

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Alena Skoupilová



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

## ROZPOZNÁVÁNÍ PODOBNOSTI OTISKŮ PRSTU

FINGERPRINT IDENTIFICATION ALGORITHM

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Alena Skoupilová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Kašpar

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Biomedicínské inženýrství a bioinformatika**

Ústav biomedicínské inženýrství

**Studentka:** Bc. Alena Skoupilová

**ID:** 186688

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Rozpoznávání podobnosti otisků prstu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Nastudujte problematiku identifikace otisku prstu. Vypracujte literární rešerši v této oblasti. 2) Vytvořte vlastní databázi vhodnou pro testování identifikace. 3) Zvolte vhodné příznaky pro identifikaci otisků a na jejich základě v prostředí Matlab realizujte vhodné předzpracování obrazu. 4) Otestujte úspěšnost navrženého předzpracování na vytvořené databázi 5) Vytvořte algoritmus identifikace otisku prstu založený na kombinování zvolených příznaků. 6) Navržený algoritmus otestujte. Dosažené výsledky diskutujte a statisticky vyhodnoťte. 7) Program opatřete vhodným grafickým uživatelským rozhraním.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DRAHANSKÝ, Martin a ORSÁG, Filip. Biometrie. 1. vyd. [Brno: M. Drahanský], 2011. 294 s. ISBN 978-8-254-8979-6.
- [2] RAK, R., V. MATYÁŠ a Z. ŘÍHA. Biometrie a identita člověka. 1. vyd. Praha: Grada Publishing a.s., 2008, 631 s. ISBN 978-80-247-2365-5.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 17.8.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Jakub Kašpar

**prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je seznámení s pojmem identifikace a biometrie, jež je klíčovým oborem pro identifikaci otisků prstu. Práce také čtenáře seznamuje obecně s principem a druhy počítačového zpracování a počítačové detekce otisků prstu. Dále jsou popsány některé již existující a úspěšné metody rozpoznání podobnosti otisků prstu a popsána vlastní realizace předzpracování snímků otisků prstu. Vlastní algoritmus pro rozpoznávání podobnosti otisků prstu je navržen na základě pozic markantů vůči jádru otisku prstu, typu jádra a orientace markantů vůči jádru. Navržený algoritmus byl otestován na vhodně zvolené databázi snímků otisků prstů a výsledky testování byly statisticky vyhodnoceny.

## **Klíčová slova**

identifikace, biometrie, otisk prstu, markant

## **Abstract**

The main goal of this thesis is to introduce the meaning of term identification and term biometrics as a key field for fingerprint recognition. Thesis also introduces principals and types of automatic processing of fingerprint images and automatic fingerprints identification algorithms. An existing and successful methods are being described in the thesis and pre-processing of fingerprint images is being realized. Automatic fingerprint identification algorithm based on distance of minutiae from the core, core type and orientation field of the fingerprint is proposed. The proposed algorithm was tested on a database of fingerprint images and was statistically analysed.

## **Keywords**

identification, biometrics, fingerprint, minutiae

## **Bibliografická citace:**

SKOUPILOVÁ, Alena. Rozpoznávání podobnosti otisků prstu. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126857>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Jakub Kašpar.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „*Rozpoznávání podobnosti otisků prstu*“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **17. srpna 2020**

.....

Alena Skoupilová

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jakobovi Kašparovi. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne **17. srpna 2020**

.....

Alena Skoupilová

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Identifikace a biometrie .....	2
2.1	Identifikace.....	2
2.2	Identifikace osob .....	2
2.3	Biometrie.....	3
2.4	Biometrické vlastnosti.....	4
2.5	Biometrický systém.....	5
3	Otisk prstu.....	7
3.1	Snímání otisku prstu.....	8
3.2	Snímací senzory .....	8
4	Počítačové zpracování otisku prstu.....	10
4.1	Předzpracování obrazu otisku prstu .....	10
4.2	Segmentace .....	11
4.3	Skeletonizace.....	11
4.4	Gaborova filtrace.....	12
4.5	Lokální orientace papilárních linií .....	14
4.6	Lokální frekvence papilárních linií .....	15
4.7	Detekce singulárních bodů .....	15
4.8	Detekce markantů.....	17
4.9	Porovnávání otisků prstu.....	18
4.10	Vyhodnocení podobnosti.....	18
5	Přehled metod identifikace otisku prstu.....	19
5.1	Metody založené na markantech .....	19
5.2	Metody založené na korelaci.....	24
5.3	Metody založené na geometrických vlastnostech papilárních linií.....	25
6	Navržený algoritmus.....	29
6.1	Předzpracování .....	29
6.2	Nalezení a extrakce markantů .....	36
6.3	Nalezení a extrakce jádra .....	37
6.4	Vyčíslení podobnosti.....	39
6.5	Grafické uživatelské rozhraní .....	41
7	vyhodnocení výsledků .....	45
8	Závěr .....	51

# 1 ÚVOD

Automatizovaná identifikace osob na základě biometrických charakteristik je v dnešní době digitalizace velmi rozvinutým oborem. Identifikace na základě rozpoznání podobnosti otisku prstu je pak jednou z nejpoužívanějších biometrických charakteristik. Papilární linie, jakožto jedinečný a téměř nezničitelný znak pro každého individuálního jedince, dávají otisku prstu velice individuální charakter a zároveň také časově neměnný. Využitelnost otisků prstu v praxi je známá již dlouhodobě, ale tato využitelnost se razantně zvedla až s příchodem výpočetní techniky. Digitalizace otisků prstu a automatizace jejich porovnávání vedla k značnému urychlení procesu identifikace osob.

Identifikace daktyloskopických snímků je využívána v kriminalistice, bezpečnosti, lékařství a pro soudní a policejní účely. Nemálo přenosných zařízení je v dnešní době také zabezpečeno pomocí identifikace otisku prstu, hlavně mobilní telefony a laptopy. Další hojně využití je pak v rámci biometrického cestovního pasu.

Existuje několik přístupů k porovnávání a vyhodnocení podobnosti otisků prstu. Většina metod využívá výskytu markantů otisku, jež představují charakteristická zakončení papilárních linií, ale také přítomnost singulárního bodu v obrazu otisku prstu. Tento singulární bod se označuje jako jádro otisku a často je klíčovým příznakem většiny metod. Další metody pak zahrnují například metody založené na lokálních geometrických vlastnostech papilárních linií či metody založené na korelaci.

Nepřeberné množství metod rozpoznávání bylo v minulosti realizováno v rámci mezinárodních soutěží ve vývoji rozpoznávacích algoritmů pro otisky prstu. Tyto soutěže daly možnost přístupu široké veřejnosti k testovacím databázím snímků otisků prstů zveřejněných pro účel optimalizace těchto algoritmů. Jednu z největších mezinárodních soutěží představuje soutěž FVC (*Fingerprint Verification Competition*), jejíž veřejně dostupná databáze byla využita v rámci této práce.

Cílem práce je navržení a realizace automatizovaného identifikačního algoritmu pro rozpoznávání podobnosti otisků prstu na. V teoretické části práce jsou popsány existující metody včetně metod vhodného předzpracování za využití Gaborovy filtrace a s tím spojené vytvoření pole lokální orientace a frekvence obrazu otisku prstu. Popsané metody automatického předzpracování jsou implementovány v prostředí MATLAB v praktické části práce. Dále je navržen a implementován identifikační algoritmus pro rozpoznávání podobnosti otisků prstu jež extrahuje a využívá vhodné příznaky, primárně markanty a jádro otisku. Navržená metoda je dále srovnána a statisticky vyhodnocena.

## 2 IDENTIFIKACE A BIOMETRIE

### 2.1 Identifikace

Pro pojem identifikace se v poslední době nachází mnoho uplatnění zejména nutností institucí (lidská společenství, státy, právní i privátní organizace) i jedinců rozlišovat a ztotožňovat jevy, projevy, osoby, zvířata či předměty pro své vlastní zájmy (státní, osobní, ...) nebo dokonce pro ochranu existenčního přežití (konkurenční boj, mocenský boj, ...). [1]

Identifikovat lze předměty, osoby, zvířata i rostliny, ale také projevy, požadavky a činnosti. Identifikací lze nazvat i stanovení lékařské diagnózy, jejíž součástí je přirovnávání projevů nemoci pacienta s projevy nemoci u většího množství pacientů se stejnou chorobou, jež byly evidovány, statisticky zpracovány a v praxi dlouhodobě ověřovány. Klasickou diagnostiku (ať už lékařskou, technickou nebo společenskou) lze tedy také chápat jako identifikaci. [1]

#### **Identifikaci lze dělit:**

##### 1) Identifikace konkrétní

- Identifikace osob
- Identifikace předmětů
- Identifikace rostlin
- Identifikace živočichů
- Identifikace látek a materiálů

##### 2) Identifikace abstraktní

- Identifikace procesů, chování, zájmů, jevů, projevů, činností [1]

### 2.2 Identifikace osob

Termín identifikace osob je definován jako ustanovení identity jedince. Potřeba identifikace osob vyvstala hlavně z masových přírodních katastrof jako jsou zemětřesení, tsunami, sesuvy půdy, záplavy atd., dále pak z katastrof zapříčiněných člověkem, což představují teroristické útoky, výbuchy trhavin, masové vraždy a v případech, kdy je tělo

vysoce znetvořeno za účelem znemožnění určení identity dané osoby. Potřeba identifikovat zesnulé je zřejmá pro sociální a legální účely. [2]

## 2.3 Biometrie

Pojem biometrie pochází z řeckého slova „bios“ znamenající život a „metros“ znamenající „měřítko“. Biometrie představuje identifikaci a verifikaci lidské bytosti na základě jeho/její fyziologické a behaviorální charakteristiky. Mnoho biometrických metod vycházejících z identifikace/verifikace zpracovává různé unikátní aspekty lidského těla, jednoduchost získání biometrických dat, veřejného přijetí a nutného stupně zabezpečení. [3]

V současné době, kdy je většina transakcí (finančních i jiných) automatizována a mnoha z nich propojena, důležitost zabezpečení byla zvýšena. Zabezpečení je často zajištěno formou majetku (identifikační karty, klíče) nebo tajnou znalostí (heslo, PIN kód). Tento typ zabezpečení však není neomylný. Identifikační karta může být ztracena nebo odcizena a heslo zapomenuto. Tudíž v tomto směru zabezpečení došlo k dalšímu vývoji a ten vedl k využívání částí lidského těla nebo lidského chování pro zabezpečení a autentizaci a také vedl ke vzniku biometrie jako vědního oboru. Identifikace osoby by tedy nyní měla sestávat z biometrické identifikace. [3]

Každý aspekt lidské fyziologie a lidského chování, který může být biometrickou vlastností, by měl splňovat pět podmínek podle Clarke, které jsou:

- 1) Univerzalita: Každá osoba by měla vlastnit tuto danou biometrickou vlastnost.
- 2) Jedinečnost: Žádné dvě osoby by neměli mít shodnou tuto danou biometrickou vlastnost.
- 3) Stálost: Daná biometrická charakteristika by se neměla v čase měnit
- 4) Získatelnost: Daná biometrická vlastnost by měla být měřitelná praktickým snímacím zařízením.
- 5) Přijatelnost: Veřejnost by neměla mít silné námitky ke sběru dané biometrické vlastnosti. [3]

## 2.4 Biometrické vlastnosti

Existují dva základní typy biometrických vlastností:

1) Statické – jedná se o neměnicí se fyzickou neboli anatomickou vlastnost. Tento pevný rys představuje konkrétní biometrickou vlastnost, která je statická tedy vždy stejná a neovlivnitelná aktuálním stavem člověka. Mezi statické vlastnosti patří:

- Otisk prstu
- Obličej
- Duhovka oka
- Sítnice oka
- Geometrie ruky
- Dlaň
- DNA
- Termogram obličeje
- Dentální obraz
- Podpis (statická forma)
- Tvar ucha
- Snímek nehtu [4]

2) Dynamické – představují měnící se akci lidského jedince. Tato biometrická vlastnost je velice ovlivnitelná. Sejmutí dynamické biometrické vlastnosti vede k jiné skupině biometrických vzorků. Mezi dynamické vlastnosti patří:

- Hlas/řeč
- Chůze
- Mímika obličeje a pohyby rtů
- Podpis (jeho dynamická forma)
- Dynamika stisku kláves [4]

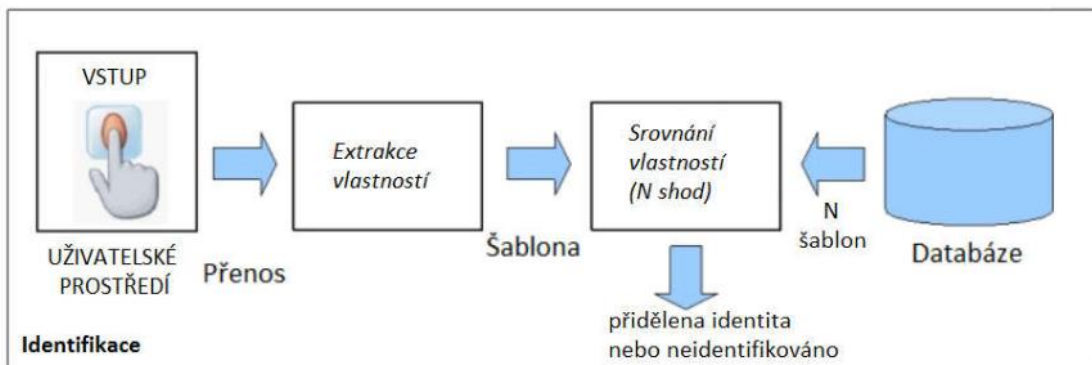
## 2.5 Biometrický systém

V závislosti na počtu použitých vlastností jsou definovány dva typy biometrických systémů:

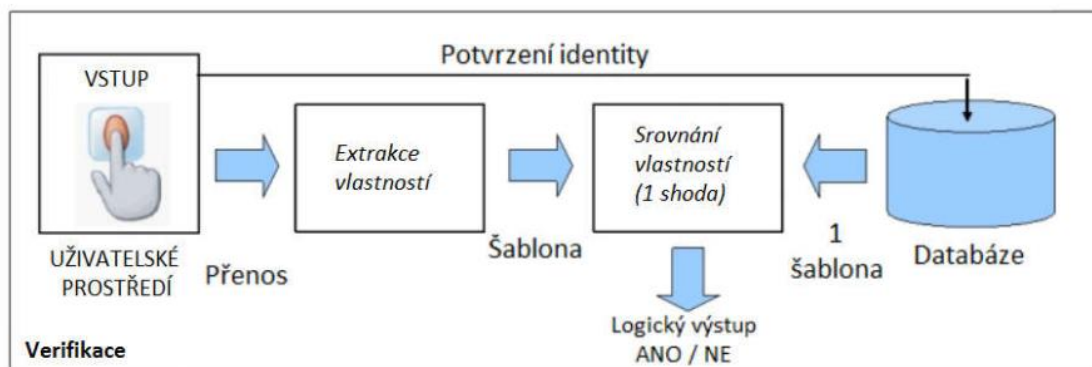
- 1) Unimodální biometrické systémy – využívající pouze jednu biometrickou vlastnost. V praxi jsou nejvíce využívány právě tyto systémy. Mezi jejich výhody patří nižší náklady na pořízení, mezi nevýhody pak nižší spolehlivost. [4]
- 2) Multimodální biometrické systémy – využívající více biometrických vlastností nebo více příznaků dané vlastnosti. Výhodou naopak od unimodálních je vyšší spolehlivost rozpoznání a nevýhodou vyšší pořizovací náklady. [4]

V závislosti na kontextu použití lze biometrické systémy dělit na jiné dva typy:

- 1) Verifikační biometrické systémy – validující identitu člověka porovnáváním s vlastními biometrickými vlastnostmi uloženým v databázi systému. Identita je prokázána jedincem za pomoci PIN kódu, uživatelského jména, otisku prstu nebo identifikační karty a systémem je provedeno porovnání metodou 1:1 a vyhodnoceno, zda prokázaná identita opravdu náleží danému jedinci. Verifikace identity je běžně využívána pro pozitivní rozpoznání, kde je cílem zamezit používání dané identity vícero jedinci (prokázaná identita může být vyhodnocena jako pozitivní nebo negativní). [5]
- 2) Identifikační biometrické systémy – rozpoznávající individuálního jedince na základě prohledávání biometrických vlastností uložených v systému a nalezení shody. Porovnávání pro nalezení shody je provedeno metodou 1:N (N představuje počet vlastností v databázi systému) a výstupem je přiřazení identity individuálnímu jedinci nebo selhání v případě, že vstupní biometrická vlastnost není obsažena v databázi systému. Identita není jedincem prokazována, ale je mu přidělena. [5]



Obrázek 1: Blokové schéma identifikace [6]



Obrázek 1: Blokové schéma verifikace [6]

### 3 OTISK PRSTU

Otisk prstu je vzor papilárních linií a brázd na povrchu špičky prstu. Na lokální úrovni existují charakteristická zakončení papilárních linií a brázd, tzv. *markanty* (minutiae). Markanty představují místa charakteristického zakončení nebo rozdělení papilárních linií. Specifický reliéf papilárních linií se u člověka formuje již v prvních 7 měsících embryonálního vývoje. Otisk prstu je rozdílný i pro identická dvojčata, dokonce je rozdílný pro každý prst daného člověka. [5]

*„Daktyloskopie je nauka o obrazcích papilárních linií na vnitřní straně článků prstů, na dlaních a chodidlech.“ [1]*

Daktyloskopie je tedy biometrická metoda, jež umožňuje identifikaci osob. Existence a vznik papilárních linií se řídí třemi zákony:

- 1) Na světě neexistují dva jedinci mající identické obrazce papilárních linií.
  - Za předpokladu, že kresba papilárních linií na jednom koncovém článku prstu obsahuje 20 charakteristických znaků (markantů), je teoreticky možných 64 miliard různých variant kreseb. Kresby běžně obsahují 30-60 markantů, proto je výskyt dvou zcela shodných kreseb velice nepravděpodobný. [1]
- 2) Kresby papilárních linií zůstávají relativně neměnné po celý život člověka.
  - Již od 4. měsíce embryonálního vývoje člověka se začínají tvořit papilární linie. Tím je dán základ kresby, jež se nemění po celý život daného jedince. Průzkumy ukázaly, že kresba a charakteristické znaky se s narůstajícím věkem nemění. Pouze ve velmi pokročilém věku může být kresba narušena vráskami stárnoucí kůže. [1]
- 3) Není-li odstraněna zárodečná vrstva kůže, jsou papilární linie relativně neodstranitelné.
  - Tvrzení, že spálením, odřením nebo seříznutím povrchové kůže lze papilární linie trvale odstranit je nesprávný. Znemožnění daktyloskopické identifikace lze docílit jedině odstraněním zárodečné vrstvy kůže. Při odstranění vrchní vrstvy kůže se papilární linie obnoví po zahojení. [1]

## 3.1 Snímání otisku prstu

Pro obecný postup vyhodnocení existuje vysoká závislost na kvalitě vstupních dat. Není tomu jinak u snímání daktyloskopických snímků, které lze rozdělit do dvou skupin:

### 1) Klasické snímání

- Představuje vyhledání daktyloskopických stop, jejich zviditelnění, fixaci, přenos do sbírek a evidencí a následnou digitalizaci. Tyto daktyloskopické otisky vznikají při kontaktu kůže s objektem. Prvotně se vyskytující problém s přenosem manuálních otisků do digitální podoby byl vyřešen zavedením optických skenerů, které se již dnes běžně využívají. [1]

### 2) Bezprostřední snímání

- Tento typ snímání je charakterizován postupem přiložení prstu na senzor danou osobou a následnou verifikací. Dříve tento postup představoval potřetí prstu nebo dlaně černou barvou a následný otisk na daktyloskopickou kartou, jež byla následně oskenována do počítače. Nyní je tento již zastaralý postup nahrazen tak zvaným *live-scanningem*, který představuje technologii současného snímání a automatizovaného převodu do digitální podoby daného daktyloskopického snímku. [1]

## 3.2 Snímací senzory

### Optické senzory

Tyto senzory zachycují vizuální obraz povrchu prstu. Konec prstu se dotýká povrchu hranolu a LED diody představují zdroj světla. Obraz je zachycen po zobrazení jeho úplného vnitřního odrazu v hranolu CMOS kamerou nebo jiným detektorem. Optické senzory jsou levné a spolehlivé. Jsou ale objemné a objevují se na jejich povrchu nečistoty a prach, které ovlivňují kvalitu sbíraných otisků prstu. [3]

### Kapacitní senzory

Kapacitní senzory snímají povrch prstu za použití měření elektrické kapacity. Větší dielektrická konstanta papilárních linií dává větší kapacitanci než brázdy, které obsahují vzduch. Kapacitní senzory dávají kvalitnější snímky v rozmanitějších podmínkách. Jsou však drahé, spotřebují více energie a nefungují dobře, pokud je snímáný prst příliš suchý. [3]

## **Teplotní sensory**

Senzory teplotní obsahují spojitě uspořádaní zahřívacích prvků a teplotních senzorů. Zachycují rozdíly teplot mezi papilárními liniemi a brázdy. Teplotní mapa je převedena na optický obraz papilárních linií, které mají nižší teplotu vlivem přítomnosti potních pórů a brázdy, které vykazují vyšší teplotu. Teplotní sensory jsou levné a kompaktní. Spotřebují však více energie a nejsou efektivní při vyšších teplotách okolí. [3]

## **Ultrazvukové sensory**

Tyto sensory pracují principiálně podobně, jako sensory optické. Využívají odražené ultrazvukové svazky, jejíž odraz je ovlivněn tvarem papilárních linií a brázd. Výstupy těchto senzorů nejsou ovlivněny nečistotami ani prachem na povrchu prstů a senzoru a jsou tak spolehlivější. Jsou také menší, tudíž přenosnější a není snadné tyto sensory obelstít. [3]

## 4 POČÍTAČOVÉ ZPRACOVÁNÍ OTISKU PRSTU

Jediný způsob identifikace daktyloskopického otisku mající v dnešní době význam je prostřednictvím počítačové techniky. Počítačové zpracování snímku otisku prstu, jehož výstupem je jeho identifikace, sestává ze čtyř kroků:

- 1) Předzpracování obrazu otisku prstu
- 2) Nalezení a extrakce příznaků
- 3) Porovnání otisků prstu
- 4) Vyhodnocení podobnosti [1]

### 4.1 Předzpracování obrazu otisku prstu

Cílem předzpracování je zvýraznění papilárních linií otisku prstu vůči pozadí kresby těchto linií. [1]



Obrázek 2: Kresba papilárních linií v otisku prstu [7]

Snímky otisků prstů mají v reálné praxi rozmanitou kvalitu. Obecně patří daktyloskopické otisky k nejvíce zašuměným obrazům. Šum představuje nadbytečné prvky obrazu, jež nenesou žádnou informační hodnotu pro další zpracování obrazu. V případě snímků otisku prstu jsou touto informační hodnotou daktyloskopické linie a markanty. Vzhled zašumění obrazu záleží na mnoha faktorech. Nejvýznamnějšími

faktory jsou druh použitého senzoru, vliv vnějších podmínek, ale také osobní vliv snímaného jedince. [1]

## 4.2 Segmentace

Ideálním výstupem předzpracování obrazu otisku prstu je segmentovaný binární obraz reprezentovaný binárními hodnotami, přičemž jedna hodnota představuje přítomnost papilární linie a druhá hodnota přítomnost pozadí kresby papilárních linií.

Hlavním krokem segmentace je extrakce oblasti zájmu obsahující vzor papilárních linií otisku od pozadí, jež má nulovou informační hodnotu. Pro získání tohoto obrazu je možné využít texturní analýzy, jelikož vzor papilárních linií představuje poměrně silnou texturu.

Dalším krokem, jež vede ke vzniku zmíněného binárního obrazu je odstranění šumu za pomoci lokálních i globálních operátorů a co největší zvýraznění hledaných papilárních linií. Častým problémem je také různý kontrast v různých částech snímku. Pro odfiltrování nežádoucího šumu je tedy důležitým krokem získání lokální orientace a lokální frekvence papilárních linií, jež jsou krom zpracovávaného obrazu vstupem do Gaborovy filtrace, jež bude popsána dále. Po odstranění šumu pomocí Gaborovy filtrace následuje vytvoření binárního obrazu – binarizace. [7]



Obrázek 3: Binarizace – vlevo před binarizací, vpravo po binarizaci [8]

## 4.3 Skeletonizace

Dalším krokem předzpracování je tzv. skeletonizace, jež představuje transformaci papilárních linií na jedno pixelové linie. Tloušťka čar papilárních linií je v původních snímcích příliš velká a pro další počítačové zpracování je žádoucí tyto linie ztenčit na tloušťku jednoho obrazového pixelu.

V rámci skeletonizace je pro přesnou extrakci příznaků, jež jsou klíčové pro následné rozpoznání podobnosti dvou otisků, žádoucí zachovat místa větvení a ukončení papilárních linií na stejných pozicích v obraze. [1]



Obrázek 4: Skeletonizace – vlevo před skeletonizací, vpravo po skeletonizaci [8]

## 4.4 Gaborova filtrace

Gaborovy filtry, jež jsou v procesu zvýrazňování papilárních linií používány jako banka filtrů, jsou inspirovány lidským optickým systémem. Jeden Gaborův filtr představuje Gaussovo jádro, jež je modulováno plošnou sinusovou vlnou:

$$h(x, y, \lambda, \theta, \psi, \sigma_x, \sigma_y) = g(x', y', \theta, \psi, \sigma_x, \sigma_y) \cdot e(x', \theta, \lambda, \psi), \quad (1)$$

kde  $g(x', y', \theta, \sigma_x, \sigma_y)$  je Gaussovo jádro:

$$g(x', y', \theta, \psi, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{x'^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y'^2}{2\sigma_y^2}\right)\right], \quad (2)$$

$e(x', \theta, \lambda, \psi)$  je komplexní sinusoida:

$$\begin{aligned} e(x', \theta, \lambda, \psi) &= \exp(2\pi i f x' + \psi) = \\ &= \exp\left[i\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \psi\right)\right] = \\ &= \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \psi\right) + i \sin\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \psi\right) \end{aligned} \quad (3)$$

a

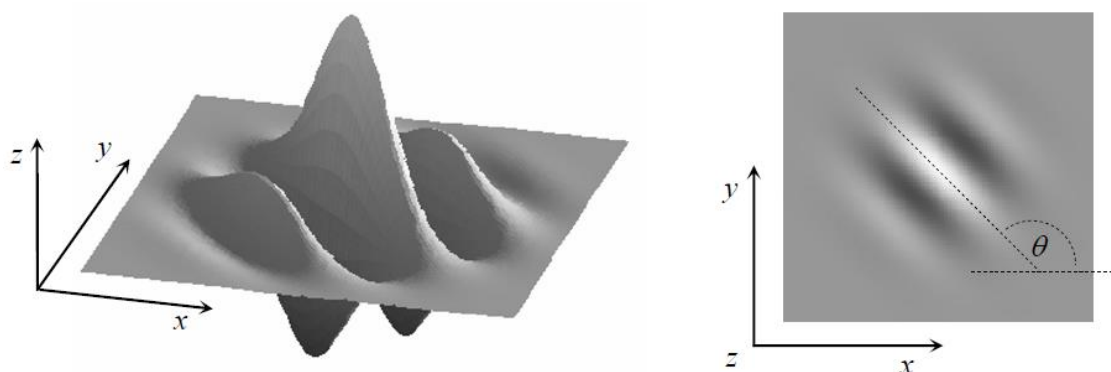
$$(x', y') = (x \cos\theta + y \sin\theta, -x \sin\theta + y \cos\theta). \quad (4)$$

Gaborův filtr lze rozložit na reálnou a imaginární složku:

$$h_{Re}(x, y, \Omega) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{x'^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y'^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \cos\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right), \quad (5)$$

$$h_{Im}(x, y, \Omega) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{x'^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y'^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \sin\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right). \quad (6)$$

Parametry  $\Omega = \{\lambda, \theta, \psi, \sigma_x, \sigma_y\}$  představují vlnovou délku  $\lambda$ , orientace šíření vlny  $\theta$ , fázový posun harmonické složky  $\psi$  a směrodatné odchylky  $\sigma_x, \sigma_y$ , které určují elipticitu Gaussova jádra. Příklad použití určitých parametrů pro jedno Gaussovo jádro je vyobrazen na *obrázku 5*. [10]



Obrázek 5: Grafická reprezentace Gaborova filtru ( $\theta=135^\circ, \sigma_x = \sigma_y=3$  [7])

Banka Gaborových filtrů je krom zvýrazňování snímků otisků prstu využívána také pro texturní analýzu a klasifikaci. Pro oba případy platí nutnost vytvoření banky filtrů s různými parametry, aby byly zachyceny veškeré atributy zvýrazňovaných či klasifikovaných textur.

Z výstupů jednotlivých Gaborových filtrů lze vypočítat reálnou  $J_{Re}$  a imaginární  $J_{Im}$  složku odezvy na filtry. Dále je pak možné získat energii  $E$  a průměrnou energii celého obrazu:

$$J_{Re}(x, y, \Omega) = I(x, y) * h_{Re}(x, y, \Omega), \quad (7)$$

$$J_{Im}(x, y, \Omega) = I(x, y) * h_{Im}(x, y, \Omega), \quad (8)$$

$$E(x, y, \Omega) = J_{Re}^2(x, y, \Omega) + J_{Im}^2(x, y, \Omega), \quad (9)$$

$$E(x, y, \Omega) = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y E(x, y, \Omega), \quad (10)$$

kde  $N$  představuje celkový počet pixelů v obraze. [10]

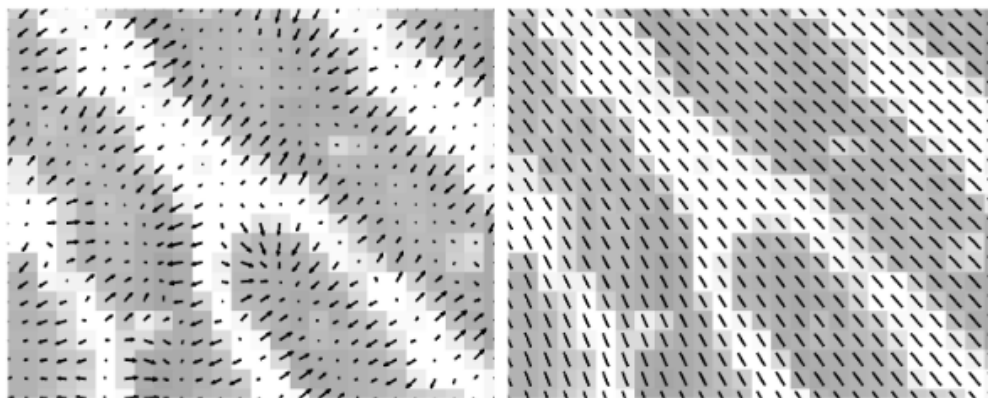
## 4.5 Lokální orientace papilárních linií

Lokální orientace papilární linie je v bodě jednoho pixelu definována jako úhel linie, jež protíná velmi malé okolí tohoto pixelu vzhledem k horizontální ose celého obrazu. Je obecně uznáváno, že papilární linie nemají směr, ale mají orientaci. Pojem orientace v oblasti zpracování snímků otisků prstu tedy představuje úhel ležící v rozmezí  $0-180^\circ$  a pojem směr pak udává úhel ležící v rozmezí  $0-360^\circ$ .

Matrice, odpovídající velikostí původnímu obrazu, jež dává specifickou transformaci údaje o lokální orientaci papilární linie je často označována jako *pole orientací*.

