla následně testována na databázi celkem 1700 syntetických a reálných otisků prstů. Databáze obsahuje syntetické otisky generované nástroji Anguli a SFinGe s dále vloženým poškozením. Kromě těchto syntetických otisků obsahuje také množství otisků reálných s různou mírou a původem poškození.

Testování zlepšení celkové kvality otisků prstů bylo nejprve provedeno nástrojem pro hodnocení kvality otisků NIST NFIQ 2.0 a následně nástrojem alternativním, navrženým Ing. Tomášem Oravcem v rámci diplomové práce. Nástroji byla nejprve změřena průměrná kvalita vstupních otisků, poté kvalita otisků zpracovaných navrženou aplikací a tyto kvality byly porovnány. U NIST NFIQ 2.0 bylo průměrně dosaženo skóre 60 ze 100 možných. Průměrné zlepšení skóre je o 7,55 bodů. Tyto hodnoty naznačují, že došlo ke znatelnému zlepšení kvality. Byly proto dále zkoumány vybrané vlastnosti, které NFIQ 2.0 používá k výpočtu skóre kvality, konkrétně kvalita markantů, zřetelnost papilárních linií a variace frekvence papilárních linií, u těchto vlastností bylo dosaženo znatelnější míry zlepšení. U alternativní metody bylo průměrně dosaženo kvality 90 % a průměrného zlepšení o 10,73 %, což naznačuje poměrně vysokou výstupní kvalitu. Rozdílné hodnoty u těchto použitých metod mohou být způsobeny rozdílnými vlastnostmi, které metody používají pro určení kvality otisků prstů. Tyto metody a bližší informace o provedeném testování jsou uvedeny v kapitole 7.

Následně byla zhodnocena úspěšnost rekonstrukce jednotlivých typů a rozsahů poškození a také případné negativní vlivy zpracování na otisk prstu. Algoritmus vykazuje poměrně úspěšnou rekonstrukci u otisků s menším poškozením (do 40 %) plochy otisku. Nejlepších

výsledků dosahuje o otisků s přerušením papilárních linií v podobě podlouhlých světlých oblastí, které mohou být způsobeny například ekzémem, a u rozmazených částí otisku. Úspěšná rekonstrukce je také provedena pro oblasti černých či bílých skvrn menších rozměrů, způsobených například bradavicemi. Horsích výsledků bylo dosaženo u otisků s natožitkou rozsáhlým poškozením, že nebylo možné korektně odvodit vlastnosti z méně poškozených oblastí, a u otisků s poškozením s výraznou strukturou, která byla v některých případech mylně identifikována jako papilární linie.

Možným rozšířením navrženého algoritmu by bylo jeho specifikování pro konkrétní typ poškození. V takovém případě by jeho parametry mohly být upraveny tak, aby tento typ poškození dokázaly rekonstruovat úspěšněji než zde popsaný algoritmus, který byl navržen pro obecné poškození. Dalším možným rozšířením je zdokonalení metody lokalizace singulárních bodů a případně i návrh metody zlepšení kvality těchto bodů, který by neměl žádný negativní vliv na jejich strukturu. Všechny body zadání bakalářské práce byly splněny. V některých případech navíc s rozšířením. Konkrétně lze zmínit například využití kvality rekonstrukce několika metrikami a podrobné rozebrání výsledků získaných nástrojem NFIQ 2.0 či lokalizaci singulárních bodů.

