

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 biomedicínského 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: 29.5.2020

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 obecně a následně s konkrétním pojmem identifikace osob a identifikace otisku prstu. Nastíněn je i pojem biometrie, jakožto klíčový obor 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 prstů a popsána vlastní realizace algoritmu pro rozpoznání podobnosti otisků prstů. Spolehlivost algoritmu je testována na experimentální databázi snímků otisků prstů.

Klíčová slova

identifikace, biometrie, otisk prstu, markant

Abstract

The main goal of this thesis is to introduce the meaning of identification and specific meaning of personal identification and mainly fingerprint identification. There is introduction to the meaning of biometrics as a key field for fingerprint recognition. Thesis also introduces principals and types of automatic processing and automatic detection of fingerprints. An existing and succesful methods are being described in the thesis and an automatic fingerprint identification alghoritm is being realized and described. Reability of the alghoritm is tested within experimental database.

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 semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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 **29. května 2020**

.....

Alena Skoupilová

Poděkování

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

V Brně dne **29. května 2020**

.....

Alena Skoupilová

Obsah

1	Úvod	1
2	Identifikace a biometrie	2
2.1	Identifikace.....	2
2.1.1	Identifikace osob	2
2.2	Biometrie	3
2.2.1	Biometrické vlastnosti	4
2.3	Biometrický systém	2
3	Otisk prstu	4
3.1	Snímání otisku prstu	5
3.2	Snímací senzory	5
3.2.1	Optické senzory	5
3.2.2	Kapacitní senzory.....	5
3.2.3	Teplotní sensory.....	6
3.2.4	Ultrazvukové senzory.....	6
4	Počítačové zpracování otisku prstu.....	7
4.1	Předzpracování obrazu otisku prstu.....	7
4.1.1	Segmentace.....	8
4.1.2	Skeletonizace	8
4.1.3	Gaborova filtrace.....	9
4.1.4	Lokální orientace papilárních linií	11
4.1.5	Lokální frekvence papilárních linií	12
4.2	Nalezení a extrakce příznaků.....	12
4.2.1	Detekce jádra otisku prstu	12
4.2.2	Detekce markantů.....	14
4.2.3	Porovnávání otisků prstů	15
4.2.4	Vyhodnocení podobnosti	15
5	Přehled metod identifikace otisku prstu	16
5.1.1	Metody založené na markantech	16
5.1.2	Metody založené na korelaci	21
5.1.3	Metody založené na geometrických vlastnostech papilárních linií.....	22
6	Vlastní algoritmus	26
6.1	Použitá databáze	26
6.2	Prostředí MATLAB	26
6.3	Předzpracování.....	26
6.3.1	Segmentace.....	26
6.3.2	Normalizace	27
6.3.3	Stanovení lokální orientace papilárních linií	27
6.3.4	Stanovení lokální frekvence papilárních linií	28
6.3.5	Gaborova filtrace.....	29
6.3.6	Binarizace a skeletonizace.....	30
6.4	Extrakce příznaků.....	31
6.4.1	Nalezení a extrakce markantů	31
6.4.2	Nalezení a extrakce jádra.....	33
6.5	Vyčíslení podobnosti	35
6.6	Grafické uživatelské rozhraní	36
7	vyhodnocení výsledků	38

8	Závěr	40
---	-------------	----

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 nepoužívanějších 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 prstů v praxi je známá již dlouhodobě, ale tato využitelnost se razantně zvedla až s příchodem výpočetní techniky. Digitalizace otisků prstů 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 prstů. Většina metod využívá výskytu markantů, jež představují charakteristická zakončení papilárních linií. Další metody pak kombinují více lokálních a globálních charakteristik otisků prstů.

Nepřeberné množství rozpoznávacích algoritmů bylo v minulosti realizováno také v rámci mezinárodních soutěží ve vývoji těchto algoritmů. Tato skutečnost dala 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 této práce je seznámení s problematikou rozpoznání podobnosti otisků prstů a s existujícími detekčními metodami. Dále pak navrhnutí a realizace automatizovaného identifikačního algoritmu pro rozpoznání podobnosti otisků prstů na vhodně předzpracovaných snímcích na základě zvolených příznaků.