Nejjednodušší a nejpoužívanější způsob získání pole orientací je metoda vycházející z gradientu v obraze. Gradientní obraz je získán po 2D konvoluci obrazu s některým z operátorů, jež aproximují první derivaci. [7]

Pole orientací je ve své podstatě kolmé na gradientní obraz. Orientace jednotlivých gradientů jsou dané v měřítku jednotlivých pixelů, zatímco pole orientací otisku prstu definuje orientaci papilárních linií, jež představují daleko hrubší měřítko. Tudíž se naskýtá možnost získat pole orientací z gradientního obrazu prostou operací průměrování v určitém okolí pixelu, což je zobrazeno na *obrázku 6*, kde je vyobrazen gradient v části obrazu otisku prstu a do stejné části otisku prstu je vykresleno pole orientací získané průměrováním. [10]



Obrázek 6: Gradientní pole v části obrazu otisku prstu (vlevo) a pole orientací ve stejné části stejného obrazu otisku prstu (vpravo)[10]

Mezi hlavní metody pro výpočet obrazu orientace patří průměrování umocněných gradientů (*Averaging Squared Gradients*) a PCA (*Principal Component Analysis*). [10]

## Průměrování umocněných gradientů

Průměrování umocněných gradientů je používanější metodou ze dvou jmenovaných. Gradientní vektory nelze přímo zprůměrovat z náhodného lokálního okolí pixelu, protože protisměrné gradienty by se navzájem vyrušily, přestože indikují stejnou orientaci papilárních linií. Toto je dáno skutečností, že struktury papilárních linií zůstávají po rotaci o  $180^\circ$  nezměněny. Orientace gradientních vektorů jsou rozloženy v cyklickém prostoru, proto je nutno určit průměrnou orientaci v rozmezí od 0 do  $\pi$ . Tento proces průměrování lze proto nazvat výpočet  $\pi$ -periodického cyklického průměru. [10]

## 4.6 Lokální frekvence papilárních linií

Lokální frekvence papilárních linií je dána jako počet linií na jednotku délky hypotetického bloku původního obrazu. Tato lokální frekvence je zároveň ortogonální k lokální orientaci papilárních linií. *Pole frekvencí* je analogicky k poli orientací definován jako matice o stejných rozměrech, jako původní obraz a lokální frekvence může být také definována v diskrétní pozici stejně jako u pole orientací.

Výpočet lokální frekvence je nejčastěji implementován po rozdělení původního obrazu na stejně velké bloky, z nichž je lokální frekvence vypočtena jako vzdálenost maxim nebo minim z jasového profilu, jež je orientován kolmo na orientaci počítaného bloku. [7]

## 4.7 Detekce singulárních bodů

Důležitým krokem pro porovnání snímků otisků prstu je detekce jeho tzv. *jádra*. Jádro otisku je charakteristický singulární bod. V praxi jádro vertikálně orientovaného otisku koresponduje s nejvýše lokalizovaným útvarem, jež nejvíce koresponduje s tvarem smyčky. Pro kresby otisků, neobsahující jádro ve tvaru smyčky či spirály je obtížné jádro detekovat. V tomto případě jádro často odpovídá bodu maximálního zakřivení papilární linie. Klasifikace jádra do jedné ze skupin na *obrázku 7* může napomocť pro uspořádání rozsáhlé databáze snímků otisků prstu do menších podtříd a zároveň může být jedním z rozhodovacích pravidel při identifikaci otisku prstu.



Levá smyčka

Pravá smyčka

Spirála

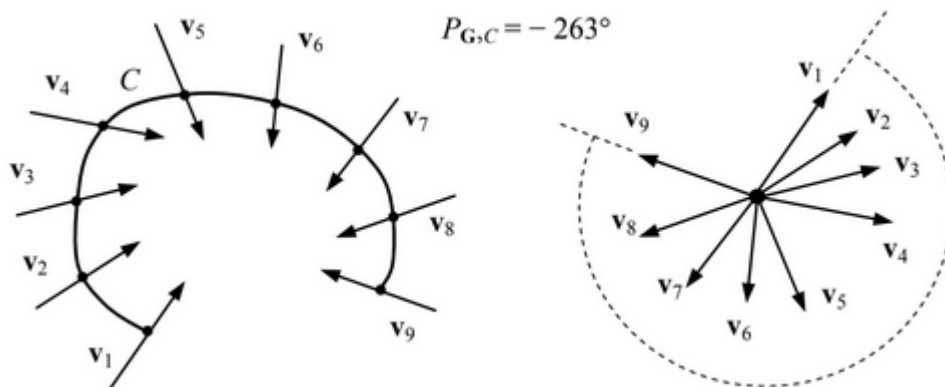
Oblouk

Klenutý oblouk

Obrázek 7: Varianty jádra otisku prstu [7]

## Detekce jádra pomocí Poincarého indexu

Metoda založená na Poincarého indexu je jedna z nejčastěji využívaných pro detekci singulárních bodů v obrazu otisku prstu. Je dáno vektorové pole  $G$ , jehož body prochází křivka  $C$ . Poincarého index  $P_{G,C}$  je pak definován jako výsledná hodnota rotace vektorů z pole  $G$  podél křivky  $C$  (obrázek 8).

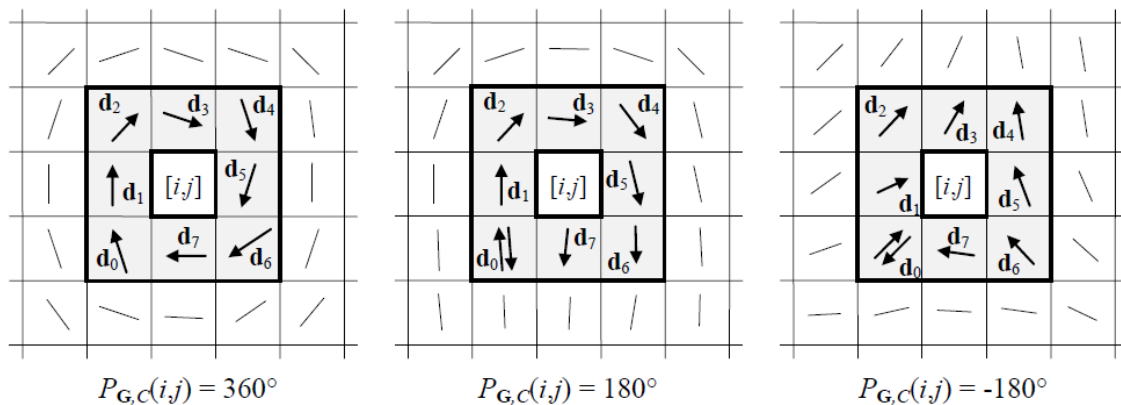


Obrázek 8: Poincarého index [7]

$G$  je tedy diskrétní vektorové pole vycházející z pole orientací papilárních linií otisku prstu  $D$  a  $i, j$  udává pozici  $\theta_{ij}$  v  $D$ . Poincarého index  $P_{G,C}$  je vypočítán následovně:

- $C$  je uzavřená křivka vedoucí po papilární linii a je definovaná jako uspořádaná sekvence elementů z otisku prstu  $D$ , v němž leží bod  $i, j$ .
- Prvek  $P_{G,C}$ , jež definuje hodnotu Poincarého indexu v daném bodě je vypočítán jako suma rozdílů orientací mezi přilehlými body křivky  $C$ . Suma rozdílů orientací vyžaduje směr každé orientace, tudíž hodnotu v rozmezí 0-360°.

Na uzavřených smyčkách, které definují hledané jádro otisku prstu, nabývá Poincarého index pouze diskrétních hodnot  $0^\circ$ ,  $\pm 180^\circ$  a  $\pm 360^\circ$ . Poincarého index pro daný pixel se nejčastěji počítá z jeho osmiokolí, jak ukazuje *obrázek 9*. [7]



Obrázek 9: Výpočet Poincarého indexu pro pixel z osmiokolí [7]

## 4.8 Detekce markantů

Markanty neboli *minutiae* jsou přítomny v každém snímku otisku prstu, představují charakteristické znaky v papilárních liniích a jsou pro každého jedince jedinečné. Přehled základních markantů je vyobrazen na *obrázku 10*. [1]



Obrázek 10: základní typy markantů [6]

Při extrakci markantů využívá většina *softwarů* pouze jednodušší markanty a to *začátek/ukončení* (*terminace*) a *vidlice* (*bifurkace*) v *obrázku 6*. Z takto detekovaných markantů je nutné eliminovat markanty falešné, které mohou vznikat přítomností jizev, a také v hraničních bodech snímků. [1]

Pro každý nalezený markant je následně definován jeho:

- Typ (terminace/bifurkace)
- Souřadnice  $x, y$
- Orientace

Dané souřadnice markantů tvoří body a jejich grafické spojení pak představuje tzv. šablonu markantů, která je dále využívána v rámci porovnávání. [1]

## 4.9 Porovnávání otisků prstu

Porovnávána je právě vytvořená šablona s databází existujících šablon. Databáze existujících šablon je tvořena dříve nasnímanými a zpracovanými obrazy daktyloskopických snímků. Porovnávány jsou všechny kombinace markantů mezi dvěma šablonami. Proces porovnávání je ukončen po dosažení prahu počtu nalezených shodných markantů nebo po vyčerpání kombinací všech markantů mezi sebou. [1]

## 4.10 Vyhodnocení podobnosti

Vyhodnocení spočívá v přiřazení *skóre podobnosti*. Skóre představuje procentuální podobnost dvou otisků a většinou se pohybuje v rozmezí od 0 do 1. Čím je výsledné skóre blíže číslu 1, tím větší je vzájemná podobnost dvou otisků. Otisky jsou vyhodnoceny jako shodné, přesahuje-li hodnota skóre předem stanovený práh. Práh lze většinou empiricky upravovat během procesu vyhodnocování podobnosti. [1]

Konkrétní metody výpočtu skóre se liší v závislosti na použité metodě porovnávání a vyhodnocení podobnosti otisků prstů.

# 5 PŘEHLED METOD IDENTIFIKACE OTISKU PRSTU

## 5.1 Metody založené na markantech

Necht'  $T$  a  $I$  představují vektory příznaků pro šablonu (*template*) a vstupní obraz (*image*) otisku. Vektor příznaků je proměnlivé délky a jeho elementy charakterizují dané markanty, přičemž každý markant může být popsán řadou vlastností. Mezi tyto vlastnosti mohou patřit hlavně souřadnice umístění markantu v obrazu otisku, jeho orientace, typ markantu (terminace, bifurkace, ...) a váha udávající relevanci, jež je daná kvalitou obrazu otisku v okolí daného markantu. Nejběžnější algoritmy založené na markantech uvažují pro popis markantu vektor o třech prvcích  $m = \{x, y, \theta\}$ , kde  $x, y$  představují souřadnice a  $\theta$  pak představuje úhel markantu:

$$T = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}, m_i = \{x_i, y_i, \theta_i\}, i = 1, 2, \dots, m$$

$$I = \{m'_1, m'_2, \dots, m'_n\}, m'_j = \{x_j, y_j, \theta_j\}, j = 1, 2, \dots, n,$$

kde  $m$  a  $n$  představují počet markantů v obrazech  $T$  a  $I$ .

Markant  $m'_j$  v  $I$  a markant  $m'_i$  v  $T$  budou vyhodnoceny jako shodné, jestliže prostorová vzdálenost  $sd$  (*spatial distance*) mezi nimi bude menší než daný práh vzdálenosti  $r_0$  a rozdíl v úhlu  $dd$  (*direction difference*) bude menší než úhlový práh  $\theta_0$ :

$$sd(m'_j, m_i) = \sqrt{(x'_j - x_i)^2 + (y'_j - y_i)^2} \leq r_0 \quad (11)$$

$$dd(m'_j, m_i) = \min(|\theta'_j - \theta_i|, 360^\circ - |\theta'_j - \theta_i|) \leq \theta_0. \quad (12)$$

V rovnici 2 je třeba brát v potaz maximální rozdíl úhlů o velikosti  $180^\circ$  (rozdíl mezi úhly  $20^\circ$  a  $340^\circ$  je pouze  $40^\circ$ ). Práhy  $r_0$  a  $\theta_0$  je nutné stanovit tak, aby jejich hodnoty zohledňovaly nevyhnutelné odchylky způsobené algoritmem při extrakci příznaků a zkreslení při snímání způsobené plasticitou prstu. [7]

Zarovnání snímků dvou otisků je tedy nutným krokem pro maximalizaci počtu markantů vyhodnocených jako shodné. Pro správné zarovnání je tedy vyžadována minimálně rotace ( $\theta$ ) a translace ( $x, y$ ) ze všech možných geometrických transformací. Další užitečnou transformací může být transformace měřítka, pokud jsou snímky otisků v různém rozlišení. [7]

Je uvažována funkce  $map()$ , která transformuje vektorové pole markantů  $m'_j$  (z  $I$ ) na pole  $m''_j$  podle daných geometrických transformací (v daném případě je uvažována rotace  $\theta$  proti směru hodinových ručiček kolem počátku (počátek jako střed nebo průměr markantů) a posunutí  $[\Delta x, \Delta y]$ ):

$$map_{\Delta x, \Delta y, \theta}(m'_j\{x'_j, y'_j, \theta'_j\}) = m''_j = \{x''_j, y''_j, \theta_j + \theta\} \quad (13)$$

Dále je uvažována funkce  $mm()$ , která dává na výstupu číslo 1, jestliže se markanty  $m_i$  a  $m''_j$  shodují dle rovnic (11) a (12):

$$mm(m''_j, m_i) = \begin{cases} 1 & sd(m'_j, m_i) \leq r_0 \text{ a } dd(m'_j, m_i) \leq \theta_0 \\ 0 & \text{jinak.} \end{cases} \quad (14)$$

Potom lze nalezení shody vyjádřit jako:

$$\underset{\Delta x, \Delta y, \theta, P}{\text{maximize}} \sum_{i=1}^m mm(map_{\Delta x, \Delta y, \theta}(m'_{P(i)}), m_i), \quad (15)$$

kde  $P()$  vyjadřuje funkci, která stanovuje páry markantů mezi obrazy  $I$  a  $T$ . Funkce  $P()$  nepáruje nutně dva shodné markanty dle rovnic (11) a (12), ale páruje nejpravděpodobněji shodné markanty vzhledem k daným transformacím zmíněným výše:

1.  $P(i) = j$ , jestliže markant  $m_i$  z obrazu  $T$  je v páru s markantem  $m'_j$  z obrazu  $I$ .
2.  $P(i) = 0$ , jestliže k markantu  $m_i$  z obrazu  $T$  neexistuje pár v obrazu  $I$ .
3.  $P(i) \neq j$  pro  $\forall i = 1 \dots m$ , jestliže k markantu  $m'_j$  z obrazu  $I$  neexistuje pár z obrazu  $T$ .
4. Jestliže  $\forall i = 1 \dots m, k = 1 \dots m, i \neq k$ , tak  $P(i) \neq P(k)$  nebo  $P(i) = P(k) = 0$ . Toto tvrzení udává skutečnost zpárování každého markantu z obrazu  $I$  s maximálně jedním markantem z obrazu  $T$ , tedy funkce  $P()$  je funkcí bijektivní. [7]

Řešení úlohy nalezení shodných markantů je triviální, jestliže je správná geometrická transformace pro vyhodnocovaný obraz  $(\Delta x, \Delta y, \theta)$  známá. V tomto případě bude správné i párování pomocí funkce  $P()$ . Jestliže ale správné zarovnání není známo předem, což představuje většinu reálných případů, je celý proces nalezení shodných otisků poněkud obtížný. Přístup *brute force* se nejeví jako ideální, vzhledem k exponenciálnímu růstu nutných operací s rostoucím počtem markantů. Je proto vhodnější použít efektivnější přístupy, např. *point pattern matching*, vícerozměrné datové

struktury jako *AVL-strom* nebo *Kd-strom* či *Houghovu transformaci*, jež pracuje krom translace a rotace i s transformací měřítka obrazů. [7]

Skóre podobnosti u metod založených na markantech je obecně dáno jako:

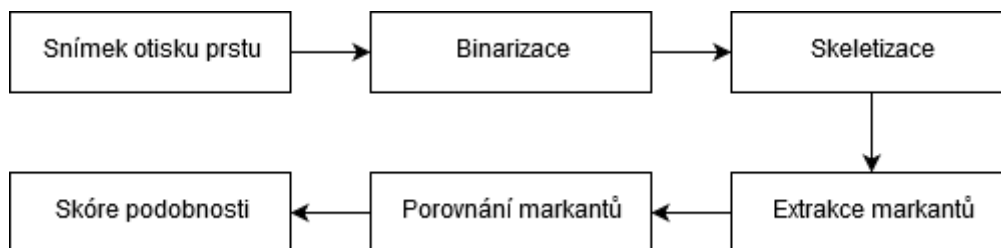
$$skóre = \frac{k}{(n + m)/2}. \quad (16)$$

Výsledné skóre je možné upravit váhováním jednotlivých markantů v závislosti na lokální kvalitě vstupního obrazu či jiných parametrech. [7]

Konkrétní realizaci identifikace založené na markantech představují metody Fingerprint Recognition Using Minutia Score Matching (FRMSM) [11] a An Efficient Fingerprint Matching Approach Based on Minutiae to Minutiae Distance Using Indexing With Effectively Lower Time Complexity.