# Literatura

- [1] University of Bologna: *Biometric System Laboratory* - webová stránka [online].  
<http://biolab.csr.unibo.it/home.asp>, 2019, navštívěno: 2019-01-10.
- [2] Alonso-Fernandez, F.; Fierrez, J.; Ortega-Garcia, J.; aj.: *A Comparative Study of Fingerprint Image-Quality Estimation Methods*. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, ročník 2, č. 4, Prosinec 2007: s. 734–743, ISSN 1556-6013.
- [3] Arif, A.; Li, T.; Cheng, C.: *Blurred fingerprint image enhancement: algorithm analysis and performance evaluation*. Signal, Image and Video Processing, ročník 12, č. 4, Květen 2018: s. 767–774, ISSN 1863-1711.
- [4] Awad, A. I.; Baba, K.: *Fingerprint Singularity Detection: A Comparative Study*. In Software Engineering and Computer Systems, editace J. Mohamad Zain; W. M. b. Wan Mohd; E. El-Qawasmeh, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, ISBN 978-3-642-22170-5, s. 122–132.
- [5] Bradski, G.; Kaehler, A.: *Learning OpenCV: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, Inc., druhé vydání, 2013, ISBN 1449314651.
- [6] Cappelli, R.: *Fingerprint Sample Synthesis*. Boston, MA: Springer US, 2015, ISBN 978-1-4899-7488-4, s. 668–679.
- [7] Drahanský, M.: *Fingerprint Recognition Technology - Related Topics : Skin Diseases, Image Quality and Liveness Detection*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011, ISBN 978-3-844-33007-6.
- [8] Drahanský, M.: *Hand-Based Biometrics: Methods and Technology*. IET book series in advanced biometrics, London: The Institution of Engineering and Technology, první vydání, 2018, ISBN 978-1-78561-224-4.
- [9] Drahanský, M.; Orság, F.; aj.: *Biometrie*. Brno: Computer Press, s.r.o, první vydání, 2011, ISBN 978-80-254-8979-6.
- [10] Gottschlich, C.: *Curved-Region-Based Ridge Frequency Estimation and Curved Gabor Filters for Fingerprint Image Enhancement*. IEEE Transactions on Image Processing, ročník 21, Duben 2012: s. 2220–7, ISSN 1057-7149.
- [11] Habif, T. P.: *Clinical Dermatology: A Color Guide to Diagnosis and Therapy*. Edinburgh: Mosby, 6 vydání, 2015, ISBN 978-03-232-6183-8.
- [12] Hong, L.; Wan, Y.; Jain, A.: *Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation*. ročník 20, č. 8, 1998: s. 777–789, ISSN 0162-8828.

- [13] Jain, A. K.; Flynn, P.; Ross, A. A.: *Handbook of biometrics*. New York: Springer Science+Business Media, 2008, ISBN 978-0-387-71040-2.
- [14] Kanich, O.: *Fingerprint damage simulation: a simulation of fingerprint distortion, damaged sensor, pressure and moisture*. Saarbrücken: Lambert academic publishing, 2014, ISBN 978-3-659-63942-5.
- [15] Kostiha, M.: *Klasifikace otisků prstů*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií. Ústav inteligentních systémů, Brno, 2008.
- [16] Lim, E.; Toh, K.; Suganthan, P.; aj.: *Fingerprint image quality analysis*. Listopad 2004, ISBN 0-7803-8554-3, s. 1241 – 1244 č.2.
- [17] Maltoni, D.: *Handbook of fingerprint recognition*. London: Springer, 2009, ISBN 978-1-84882-253-5.
- [18] Oravec, T.: *Metodika měření kvality otisků prstu*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií. Ústav inteligentních systémů, Brno, 2018.
- [19] Rak, R.: *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. Praha: Grada, první vydání, 2008, ISBN 978-80-247-2365-5.
- [20] Sinělníkov, R. D.: *Atlas anatomie člověka. Díl 3, Nauka o nervové soustavě, o ústrojích smyslových a o žlázách s vnitřní sekrecí*. Praha: AVICENUM, zdravotnické nakladatelství, 1982, 08-041-80.
- [21] Telgad, R.; Deshmukh, P.: *Computer Aided Technique for Finger Print Image Enhancement and Minutiae Extraction*. International Journal of Computer Applications, ročník 75, č. 17, 2013, copyright - Copyright Foundation of Computer Science 2013; Poslední aktualizace - 2013-09-13.
- [22] Thai, R.: *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction*. Dizertační práce, School of Computer Science and Software Engineering, The University of Western Australia, 2003.
- [23] Zahedi, M.; Ghadi, O. R.: *Combining Gabor filter and FFT for fingerprint enhancement based on a regional adaption method and automatic segmentation*. Signal, Image and Video Processing, ročník 9, č. 2, Únor 2015: s. 267–275, ISSN 1863-1711.