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]

2.1.1 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]

2.2 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 neměly 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]

2.2.1 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
- Mimika obličeje a pohyby rtů
- Podpis (jeho dynamická forma)
- Dynamika stisku kláves [4]

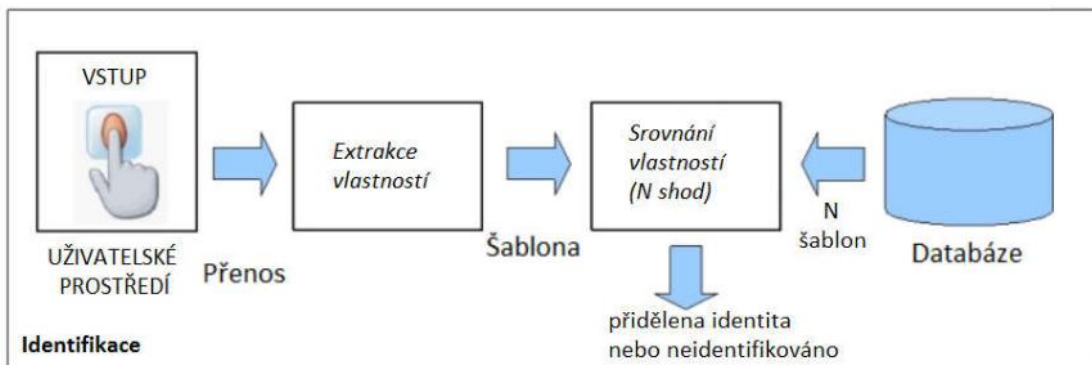
2.3 Biometrický systém

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

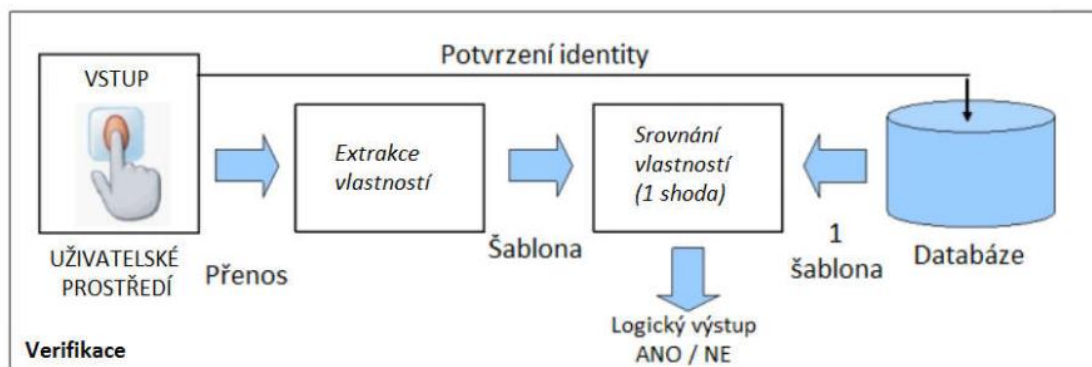
- 1) Unimodální biometrické systémy – využívající pouze jednu biometrickou vlastnost. V praxi jsou nejvíce využívány právě tyto systémy. Mezi jejich výhody patří nižší náklady na pořízení, mezi nevýhody pak nižší spolehlivost. [4]
- 2) Multimodální biometrické systémy – využívající více biometrických 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 porovnáním 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 2: 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

3.2.1 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 prstů. [3]

3.2.2 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory snímají povrch prstu za použití měření elektrické kapacity. Větší dielektrická konstanta papírných 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]

3.2.3 Teplotní senzory

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 senzory jsou levné a kompaktní. Spotřebují však více energie a nejsou efektivní při vyšších teplotách okolí. [3]

3.2.4 Ultrazvukové senzory

Tyto senzory pracují principiálně podobně, jako senzory 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 senzory 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 prstů
- 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 3: 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]

4.1.1 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 žádoucí získání lokální orientace a frekvence papilárních linií, jež jsou krom zpracovávaného obrazu vstupem do Gáborovy filtrace, jež bude popsána dále. Proces vytvoření binárního obrazu se nazývá binarizace. [7]



Obrázek 4: Binarizace – vlevo před binarizací, vpravo po binarizaci [8]

4.1.2 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 čáry ztenčit na tloušťku jednoho obrazového pixelu.

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



Obrázek 5: Skeletizace – vlevo před skeletizací, vpravo po skeletizaci [8]

4.1.3 Gaborova filtrace

Gaborovy filtry, které 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 $g(x', y', \theta, \psi, \sigma_x, \sigma_y)$ 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