### Porovnání otisků prstu pomocí porovnávání skóre markantů

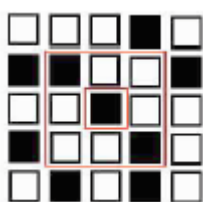
*Fingerprint Recognition Using Minutia Score Matching* [11] dále už jen *FRMSM* je metoda porovnání a vyhodnocení podobnosti otisků prstů založená na markantech. Porovnávají se markanty typu *terminace* (ukončení papilární linie) a *bifurkace* (rozdvojení papilární linie).



Obrázek 11: blokové schéma metody FRMSM

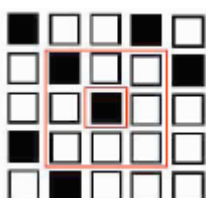
Proces binarizace a skeletonizace odpovídá zásadám obecného předzpracování snímků otisků prstu uvedeného výše v textu. Binarizace je provedena metodou prahování a proces skeletonizace nemění pozici markantů oproti původnímu obrazu.

Při extrakci markantů jsou pozice a úhly markantů (*koncový úhel* – úhel mezi horizontální linií obrazu a směrem papilární linie, *bifurkační úhel* – úhel mezi horizontální linií obrazu a směrem *bifurkace*) zapsány jako skóre. *Terminace* ležící na hranách snímku nejsou brány v potaz. Je stanoveno skóre *Crossing Number* pro nalezení pozice markantu v obrazu. To je definováno jako polovina sumy rozdílu mezi hodnotami intenzity dvou sousedních pixelů. Přiřazení *Crossing Number* je uvedeno na obrázku 12.



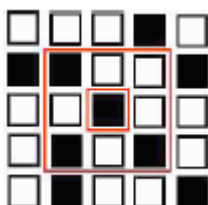
**Crossing Number = 2.**

**Pixel papilární linie.**



**Crossing Number = 1.**

**Markant *terminace*.**



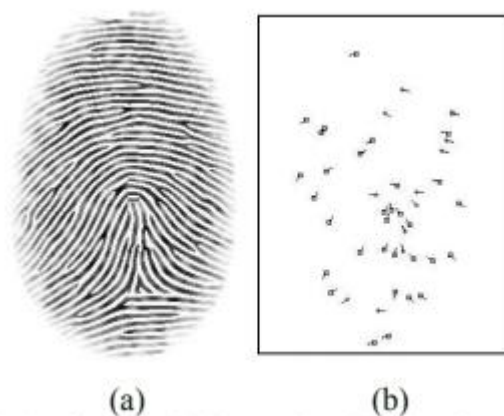
**Crossing Number = 3.**

**Markant *bifurkace*.**

Obrázek 12: Přiřazení markantu podle Crossing Number, převzato z [11]

K vypočtení úhlu *bifurkace* je využito faktu, že *terminace* a *bifurkace* se běžně vyskytují duálně. *Terminace* ve snímku koresponduje s *bifurkací* v negativu snímku. Tudíž aplikací stejných pravidel na negativ snímku jsou získány úhly *bifurkací*.

Obrázek 13 zobrazuje originální otisk v šedo tónu a následně extrahované markanty na pozicích odpovídajících originálu. Tvar čtverce odpovídá pozici markantu *terminace* a tvar diamantu odpovídá markantu *bifurkace* – obrázek 13 (b).



Obrázek 13: (a) šedo tónový obraz otisku (b) extrahované markanty [8]

Pro porovnání vstupního snímku otisku s šablonou jsou charakteristiky markantů uchovávány v maticích, kde počet řádků je dán počtem markantů a počet sloupců je vždy 4. První sloupec udává index řádku každého markantu, druhý sloupec udává index

sloupce každého markantu, třetí sloupec udává orientaci (úhel) každého markantu a čtvrtý sloupec udává typ markantu (daného číslem *Crossing Number*).

Během procesu porovnávání je každý markant vstupního obrazu porovnáván s markantem v šabloně. V každém kroku je markant ze vstupního obrazu a z šablony vybrán jako referenční bod pro daný data set. Referenční bod je použit pro převod zbývajících bodů do polárního systému souřadnic. Následující rovnice vyjadřuje převod markantu šablony ze sloupcových a řádkových indexů na polární souřadnice vzhledem k vybranému referenčnímu bodu:

$$\begin{pmatrix} r_k^T \\ \phi_k^T \\ \theta_m^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(row_k^T - row_{ref}^T)^2 + (col_k^T - col_{ref}^T)^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{row_k^T - row_{ref}^T}{col_k^T - col_{ref}^T}\right) \\ \theta_k^T - \theta_{ref}^T \end{pmatrix}, \quad (17)$$

kde pro šablonu obrazu,  $r_k^T$  = radiální vzdálenosti k-tého markantu,  $\phi_k^T$  = radiálnímu úhlu k-tého markantu a  $\theta_m^T$  = úhlu orientace k-tého markantu. Zkratky *row* a *col* udávají řádkový a sloupcový index referenčního bodu, jež je aktuálně počítán.

Podobně je dána rovnice pro převedení matice bodů vstupního obrazu na polární souřadnice v rovnici (18).

$$\begin{pmatrix} r_k^I \\ \phi_k^I \\ \theta_m^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(row_m^I - row_{ref}^I)^2 + (col_m^I - col_{ref}^I)^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{row_m^I - row_{ref}^I}{col_m^I - col_{ref}^I}\right) + rotatevalues(k, m) \\ \theta_m^I - \theta_{ref}^I \end{pmatrix} \quad (18)$$

*Rotatevalues(k,m)* představuje rozdíl natočení šablony *Tk* a vstupního obrazu *Im*. Indexy *Tk* a *Im* představují extrahovaná data ze všech sloupců řádku *k* a řádku *m* v šabloně respektive vstupním obraze.

Porovnáváním matice markantů vstupního snímku otisku prstu a matice markantů šablony je vypočteno skóre podobnosti. Pokud je skóre podobnosti 1, otisk je vyhodnocen jako souhlasný s danou šablonou a je tedy identifikován. Pokud je skóre podobnosti 0, otisk je vyhodnocen jako neshodný. [11]

## 5.2 Metody založené na korelaci

Podobně jako u metody založené na markantech je dán obraz  $T$  jako šablona otisku prstu (*template*) a obraz  $I$  jako vstupní obraz otisku prstu (*image*). Pro vyčíslení míry rozdílnosti mezi těmito dvěma obrazy lze využít součtu kvadrátů odchylek (*sum of squared differences – SSD*) mezi jasovými hodnotami odpovídajících pixelů:

$$SSD(T, I) = \|T - I\|^2 = (T - I)^T (T - I) = \|T\|^2 + \|I\|^2 - 2T^T I, \quad (19)$$

kde horní index  $T$  představuje transpozici vektoru. Jestliže jsou umocněné normy vektorů konstantní, rozdílnost dvou obrazů je minimalizována a cross-korelace (*cross-correlation – CC*) obrazů  $T$  a  $I$  je maximalizována:

$$CC(T, I) = T^T I. \quad (20)$$

Srovnáním rovnic (19) a (20) lze pozorovat obsažení *cross-korelace* (dále jen *korelace*) v rovnici (19), tudíž korelace udává míru podobnosti obrazů. Kvůli nevyhnutelnému posunutí a rotaci při snímání otisků prstu, nelze jednoduše vypočítat podobnost pomocí rovnice (20).

Rozšířením  $I$  na  $I^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}$  je vyjádřen posun (vektory  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) a rotace (úhlem  $\theta$ ) okolo počátku (většinou střed obrazu) a podobnost mezi dvěma otisky lze tedy vyjádřit jako:

$$S(T, I) = \max_{\Delta x, \Delta y, \theta} CC(T, I^{\Delta x, \Delta y, \theta}). \quad (21)$$

Rovnice (21) vyjadřuje hledání maximální hodnoty korelace pomocí optimalizace parametrů transformací ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\theta$ ) vstupního obrazu  $I$ . V rámci optimalizace jsou dosazovány hodnoty těchto parametrů, nejčastěji ve stanoveném rozsahu. Hledaná maximální hodnota korelace vyjadřuje maximální míru podobnosti mezi obrazy  $T$  a  $I$ .

Přímá aplikace rovnice (21) jen v málo případech vede k přijatelným výsledkům, hlavně vzhledem k problémům vyčteným níže:

- Nelineární zkreslení může způsobit rozdíly v globální struktuře dvou naprosto identických otisků prstu. Tedy pokud je uvažován obraz jako celek, nikoliv lokální místa a charakteristiky v otisku.



Obrázek 14: identické otisky, různý tvar otisku [7]

Stav pokožky a tlak prstu na senzor při snímání může značně ovlivnit jasové hodnoty, kontrast a tloušťku papilárních linií v obrazu otisku prstu.



Obrázek 15: identické otisky, různý tlak prstu na senzor [7]

Přímý výpočet korelace je velmi výpočetně náročný. V případě porovnávání dvou obrazů o velikosti 400x400 pixelů by výpočet korelace pro jednu hodnotu transformace ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\theta$ ) představoval 160000 operací násobení a 160000 operací sčítání. Při posunu v obou souřadnicích s krokem jeden pixel v rozmezí 400 pixelů a rotaci s krokem  $1^\circ$  v rozmezí  $60^\circ$  by bylo nutné spočítat 400x400x60 korelací, což představuje zhruba 1500 miliard výpočetních operací. [7]

### 5.3 Metody založené na geometrických vlastnostech papilárních linií

Důvody pro návrhy algoritmů pro identifikaci otisků prstu pomocí jiných vlastností papilárních linií, než jsou markanty, mohou být:

- Doplnkové vlastnosti mohou být použity ve spojení s markanty pro zvýšení přesnosti a robustnosti algoritmu. Značné množství algoritmů založených na jiných vlastnostech využívá markanty pro před zarovnání obrazů.
- Spolehlivá extrakce markantů z obrazu otisku o velmi špatné kvalitě je poměrně náročná. I s ohledem na skutečnost, že markanty nesou velké množství informací o daném otisku, pro snímky ve špatné kvalitě nepřináší jejich použití pro vyhodnocení ideální poměr mezi přesností a robustností.
- Jestliže je oblast otisku snímaného senzorem velmi malá, může obsahovat jen velmi malé množství markantů, což není dostatečné pro vyhodnocení podobnosti. V tomto případě je vhodné využít metodu založenou na jiných vlastnostech papilárních linií v otisku prstu.

Mezi vhodné vlastnosti pro vyhodnocení podobnosti mohou patřit:

1. Velikost otisku a tvar vnější kontury.
2. Pozice, počet a typ singulárních bodů.
3. Informace o globální a lokální struktuře.
4. Geometrické vlastnosti a prostorové uspořádání papilárních linií.
5. Příznaky třetího stupně – potní póry.
6. Další vlastnosti: fraktální tvary, tvary vycházející z jednorozměrných projekcí dvourozměrných snímků otisků.

Globální příznaky (1. a 3.) ve většině případů nepřispívají ke správnému vyhodnocení shody mezi dvěma otisky. Lokální příznaky dosahují značně lepších výsledků. [7]

Příkladem úspěšné realizace metody je *Filterbank-Based Fingerprint Matching (FBFM)* [12].

## **Porovnání otisků prstu pomocí banky filtrů FBFM**

Tato metoda poukazuje na nedostatečnost porovnávání založeném jen a pouze na extrakci markantů daktyloskopických otisků. Jak již bylo zmíněno, lokální struktura papilárních linií nemusí být markanty plně reprezentována. Porovnání pomocí banky filtrů kombinuje lokální a globální příznaky v otisku prstu v podobě vektoru s pevnou délkou daný jako

*FingerCode*. Metoda pracuje s Euklidovskou vzdáleností, která je vypočtena pro *FingerCode* obou porovnávaných otisků.

Hlavní kroky extrakce příznaků pro vektor *FingerCode* pomocí filtrace:

1. Definice referenčního bodu a oblasti zájmu pro snímek otisku prstu.
2. Rozdělení oblasti zájmu v okolí referenčního bodu.
3. Filtrace oblasti zájmu v osmi různých směrech za použití banky *Gaborových filtrů*.
4. Výpočet průměrné absolutní odchylky z průměru jasových hodnot v oblastech filtrovaných obrazů a získání tak vektoru příznaků *FingerCode*.



Obrázek 16: Rozdělená oblast zájmu snímku otisku prstu ( $x$  – referenční bod) [12]

Výsledkem testování algoritmu bylo stanovení optimálního rozdělení oblasti zájmu na 80 buněk s 5 pásmy a 16 výsečemi (na obrázku 16).

Následné přefiltrování oblastí bankou osmi Gaborových filtrů vede k získání výsledného vektoru *FingerCode* jednoho otisku, jež má pevnou velikost 640 prvků ( $8 * 80 = 640$ ). Prvek vektoru  $V_{ij}$  je dán vzorcem:

$$V_{ij} = \frac{1}{n_i} \left( \sum_{c_i} |g(x, y) - \bar{g}_i| \right), \quad (22)$$

kde  $i$  je index buňky mozaiky ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ),  $j$  je index filtru ( $j = 1, 2, \dots, 8$ ),  $C_i$  je  $i$ -tá buňka mozaiky,  $n_i$  udává  $i$ -tý pixel v buňce,  $g(x, y)$  představuje Gaborův filtr a  $\bar{g}_i$  dává průměr pro všechny pixely v buňce.

Výsledná podobnost je vyčíslena jako Euklidovská vzdálenost mezi vektory *FingerCode* dvou otisků. [12]

## 6 NAVRŽENÝ ALGORITMUS

Pro účely testování předzpracování snímků otisků prstu byla použita převážně databáze *LivDet*. [13]

Databáze použitá pro testování samotného algoritmu rozpoznávání podobnosti otisků prstu a dodatečnou optimalizaci předzpracování snímků je sestavena ze tří veřejných databází *DB\_1*, *DB\_2* a *DB\_3* z roku 2000 pro mezinárodní soutěž v navržení vhodného algoritmu pro zvýraznění a porovnání podobnosti otisků prstu FVC (*Fingerprint Verification Competition*). [14]

### 6.1 Předzpracování

#### Segmentace

Prvním krokem předzpracování snímku otisku prstu v navrženém algoritmu je proces segmentace oblasti zájmu od informačně nezajímavého pozadí. Segmentace je zde realizována pomocí principu strukturní analýzy. Originální obraz je transformován na parametrický obraz o stejné velikosti, jako originál.

Při procesu transformace je vybírána submatice o velikosti 9x9 pixelů, z níž je vypočítán parametr rozsahu pomocí nelineárního rozsahového filtru, jež realizuje nalezení lokálního rozdílu mezi maximem a minimem v submatici.

Tento parametrický obraz je filtrován 2D mediánovým filtrem s je stanoven jeho práh *Otsu* metodou a obraz je následně binarizován. Je tedy vytvořena binární maska, která je následně využívána napříč celým algoritmem pro segmentaci. Ukázkou původního obrazu a jeho binární masky zobrazuje *obrázek 17*.



Obrázek 17: Originální obraz (vlevo) a jeho binární maska (vpravo)

## Normalizace

Segmentovaný obraz je transformován na negativ, pro převedení jasových hodnot papilárních linií na vysoké jasové hodnoty oproti pozadí otisku. Jak je vidět na *obrázku 17* v původním obraze jsou papilární linie reprezentovány nízkými jasovými hodnotami. Obraz je normalizován na obraz s nulovou střední hodnotou a jednotnou směrodatnou odchylkou a jasové hodnoty jsou transformovány do rozmezí 0-1. Normalizovaný obraz je pak prvek po prvku násoben maskou pro jeho segmentaci. Výstup normalizace a segmentace zobrazuje *obrázek 18*.



Obrázek 18: Výstup segmentace a normalizace otisku

## Stanovení lokální orientace papilárních linií

Pro efektivní zvýraznění papilárních linií použitím Gaborovy filtrace je třeba získat tzv. pole orientací, jež reprezentuje lokální orientace papilárních linií v obraze otisku prstu. Pro tento účel byla využita metoda průměrování umocněného gradientu (*Averaging Squared Gradients*) [10].

Kroky vytvoření pole orientací:

1. Vyhlazení normalizovaného obrazu Gaussovým filtrem.
2. Konvolucí vyhlazeného obrazu se Sobelovými operátory – rovnice (23), jež aproximují první derivaci, jsou získány gradienty ve směru osy x a ve směru osy y ( $G_x$ ,  $G_y$ ).

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

3. Podle rovnice (24), (25) a (26) jsou gradienty umocněny a znovu vyhlazeny Gaussovým filtrem.

$$G_{xx} = \sum_w G_x^2 \quad (24)$$

$$G_{yy} = \sum_w G_y^2 \quad (25)$$

$$G_{xy} = \sum_w G_x G_y \quad (26)$$

4. Umocněné gradienty jsou průměrovány v posuvném okně  $W$  ( $2 \times 2$ ) dle rovnice (27).

$$\begin{bmatrix} \overline{G_{s,x}} \\ \overline{G_{s,y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_w G_{s,x} \\ \sum_w G_{s,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_w G_x^2 - G_y^2 \\ \sum_w 2G_x G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} - G_{yy} \\ 2G_{xy} \end{bmatrix} \quad (27)$$

5. Průměr směru gradientu  $\Phi$  v rozmezí  $-\pi/2 < \Phi \leq \pi/2$  je dán rovnicí (28), kde parametr  $\angle$  je dán rovnicí (29).

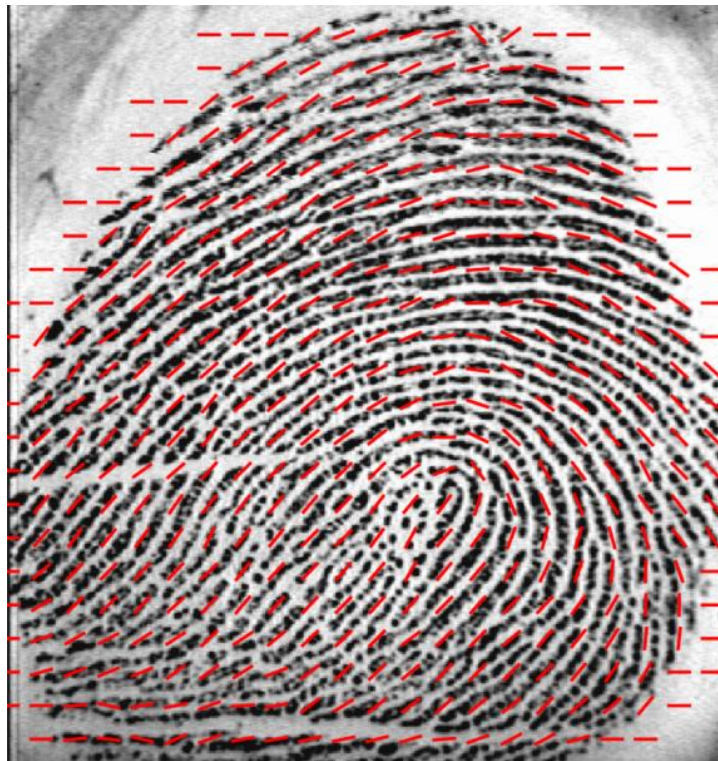
$$\Phi = \frac{1}{2} \angle(G_{xx} - G_{yy}, 2G_{xy}) \quad (28)$$

$$\angle(x, y) = \begin{cases} \tan^{-1}(y/x) & x \geq 0 \\ \tan^{-1}(y/x) + \pi & \text{for } x < 0 \wedge y \geq 0 \\ \tan^{-1}(y/x) - \pi & x < 0 \wedge y < 0 \end{cases} \quad (29)$$

6. Výsledná orientace  $\theta$  leží v rozmezí  $-\pi/2 < \theta \leq \pi/2$  a podle rovnice (30) je kolmá na směr gradientu  $\Phi$ . [10]

$$\theta = \begin{cases} \Phi + \frac{1}{2}\pi & \text{for } \Phi \leq 0 \\ \Phi - \frac{1}{2}\pi & \Phi > 0 \end{cases} \quad (30)$$

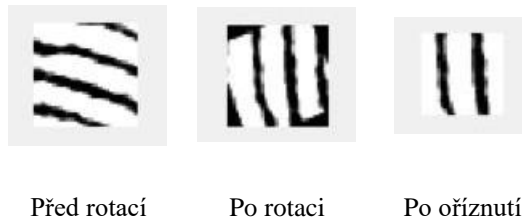
Výsledné pole orientací je zobrazeno na *obrázku 19*. Směr orientace je vykreslen přes vstupní obraz.



*Obrázek 19: Pole orientací*

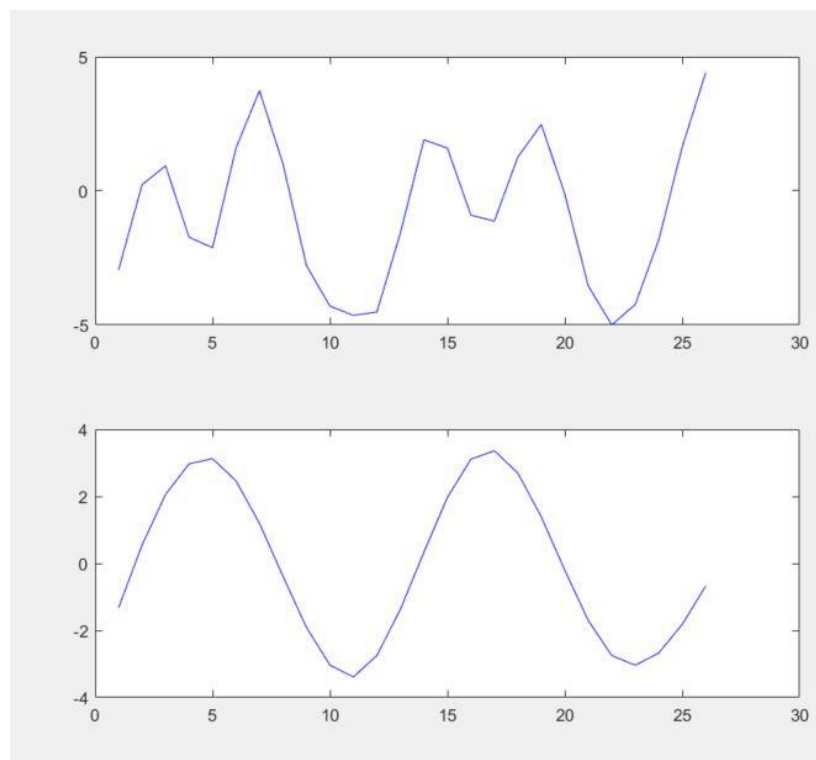
### **Stanovení lokální frekvence papilárních linií**

Dalším předkrokem pro Gaborovu filtraci je stanovení parametrického pole nesoucí informaci o lokální frekvenci papilárních linií. Normalizovaný obraz je rozdělen do bloků  $(39 \times 39)$  a každý blok je rotován o průměr z pole orientací v daném okně. Po rotaci je provedeno oříznutí bloku (*obrázek 20*). [15]



Obrázek 20: Blok normalizovaného obrazu před, po rotaci a po oříznutí

Z oříznutého bloku je vypočítána suma projekce (suma každého sloupce), namísto jasového profilu procházejícího středem bloku. Výsledkem je mírná korekce přítomnosti případných markantů. Suma projekce každého bloku je transformována vlnkovou transformací se stupněm rozkladu 2 a *Haarovou* mateřskou vlnkou. Pro další zpracování je vybrán zbytek po rozkladu a pro tuto transformovanou sumu projekce jsou nalezeny pozice píků. Původní a transformovaná suma projekce je zobrazena na obrázku 21. [15]



Obrázek 21: Původní (nahore) a transformovaná (dole) suma projekce

Podle rovnice (31) je vypočtena průměrná délka vlny v bloku a rovnice (32) pak dává přepočítání na frekvenci bloku.

$$\bar{d} = \frac{pos_{end} - pos_{start}}{L(pos)} \quad (31)$$

$$f = \frac{1}{\bar{d}} \quad (32)$$

Proměnná  $pos$  představuje vektor pozic piků,  $f$  představuje hodnotu lokální frekvence a  $L$  je operátor udávající délku vektoru pozic. Nulovým hodnotám frekvencí uvnitř otisku (dle masky segmentace) je přiřazena hodnota mediánu vypočtena z unikátních frekvencí v parametrickém poli lokálních frekvencí. [15]

## Gaborova filtrace

Gaborova filtrace zajišťuje zvýraznění papilárních linií vůči pozadí s nulovou informační hodnotou. Z pole orientací a parametrického pole lokální frekvence z předchozích kroků je vytvořena banka Gaborových filtrů a obraz je po částech filtrován Gaborovými filtry s příslušnými parametry. Gaborův filtr je definován rovnicemi (33), (33) a (35).  $\theta$  v rovnicích představuje orientaci Gaborova filtru,  $f$  frekvenci vlny cosinus,  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$  představují směrodatné odchylky podél os  $x$  a  $y$  (elipticita Gaborova filtru) a  $x_\theta$  a  $y_\theta$  definují osy  $x$  a  $y$  pro souřadný systém filtru. [16] [17]

$$G(x, y; \theta, f) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \cos(2\pi f x_\theta) \quad (33)$$

$$x_\theta = x \cos\theta + y \sin\theta \quad (34)$$

$$y_\theta = -x \sin\theta + y \cos\theta \quad (35)$$

$$E(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_x}{2}}^{\frac{w_x}{2}} \sum_{v=-\frac{w_y}{2}}^{\frac{w_y}{2}} G(u, v; O(i, j), F(i, j)) N(i - u, j - v) \quad (36)$$

Odezva Gaborova filtru  $G$  je vypočtena 2D konvolucí a finální zvýrazněný obraz  $E$  je získán podle rovnice (36), kde jsou vstupními parametry prvky pole orientací  $O(i, j)$  a prvky parametrického pole lokálních frekvencí  $F(i, j)$ . [16] [17]

Obraz po Gaborově filtraci je zobrazen na *obrázku 22*. Vůči vstupnímu normalizovanému obrazu na *obrázku 18* je značné zvýraznění a vyhlazení papilárních linií.



Obrázek 22: Obraz filtrovaný bankou Gaborových filtrů.

### **Binarizace a skeletonizace**

Výstup z Gaborovy filtrace je binarizován převedením jasových hodnot větších než práh na hodnotu jedna. Práh je stanoven *Otsu* metodou. Dále jsou z binárního obrazu odstraněny binární objekty menší, než 200 pixelů. Posledním krokem předzpracování je skeletonizace binárního obrazu a tím zúžení papilárních linií na velikost 1 pixel. Výstup předzpracování je zobrazen na *obrázku 23*.



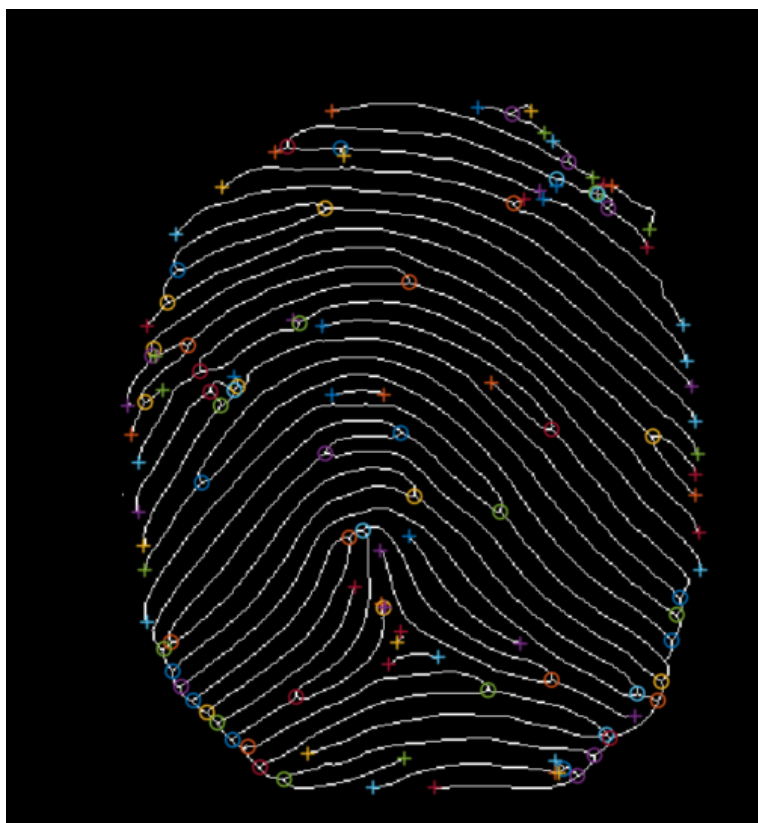
Obrázek 23: Finální předzpracovaný obraz po skeletonizaci.

## 6.2 Nalezení a extrakce markantů

Markanty v otisku prstu představují charakteristická zakončení nebo rozdělení papilární linie. V rámci extrakce markantů jsou zvoleny pouze dva nejběžnější typy markantů a to jsou *terminace* (ukončení) a *bifurkace* (rozvětvení). Tyto dva typy zakončení papilárních linií jsou ve skeletonizovaném obraze detekovány čtveřicí rotovaných binárních masek. Dvě masky jsou rotovány o 45°, 1 maska o 90° a 1 o 180° pro pokrytí všech možných směrů markantů v obraze. Masky představují posuvné okno, které prochází celým obrazem. V místě výskytu markantu je do parametrického pole na místo středového prvku matice nul o stejné velikosti jako maska markantu vložena jednička. Použité masky jsou popsány rovnicí (37).

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (37)$$

Pro odstranění falešných markantů na okrajích otisku je erodována původní maska pro segmentaci otisku a touto erodovanou maskou je vynásobeno pole markantů. Detekované markanty před násobením erodovanou maskou zobrazuje *obrázek 24*. Znak kružnice značí *bifurkaci* a znak plus značí *terminaci*.



Obrázek 24: Zobrazení markantů.