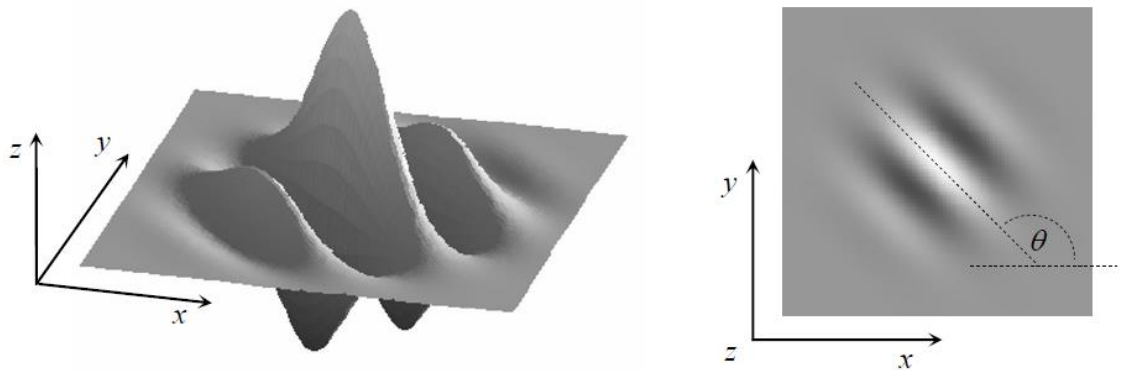
$$(x', y') = (x \cos \theta + y \sin \theta, -x \sin \theta + y \cos \theta). \quad (4)$$

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 λ , orientace šíření vlny θ , fázový posun harmonické složky ψ a směrodatné odchylky σ_x, σ_y , které určují elipticitu Gaussova jádra. Příklad použití určitých parametrů lze pozorovat na *obrázku 6*. [10]



Obrázek 6: Grafická reprezentace Gaborova filtru ($\theta=135^\circ, \sigma_x = \sigma_y = 3$ [7])

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

Z výstupů jednotlivých Gaborových filtrů lze získat reálnou J_{Re} a imaginární J_{Im} složku odezev na filtry. Dále pak lze získat energii E , *magnitude* M a průměrná energie celého obrazu:

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

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

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

$$M(x, y, \Omega) = \sqrt{\bar{E}(x, y, \Omega)}. \quad (10)$$

$$\bar{E}(x, y, \Omega) = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y E(x, y, \Omega), \quad (11)$$

N představuje celkový počet pixelů v obraze. [10]

4.1.4 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 prstů tedy představuje úhel ležící v rozmezí 0-180° a pojem směr pak udává úhel ležící v rozmezí 0-360°.

Namísto výpočtu orientace linie pouze z jednoho pixelu je častým přístupem výpočet orientace v diskrétních pozicích, což značně snižuje výpočetní náročnost algoritmů pro zvýraznění a rozpoznávání snímků otisků prstů.

Matice, odpovídající velikostí původnímu obrazu, jež dává specifickou transformací údaje o lokální orientaci papilární linie je často označována jako *obraz orientací*.

Nejjednodušší a nejpoužívanější způsob získu obrazu orientací je metoda založená na gradientu v obraze. Gradientní obraz je získán po konvoluci některého z operátorů, jež aproximují první derivaci. [7]

4.1.5 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. *Obraz frekvencí* je analogicky k obrazu orientací definován jako matice o stejných rozměrech, jako původní obraz a lokální frekvence může být také definována v diskrétní pozici stejně jako u obrazu 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]

4.2 Nalezení a extrakce příznaků

4.2.1 Detekce jádra otisku prstu

Důležitým krokem pro porovnání snímků otisků prstů je detekce jeho tzv. *jádra*. Jádro otisku je charakteristický singulární útvar. 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 prstů do menších podtříd.



Levá smyčka

Pravá smyčka

Spirála

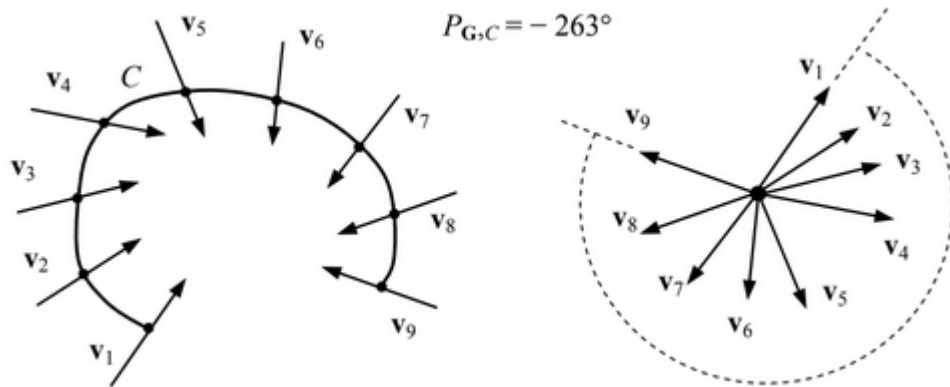
Oblouk

Klenutý oblouk

Obrázek 7: Varianty jádra otisku prstu [7]

Detekce jádra pomocí Poincarého indexu

Metoda založená na Poincarého indexu je jedna z nejčastěji využívaných. Je dáno vektorové pole G , jehož body prochází křivka C . Poincarého index $P_{G,C}$ je pak definován jako absolutní rotace vektorů z pole G podél křivky C (obrázek 8).