### 6.3 Nalezení a extrakce jádra

Každý otisk prstu obsahuje minimálně jeden významný singulární bod neboli jádro otisku. Nejčastějšími druhy jádra jsou pak smyčka, spirála a delta. Pro detekci jádra byl použit výpočet Poincarého indexu, jež vychází ze spojitě křivky spojující osmiokolí středového pixelu. [18] Poincarého index roven hodnotě 0.5 značí přítomnost jádra ve tvaru smyčky či spirály, index roven hodnotě -0.5 udává přítomnost delty. [19]

Kroky nalezení a extrakce jádra otisku:

1. Vyhlazení pole orientací Gaussovým filtrem (s parametrem sigma = 50).
2. Výpočet Poincarého indexu v osmiokolí pixelu podle rovnic (38), (39) a (40).  $P(x,y)$  představuje hodnotu Poincarého indexu v pixelu  $(x,y)$ ,  $\theta(x,y)$  je orientace v pixelu  $(x,y)$ , Poincarého křivka spojuje  $N$  pixelů ( $N = 8$ ). [19]

$$P(x, y) = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta(k) \quad (38)$$

$$\Delta(k) = \begin{cases} \delta(k) & |\delta(k)| < \frac{\pi}{2} \\ \delta(k) + \pi & \delta(k) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \pi - \delta(k) & \delta(k) \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (39)$$

$$\delta(k) = \theta(x_{k+1}, y_{k+1}) - \theta(x_k, y_k) \quad (40)$$

3. Jelikož se v parametrickém poli často nachází více hodnot odpovídajících výskytu jádra, jejich polohy jsou zprůměrovány (*obrázek 25*). [19]
4. Pokud je vyhodnocena přítomnost smyčky i delty, je vybráno jádro, které je blíže průměru poloh markantů. Pokud není nalezeno žádné jádro, je poloha jádra přiřazena průměrná hodnota poloh markantů.

*Obrázek 26* ukazuje polohu jádra na skeletonizovaném obrazu otisku prstu a polohy markantů bez falešných markantů na okrajích otisku prstu. Znak kružnice značí *bifurkaci*, znak plus značí *terminaci* a znak hvězdičky značí jádro.



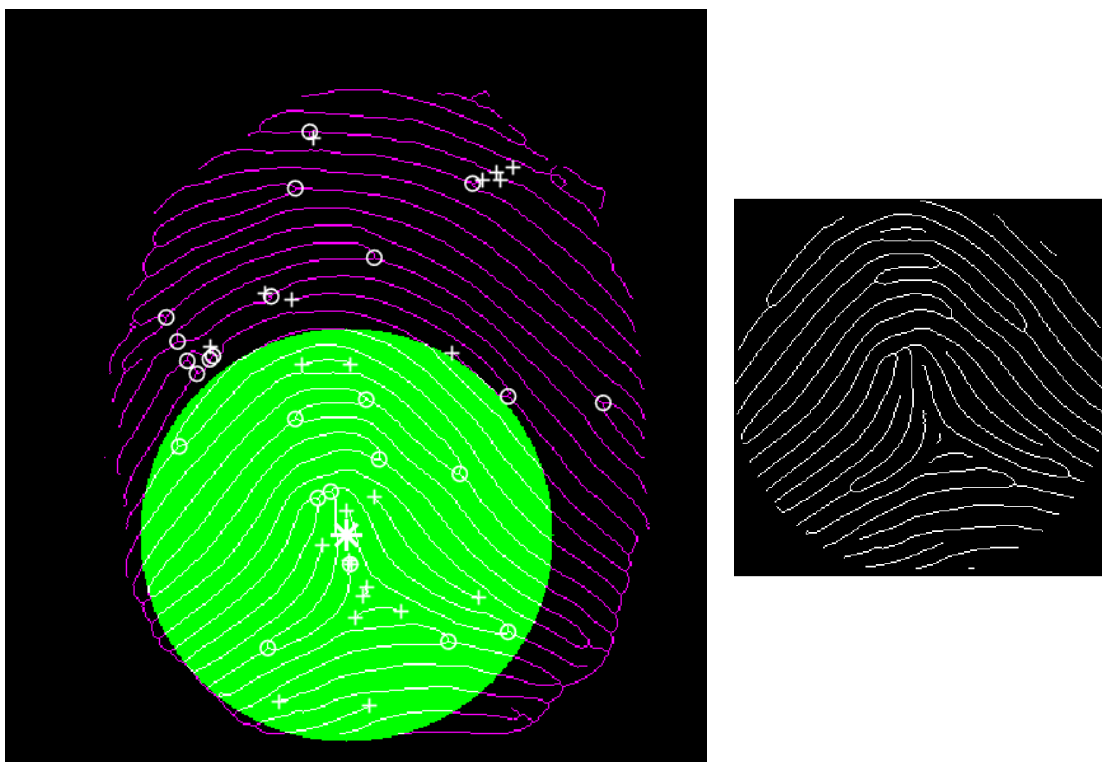
Obrázek 25: Polohy jádra podle Poincarého indexu



Obrázek 26: Výsledné extrahované markanty a jádro.

## 6.4 Vyčíslení podobnosti

Pro částečnou normalizaci vzdáleností je ze skeletonizovaného obrazu otisku vyříznut kruh o poloměru rovném menšímu z rozměrů původního obrazu, jež byl vynásoben hodnotou  $2/7$ . Zároveň je takto oříznuto parametrické pole, kde v matici nul číslo 1 představuje přítomnost markantu *terminace*, číslo 2 značí markant *bifurkace* a číslo 3 označuje polohu jádra. Vyříznutá část je znázorněna na *obrázku 27*. Výřez z obrazu skeletonizace a korespondující výřez parametrického pole s příznaky jsou výsledky celého předzpracování a tyto dvě entity jsou v rámci práce s GUI jedinými ukládanými hodnotami načtených a předzpracovaných snímků pro porovnávání a identifikaci. 2 otisky jsou tedy mezi sebou porovnávány jen na základě údajů uchovaných v těchto dvou entitách. Během celého procesu vyčíslení podobnosti je porovnáván jeden rozpoznávaný otisk postupně se všemi autorizovanými otisky z předem načtené a předzpracované knihovny. Dále v textu je tedy aktuální referenční otisk z autorizované knihovny označován jako otisk *R* a aktuálně porovnávaný otisk je označován jako otisk *A*.



Obrázek 27: Výřez skeletonizovaného obrazu

Prvním krokem pro vyčíslení podobnosti je proces registrace dvou výřezů skeletonizovaného obrazu a výpočet rigidní transformační matice, z níž je extrahován úhel vzájemné rotace těchto dvou obrazů. Transformovaný je při registraci obraz skeletu otisku *A* a neměnný je otisk *R*. O úhel získaný registrací skeletů je následně rotováno i

pole příznaků otisku  $A$ . Obě porovnávaná pole jsou rozdělena na 4 kvadranty s osovým křížem procházejícím středem vyříznutého kruhu, tedy jádrem. Pro oba druhy markantů, tedy pro *terminaci* i *bifurkaci*, je vytvořen vektor pozic a v rámci jednoho kvadrantu je vypočtena euklidovská vzdálenost mezi *terminacemi* otisku  $R$  se všemi *terminacemi* otisku  $A$ . Stejně tak pro všechny *bifurkace*. Je tedy celkově vytvořeno 8 vektorů vzdáleností. Každý vektor vzdáleností je seřazen od nejnižší hodnoty po hodnotu nejvyšší. V případě stejného počtu daného typu markantu v otisku  $R$  i  $A$  v jednom kvadrantu je z příslušného vektoru seřazených vzdáleností pro danou kombinaci vybráno prvních  $N$  hodnot, přičemž  $N$  se rovná souhlasnému počtu daného typu markantu v daném kvadrantu. Těchto  $N$  hodnot z vektoru vzdáleností je zprůměrováno a tento průměr dává výslednou euklidovskou vzdálenost pro typ markantu v kvadrantu. V případě rozdílného počtu markantů daného typu pro otisk  $R$  a  $A$  v kvadrantu je počet vybraných  $N$  hodnot z vektoru vzdáleností roven nižšímu počtu markantů z  $R$  a  $A$  a výsledný průměr vzdáleností je navíc penalizován poměrem počtu markantů z  $R$  a  $A$ .

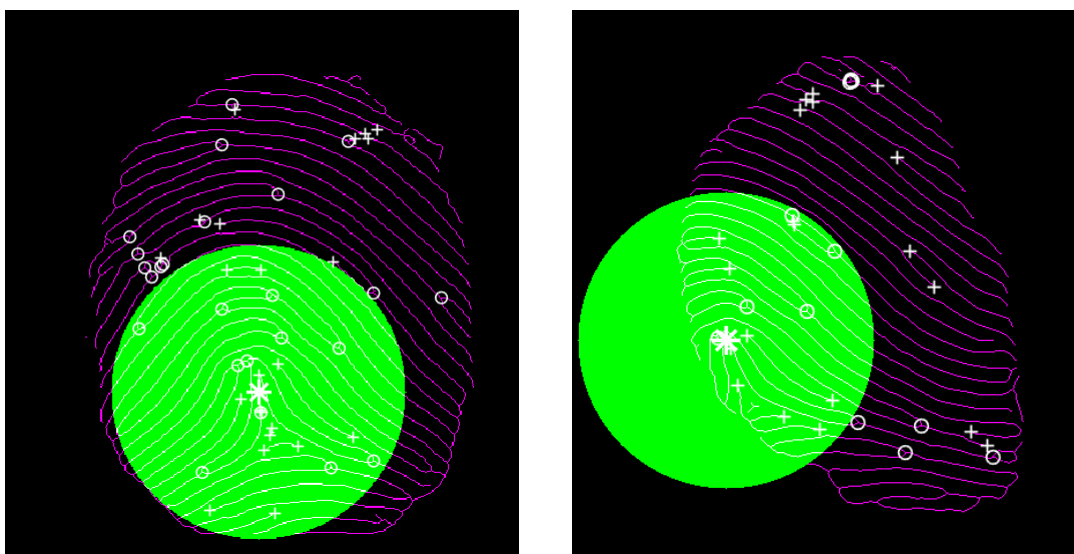
Z osmi průměrných hodnot euklidovských vzdáleností, kdy tedy jedna tato hodnota odpovídá danému typu markantu v daném kvadrantu, je vypočtena podobnost podle rovnice (41), kde  $P$  je podobnost daného markantu  $m$  v kvadrantu  $i$ ,  $\emptyset$  je operátor průměrování,  $r_R, r_A$  jsou poloměry výřezu kružnice otisku  $R$  a  $A$  (většinou stejné) a  $\overline{E_{m,i}}$  je průměrná euklidovská vzdálenost typu markantu  $m$  v kvadrantu  $i$ .

$$P_{m,i} = \frac{\overline{E_{m,i}}}{\emptyset(r_R, r_A) \cdot 1.5} \quad (41)$$

Je získáno 8 hodnot podobnosti, z nichž je vyčíslena finální podobnost  $P$  otisků  $R$  a  $A$  podle rovnice (42), kde operátor  $L$  udává délku vektoru. Znak  $b$  značí bifurkaci a  $t$  terminaci.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^4 P_{b,i} + \sum_{i=1}^4 P_{t,i}}{L[P_{b,1}, P_{b,2}, P_{b,3}, P_{b,4}, P_{t,5}, P_{t,6}, P_{t,7}, P_{t,8}]} \quad (42)$$

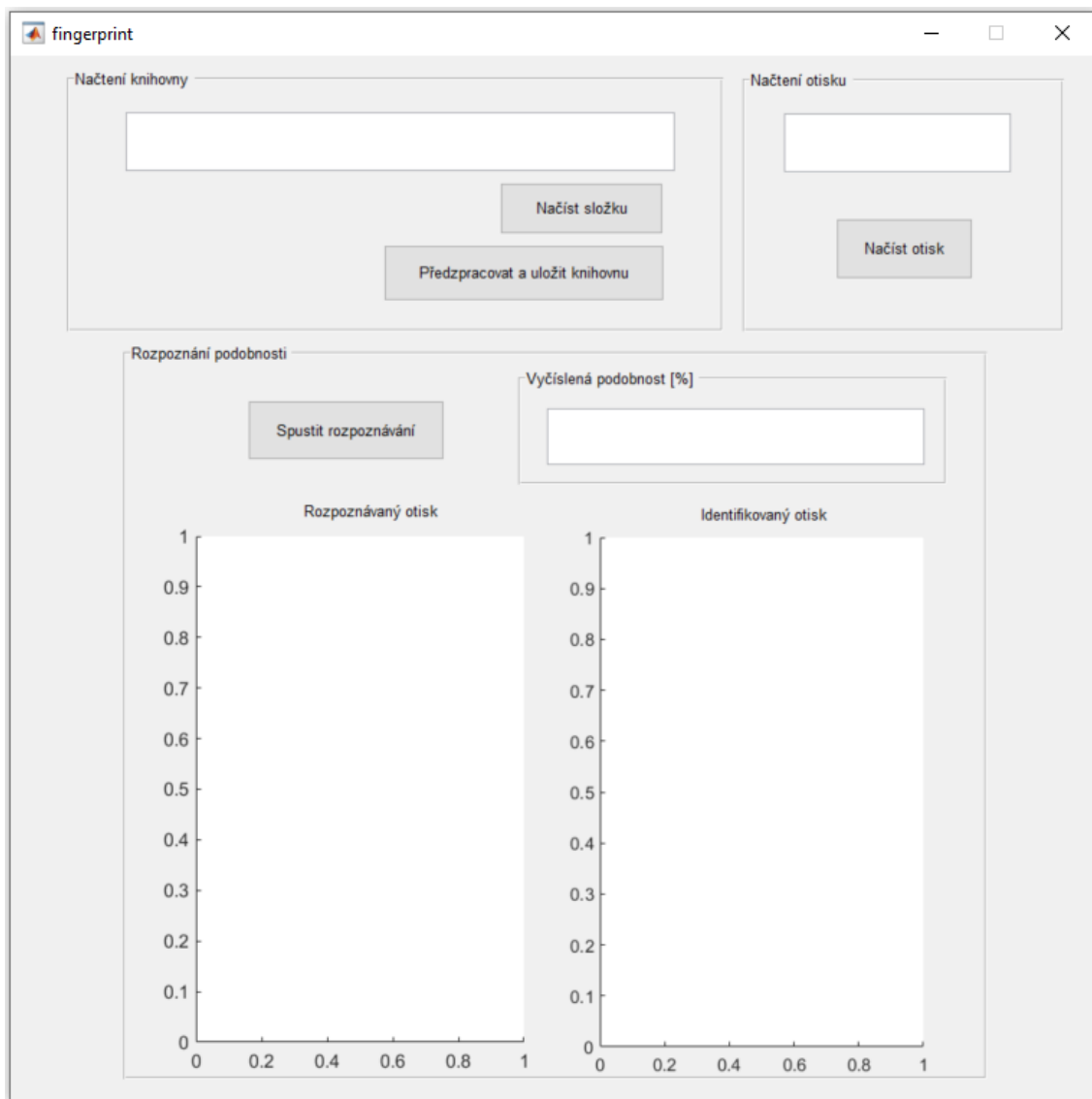
V případě, že v daném kvadrantu je pro jeden z otisků žádný nebo jeden markant, je  $\overline{E_{m,i}}$  prázdná množina. Příslušná proměnná  $P_{m,i}$  je pak také prázdná množina a není tedy započítána do počtu podobností ve jmenovateli rovnice (42). Tímto vynecháním jedné hodnoty je docíleno rozpoznání necelistvých otisků prstu (obrázek 28).



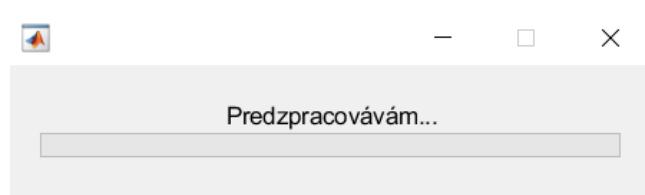
Obrázek 28: Porovnání celistvého (vlevo) a neclistvého (vpravo), jinak totožného, otisku prstu

## 6.5 Grafické uživatelské rozhraní

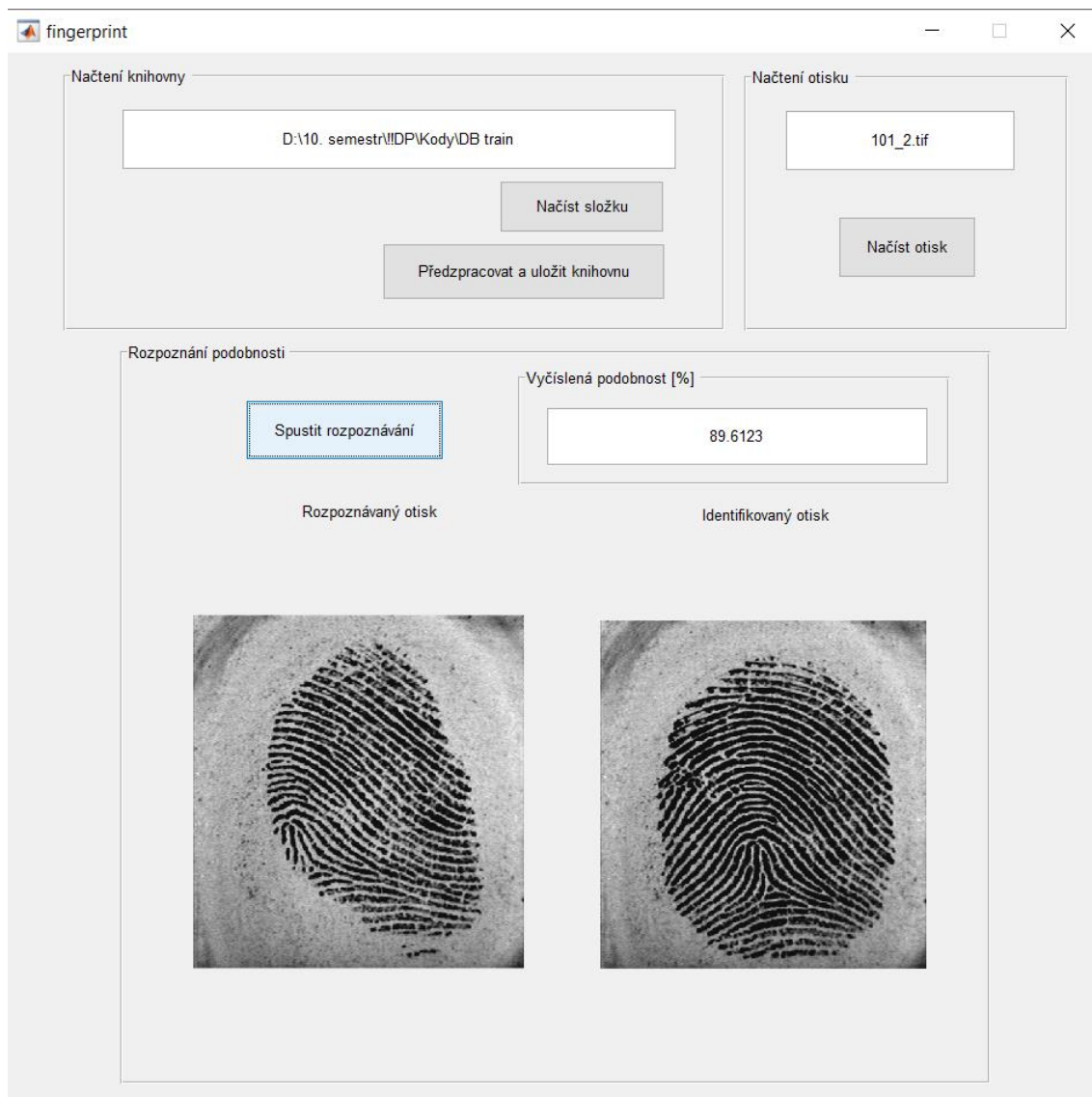
Pro přehlednější užívání byl algoritmus opatřen grafickým uživatelským rozhraním (GUI). Při spuštění hlavního programu se otevře úvodní okno grafického rozhraní, zobrazeného na *obrázku 29*. Prvním krokem pro správný běh programu je načtení knihovny autorizovaných otisků prstu stiskem tlačítka *Načíst složku*. Dalším krokem pak je stisk tlačítka *Předzpracovat a uložit knihovnu*. Toto tlačítko provede předzpracování všech obrazů autorizovaných otisků, extrakci markantů a jádra a jejich převod do kruhového výřezu parametrického pole. Také provede výřez skeletonizovaného obrazu otisku a předzpracované hodnoty uloží. Dalším logickým krokem je pak načtení otisku pro identifikaci a vyhodnocení jeho autorizovaného přístupu. Pro načtení tohoto otisku slouží stisk tlačítka *Načíst otisk* a jeho rozpoznávání je zahájeno tlačítkem *Spustit rozpoznání*. Při stisku tlačítek *Předzpracovat a uložit knihovnu*, *Načíst otisk* a *Spustit rozpoznání* se objeví okno a v něm *waitbar*, jež indikuje pracování programu. Jeden z *waitbarů* je zobrazen na *obrázku 30*.



Obrázek 29: Úvodní GUI



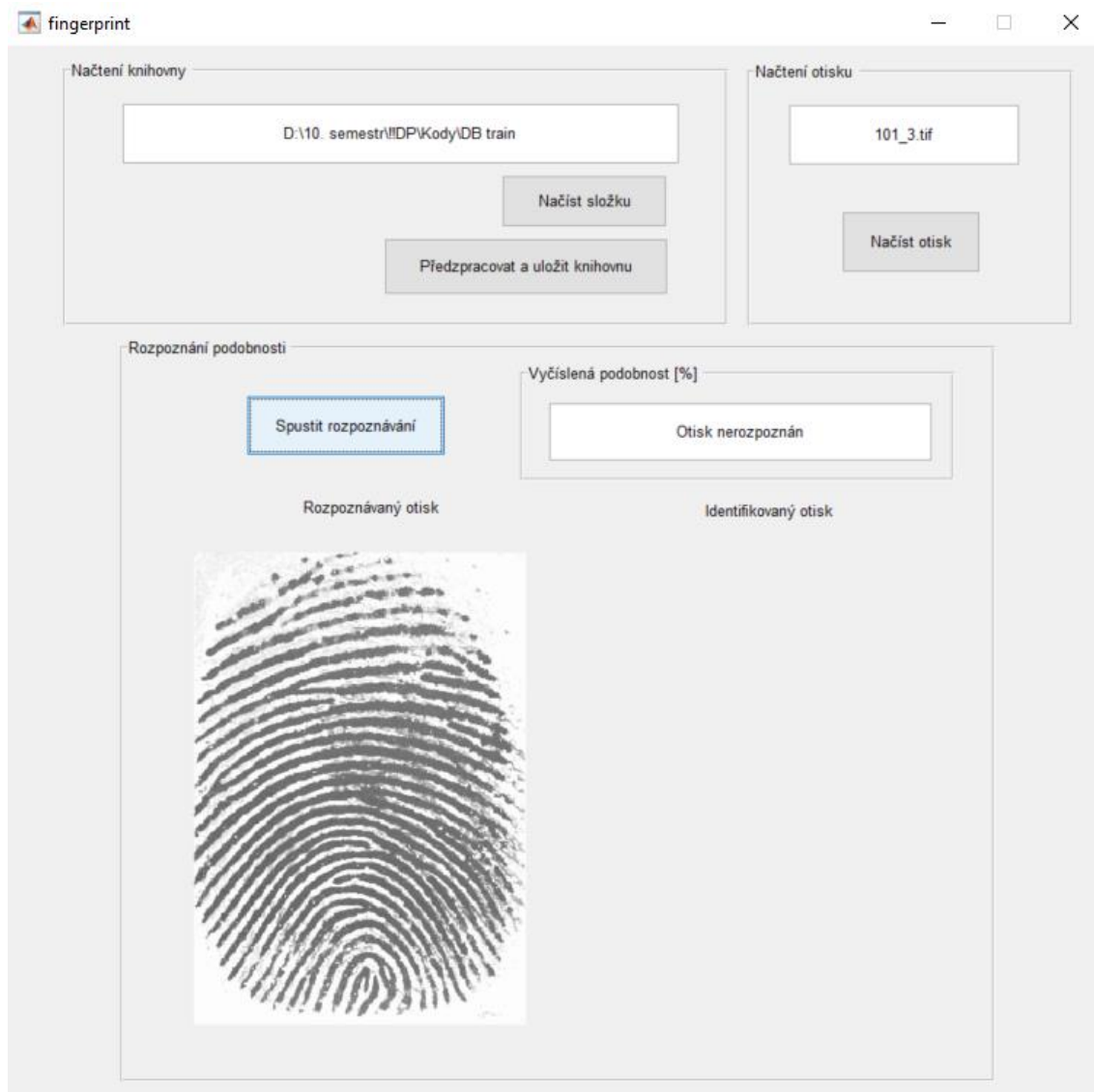
Obrázek 30: Okno waitbar



Obrázek 31: Správně rozpoznáný otisk prstu v GUI.

Vyhodnocenou podobnost poté program vypíše do editovatelného textového pole *Vyčíslená podobnost [%]* v procentech a zobrazí shodné otisky. Tento případ správného rozpoznání je zobrazen na *obrázku 31*. Grafické uživatelské rozhraní také zobrazuje v editovatelných textových polích vybranou složku pro knihovnu autorizovaných otisků a název vybraného otisku pro porovnání.

V případě nerozpoznání otisku (procentuální podobnost méně než 80%) je v editovatelném textovém poli *Vyčíslená podobnost [%]* vypsán text *Otisk nerozpoznán* (*obrázek 32*).



Obrázek 32: Nerozpoznaný otisk prstu

## 7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Program byl otestován na kombinaci na třech veřejných databázích *DB\_1*, *DB\_2* a *DB\_3* z roku 2000 pro mezinárodní soutěž v navržení vhodného algoritmu pro zvýraznění a porovnání podobnosti otisků prstu FVC (*Fingerprint Verification Competition*). [14]

*Tabulka 1: Matice záměn pro DB\_1.*

		Skutečnost	
		Shoda	Neshoda
Výsledek rozpoznání	Shoda	9	8
	Neshoda	15	2

*Tabulka 2: Matice záměn pro DB\_2.*

		Skutečnost	
		Shoda	Neshoda
Výsledek rozpoznání	Shoda	10	9
	Neshoda	14	1

*Tabulka 3: Matice záměn pro DB\_3.*

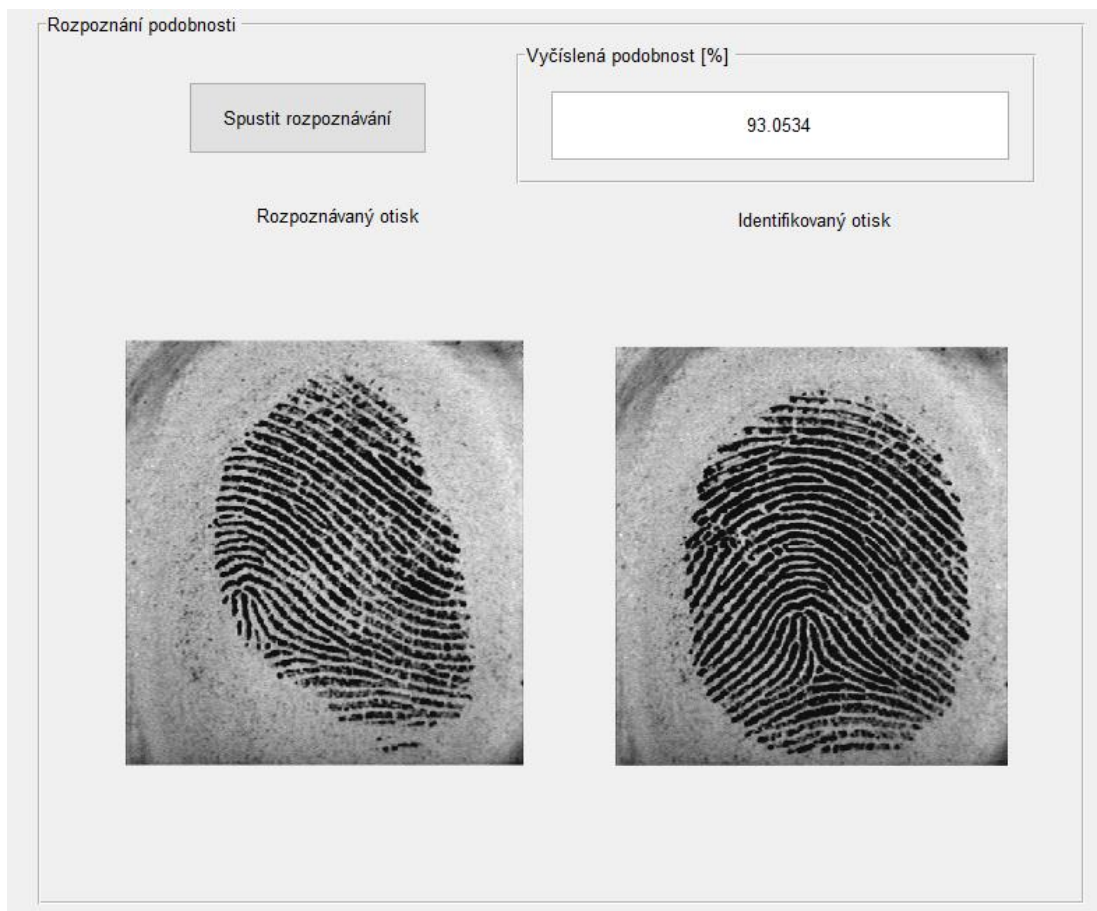
		Skutečnost	
		Shoda	Neshoda
Výsledek rozpoznání	Shoda	14	8
	Neshoda	10	2

Tabulka 4: Hodnoty FAR a FRR pro každou databázi.

Databáze	FAR [%]	FRR [%]
<b>DB_1</b>	23.5	8.8
<b>DB_2</b>	26.5	17.6
<b>DB_3</b>	23.5	5.9

Pro vyhodnocení experimentální míry chybovosti byly vytvořeny 3 knihovny (pro databáze *DB\_1*, *DB\_2* a *DB\_3*) vždy s 8 otisky verifikovaných uživatelů, od nichž mělo proběhnout pro každou knihovnu 24 oprávněných povolených přístupů (24 testovaných otisků, jež měly svůj souhlasný pár ve verifikované knihovně) a 10 neoprávněných zamítnutých přístupů (10 testovaných otisků, jež neměly svůj souhlasný otisk ve verifikované knihovně). V *tabulkách 1-3* jsou vytvořeny matice záměn pro dané databáze. Všechny se shodují poměrně vysokou mírou *true positive (TP)*, ale zároveň také vysokou mírou *false positive (FP)*. Tyto výsledky se promítají i do *tabulky 4*, která promítá míru falešného přijetí (*False Acceptance Rate, FAR*) a míru falešného odmítnutí (*False Rejection Rate, FRR*).

Nejlepší výsledky testování vykazuje databáze *DB\_3*, kde bylo úspěšně rozpoznáno 14 z 24 verifikovaných otisků. Také pro tuto databázi však bylo chybně vyhodnoceno 8 z 10 neautorizovaných přístupů jako autorizovaných. Také míra falešného odmítnutí je pro tuto databázi nejnižší a míra falešného přijetí taktéž, společně s databází *DB\_1*. Ta má však nízkou míru *true positive* a vyšší míru falešného odmítnutí. Databáze *DB\_2* vykazuje nejvyšší míru falešného přijetí i falešného odmítnutí. Celkově jsou míry falešného přijetí pro všechny databáze vysoké a promítají tak oblast nejvyššího selhávání celého algoritmu. Algoritmus je schopen dobře rozeznat shodné otisky i v případě necelistvosti daného otisku. Tento případ je vyobrazen ve výřezu z GUI na *obrázku 33*. Zásahu na správném rozeznávání necelistvých otisků má rozdělení porovnávaných výřezů otisků na kvadranty a následné nevyužití hodnot z kvadrantu, jež neobsahuje pro jeden z otisků méně než 2 markanty.



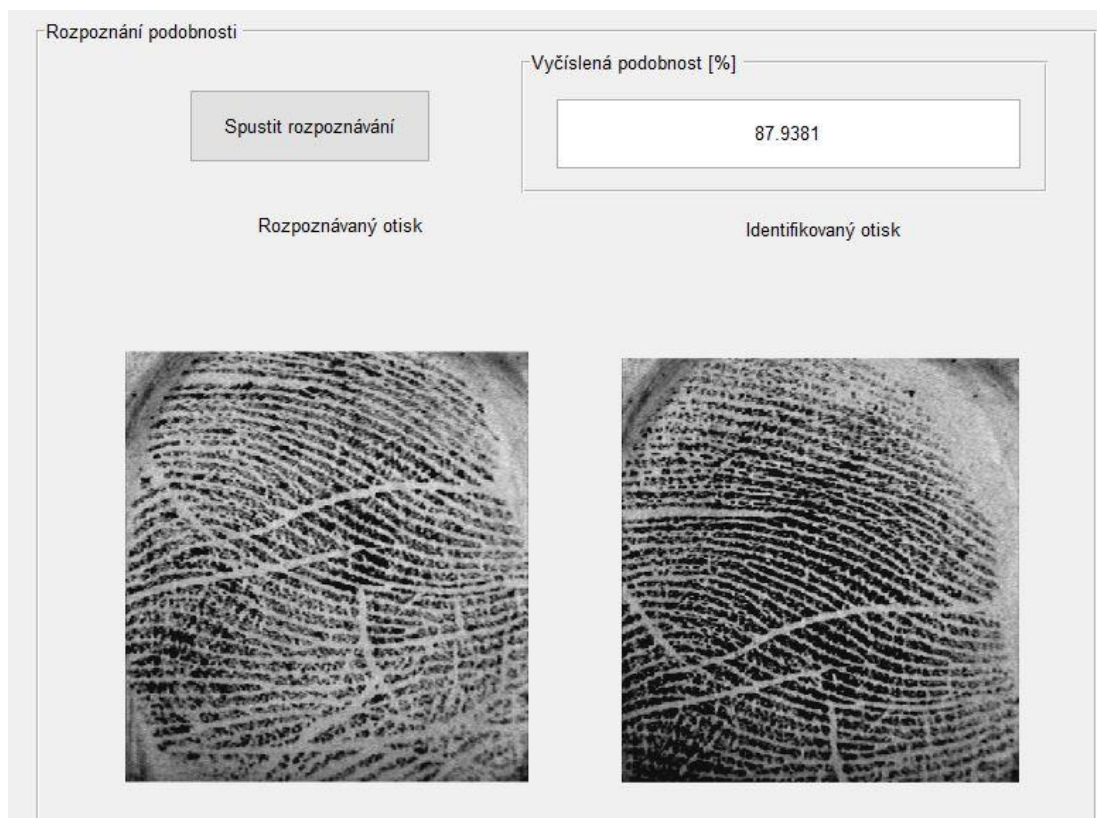
Obrázek 33: Úspěšně rozpoznávaný otisk (vlevo) a jeho reference (vpravo)



Obrázek 34: Špatně předzpracovaný otisk

Případy chybného vyhodnocení podobnosti mají v některých případech příčinu již v chybném předzpracování daných obrazů otisků prstů. Nejhorších výsledků předzpracování nabývají zpravidla velmi světlé otisky nebo otisky s výrazným artefaktem

nízkých jasových hodnot, což lze pozorovat na *obrázku 34*. Naopak algoritmus předzpracování si je schopen poradit s otisky zjizvenými a dokáže je správně vyhodnotit jako shodné (*obrázek 35*). Příklad úspěšného předzpracování zjizveného otisku je vyobrazen na *obrázku 36*.



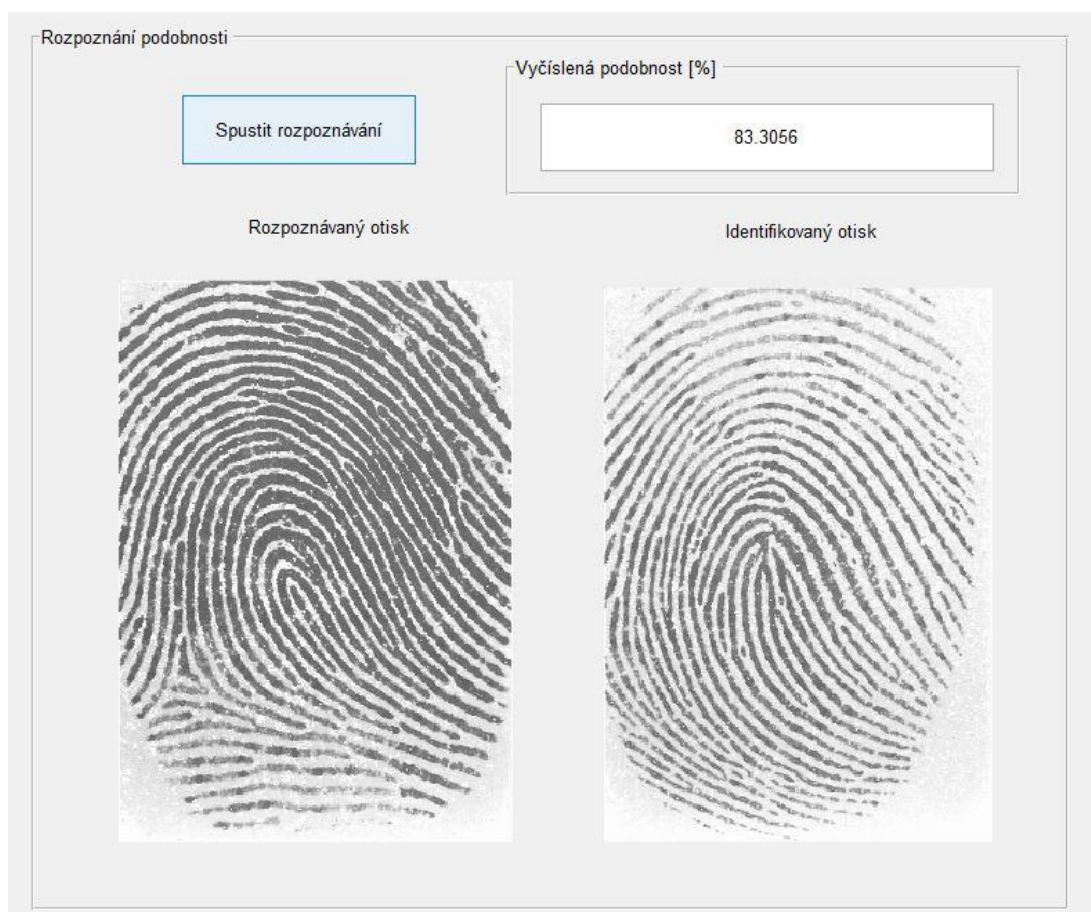
*Obrázek 35: Správně rozpoznáný zjizvený otisk*



*Obrázek 36: Úspěšně předzpracovaný zjizvený obraz otisku prstu*

Dalším případem chybného vyhodnocení je vysoká podobnost dvou neshodných snímků otisků prstu se stejným typem jádra a podobnými pozicemi markantů. Přítomností těchto velmi podobných otisků vzniká právě vysoká míra falešného přijetí, ale i zcela chybného rozpoznání. Příklad velmi podobných otisků je zobrazen na *obrázku 37*.

Největším nedostatkem algoritmu je především neschopnost rozpoznat druh jádra otisku. Přestože výpočtem Poincarého indexu je určen druh jádra, algoritmus v této fázi natolik selhává, že nebyla tato funkcionality zahrnuta do výsledného vyčíslení podobnosti dvou otisků. Tento příznak by pravděpodobně navýšil spolehlivost celého algoritmu a snížil míru falešných přijetí. Dalším nedostatkem je již zmíněné nekvalitní předzpracování velmi nekvalitních snímků. Přestože algoritmus je schopen kvalitně předzpracovat velmi zjizvené a poměrně zašuměné obrazy, obrazy s celkovou velmi nízkou jasovou hodnotou a nízkým kontrastem mezi papilárními liniemi algoritmus předzpracovat nedokáže.



Obrázek 37: Chybně vyhodnocené rozdílné otisky jako shodné

Vhodným vylepšením algoritmu by mohlo být přidání dalšího příznaku, například již zmíněné spolehlivější určení druhu jádra otisku nebo využití pole orientací pro porovnání orientací jednotlivých markantů mezi sebou a vůči jádru. Krom vzdáleností mezi markanty by mohlo být přidáno určení vzdálenosti od jádra, jakožto referenčního bodu.

I přes nedostatky dosahuje algoritmus dobrých statistických výsledků, zejména z pohledu správné identifikace podobnosti dvou shodných otisků. Díky kvalitnímu předzpracování algoritmus rozpoznává zjizvené a zašuměné otisky a díky implementaci párování markantů v kvadrantech výřezu pole příznaků rozpoznává i necelistvé otisky.

## 8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámení s pojmy identifikace, biometrie a identifikace otisku prstu. Zvláštní pozornost je v teoretické části práce věnována automatizované identifikaci otisku prstu a rozpoznávání podobnosti pomocí výpočetní techniky. Dále práce nastiňuje obecný postup pro automatizovanou detekci podobnosti a seznamuje čtenáře s existujícími metodami detekce podobnosti.

V práci je v rámci teoretické části detailně popsáno několik existujících metod vyhodnocení podobnosti otisků prstu. Mezi existujícími metodami převažují metody založené na extrakci markantů, což jsou charakteristická zakončení papilárních linií v otisku prstu. Rozložení těchto markantů je pro každou osobu jedinečné a dává tedy jedinečnou možnost přesné identifikace osoby. Další zmíněné metody pak kombinují více charakteristik otisku prstu, ať už globální jasový profil snímku či jiné lokální charakteristiky. Pozornost je v práci věnována také metodám založeným na korelaci.

V praktické části je realizován algoritmus pro předzpracování snímků otisků prstu, extrakci příznaků a vyčíslení podobnosti. Proces předzpracování sestává z vytvoření pole lokálních orientací a pole lokálních frekvencí, jež jsou pak spolu s normalizovaným a segmentovaným obrazem vstupem do Gaborovy filtrace. Samotné filtraci předchází vytvoření banky Gaborových filtrů, přičemž každý jeden Gaborův filtr představuje Gaussovo jádro modulované plošnou sinusovou vlnou o daných parametrech, vycházejících právě z informace o orientaci a frekvenci papilárních linií. Dalším krokem předzpracování je binarizace a skeletonizace obrazu. Algoritmus dále extrahuje vhodné příznaky, jmenovitě polohu jádra, druh a polohu markantů a vzájemnou hodnotu rotace mezi dvěma otisky. Výsledná hodnota podobnosti je vypočtena z euklidovských vzdáleností mezi markanty dvou otisků ve čtyřech kvadrantech výřezu parametrického pole otisku.

Algoritmus byl opatřen grafickým uživatelským rozhraním pro jednodušší používání a byl plně automatizován. Je schopen zpracovat velké množství snímků otisků v databázi autorizovaných uživatelů. Jednotlivé porovnávané otisky jsou v rámci grafického rozhraní zobrazeny pro lepší přehlednost a možnou subjektivní kontrolu výsledku vyhodnocení.

Program byl otestován na zkušební soutěžní databázi FVC (*Fingerprint Verification Competition*) z roku 2000. Výsledky testování byly statisticky vyhodnoceny. Statistické vyhodnocení ukázalo funkčnost algoritmu a schopnost rozpoznání snímků otisků se zhoršenou kvalitou i otisků s přítomností artefaktů v podobě zjizvení.

Vyhodnocení také ukázalo nedostatek algoritmu v podobě vysoké míry falešného přijetí otisků, které nejsou přítomny v knihovně autorizovaných otisků. Nedostatky algoritmu byly diskutovány a byla navržena vhodná vylepšení pro lepší funkčnost.

V rámci diplomové práce byly splněny všechny body zadání, navržený algoritmus rozpoznává stejné otisky prstů pomocí vyčíslení navržené metriky podobnosti, jež v sobě zahrnuje detekované zvolené příznaky a pro přehlednost a názornou vizualizaci byl opatřen grafickým uživatelským rozhraním.

# Literatura

- [1] RAK, R., V. MATYÁŠ a Z. ŘÍHA. *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. 1. Praha: Grada Publishing, 2008. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [2] KANCHAN, T. a K. KRISHAN. *Personal Identification in Forensic Examinations* [online]. 2013, s. 2. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/263732838\\_Personal\\_Identification\\_in\\_Forensic\\_Examinations](https://www.researchgate.net/publication/263732838_Personal_Identification_in_Forensic_Examinations)
- [3] ASHOK, J., V. SHIVASHANKAR a P. V. G. S. MUDIRAJ. *An Overview of Biometrics* [online]. 2010. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/50194220\\_An\\_Overview\\_of\\_Biometrics](https://www.researchgate.net/publication/50194220_An_Overview_of_Biometrics)
- [4] DRAHANSKÝ, M., ORSÁG, F. *Biometrie*. 1. Brno: Computer Press a. s., 2011, 294 s. ISBN 978-80-254-8979-6
- [5] AMARPREET, S., K. RAKESH a S. GURPREET. *Biometric Recognition: A Modern Era For Security* [online]. 2010. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/50315614\\_BIOMETRIC\\_RECOGNITION\\_A\\_MODERN\\_ERA\\_FOR\\_SECURITY](https://www.researchgate.net/publication/50315614_BIOMETRIC_RECOGNITION_A_MODERN_ERA_FOR_SECURITY)
- [6] HODULÍKOVÁ, T. *Biometrická identifikace otisku prstu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav biomedicínského inženýrství, 2016. 62s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Vítek, Ph.D.
- [7] MALTONI, D., et al. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York: Springer, 2003, 348s., ISBN 0-387-95431-7.
- [8] RAVI, J., K. B. RAJA a K. R. VENUGOPAL. *Fingerprint recognition using minutia score matching* [online]. 2009, s. 8. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1001/1001.4186.pdf>
- [9] ŠIKUDOVÁ, Elena, Zuzana ČERNEKOVÁ, Wanda BENEŠOVÁ, Zuzana HALADOVÁ a Júlia KUČEROVÁ. *Počítačové videnie*. Praha, 2014, 378s. ISBN 978-80-87925-06-5.

- [10] BAZEN, A.M. a S.H. GERREZ. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2002. 905-919. DOI: 10.1109/TPAMI.2002.1017618. ISSN 0162-8828. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1017618/>
- [11] RAVI, J., K. B. RAJA a K. R. VENUGOPAL. *Fingerprint recognition using minutia score matching* [online]. 2009. 8. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1001/1001.4186.pdf>
- [12] JAIN, A. K., S. PRABHAKAR, L. HONG a S. PANKANTI. *Filterbank-Based Fingerprint Matching* [online]. 2000. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.5632&rep=rep1&type=pdf>
- [13] *LivDet* [online]. Dostupné z: <http://livdet.org/registration.php>
- [14] Fingerprint Verification Competition [online]. Dostupné z: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2000/download.asp>
- [15] LIN HONG, YIFEI WAN a A. JAIN. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1998. 777-789. DOI: 10.1109/34.709565. ISSN 01628828. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/709565/>
- [16] KOVESI, Peter. *MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing* [online]. Dostupné z: <https://www.peterkovesi.com/matlabfns/index.html#fingerprints>
- [17] THAI, Raymond. *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction* [online]. 2003. 71. Dostupné z: <https://www.peterkovesi.com/studentprojects/raymondthai/RaymondThai.pdf>
- [18] GNANASIVAM, P. a S. MUTTAN. An efficient algorithm for fingerprint preprocessing and feature extraction. *Procedia Computer Science*. 2010, **2**, 133-142. DOI: 10.1016/j.procs.2010.11.017. ISSN 18770509. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050910003479>
- [19] BO, Jin, Tang Hua PING a Xu Ming LAN. *Fingerprint singular point detection algorithm by Poincaré Index* [online]. 2008. 10. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/234789351\\_Fingerprint\\_singular\\_point\\_detection\\_algorithm\\_by\\_Poincare\\_Index](https://www.researchgate.net/publication/234789351_Fingerprint_singular_point_detection_algorithm_by_Poincare_Index)