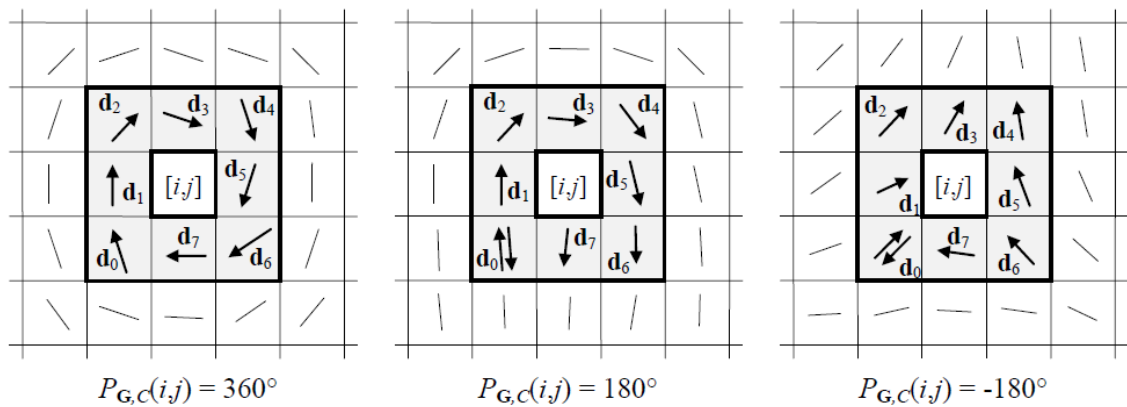


Obrázek 8: Poincarého index [7]

G je tedy diskretní vektorové pole spojené vycházející z obrazu orientací papilárních linií otisku prstu D a $[i,j]$ je pozice elementu θ_{ij} v D . Poincarého index $P_{G,C}$ je vypočítán následovně:

- Křivka C je uzavřená cesta papilární linie definovaná jako uspořádaná sekvence některých elementů z 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 vyžadují směr každé orientace, tudíž hodnotu v rozmezí $0-360^\circ$.

Na uzavřených smyčkách, které definují hledané jádro otisku prstu, nabývá Poincarého index pouze diskretních hodnot 0° , $\pm 180^\circ$ 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]

4.2.2 Detekce markantů

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



Obrázek 10: základní typy markantů [6]

Při extrakci markantů využívá většina *softwarů* pouze jednodušší markanty a to první dva zmíněné v *obrázku 6* (*začátek* a *vidlice*). Z takto detekovaných markantů je nutné eliminovat markanty falešné, které mohou vzniknout přítomností jizev, a také hraniční body snímku. [1]

Pro každý nalezený markant je následně definován jeho:

- Typ (začátek/vidlice)
- Souřadnice x, y
- Směr (orientace)

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

4.2.3 Porovnávání otisků prstů

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]

4.2.4 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

5.1.1 Metody založené na markantech

Nechť 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 θ 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 θ_0 :

$$sd(m'_j, m_i) = \sqrt{(x'_j - x_i)^2 + (y'_j - y_i)^2} \leq r_0 \quad (12)$$

$$dd(m'_j, m_i) = \min(|\theta'_j - \theta_i|, 360^\circ - |\theta'_j - \theta_i|) \leq \theta_0. \quad (13)$$

V rovnici 2 je třeba brát v potaz maximální rozdíl úhlů o velikosti 180° (rozdíl mezi úhly 20° a 340° je pouze 40°). Práhy r_0 a θ_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 (θ) 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 θ proti směru hodinových ručiček kolem počátku (počátek jako střed nebo průměr markantů) a posunutí $[\Delta x, \Delta y]$):

$$map_{\Delta x, \Delta y, \theta}(m'_j\{x'_j, y'_j, \theta'_j\}) = m''_j = \{x''_j, y''_j, \theta_j + \theta\} \quad (14)$$

Dále je uvažována funkce $mm()$, která dává na výstupu číslo 1, jestliže se markanty m_i a m''_j shodují dle rovnic (1) a (2):

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

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 (12) a (13), 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:

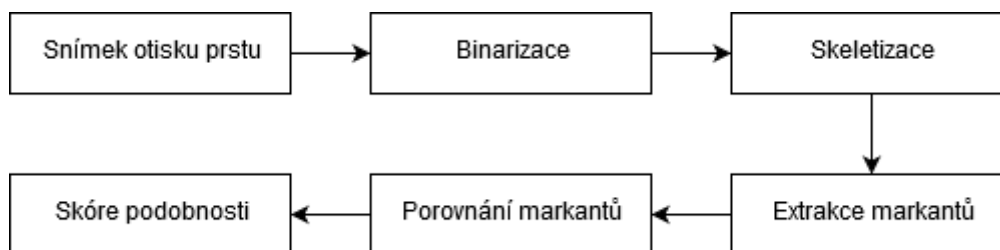
$$skóre = \frac{k}{(n + m)/2}. \quad (16)$$

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 prstů pomocí porovnávání skóre markantů

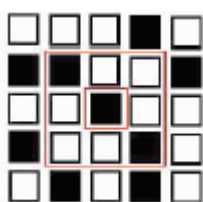
Fingerprint Recognition Using Minutia Score Matching dále už jen *FRMSM* je metoda porovnání a vyhodnocení podobnosti otisků prstů založená na markantech. Porovnávají se markanty typu *terminace* (ukončení papilární linie) a *bifurkace* (rozdvojení papilární linie).



Obrázek 11: blokové schéma metody FRMSM

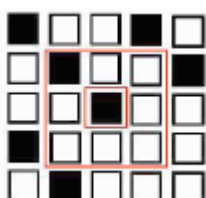
Proces binarizace a skeletizace odpovídá zásadám obecného předzpracování snímků otisků prstů uvedeného výše v textu. Binarizace je provedena metodou prahování a proces skeletizace nemění pozici markantů oproti původnímu obrazu.

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.



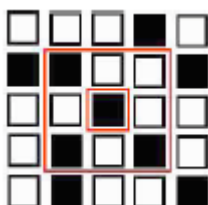
Crossing Number = 2.

Pixel papilární linie.



Crossing Number = 1.

Markant *terminace*.



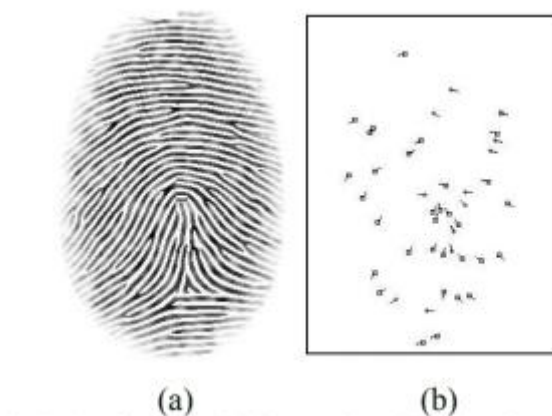
Crossing Number = 3.

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 uchovávané 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, ϕ_k^T = radiálnímu úhlu k-tého markantu a θ_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]

5.1.2 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 prstů, nelze jednoduše vypočítat podobnost pomocí rovnice (20).

Rozšířením I na $I^{\Delta x, \Delta y, \theta}$ je vyjádřen posun (vektory Δx , Δy) a rotace (úhlem θ) 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 (Δx , Δy , θ) 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 prstů. 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 (Δx , Δy , θ) 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° v rozmezí 60° by bylo nutné spočítat 400x400x60 korelací, což představuje zhruba 1500 miliard výpočetních operací. [7]

5.1.3 Metody založené na geometrických vlastnostech papilárních linií

Důvody pro návrhy algoritmů pro identifikaci otisků prstů 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 prstů 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 oblastí 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 VLASTNÍ ALGORITMUS

6.1 Použitá databáze

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

Databáze použitá pro testování samotného algoritmu rozpoznávání podobnosti otisků prstů a dodatečnou optimalizaci předzpracování snímků je sestavena kombinací veřejných databází *DB_2* a *DB_3* z roku 2000 pro mezinárodní soutěž v návržení vhodného algoritmu pro zvýraznění a porovnání podobnosti otisků prstů FVC (*Fingerprint Verification Competition*). [14]

6.2 Prostředí MATLAB

Celý algoritmus je realizován v programovém prostředí *MATLAB*, jež je nejen díky Image Processing Toolboxu ideálním nástrojem pro zpracování a analýzu obrazů.

6.3 Předzpracování

6.3.1 Segmentace

Prvním krokem předzpracování snímku otisku prstu v realizovaném 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 získána binární maska, která je následně prvek po prvku násobena originálním obrazem pro jeho segmentaci. Ukázkou původního obrazu a jeho binární masky je možno pozorovat na *obrázku 17*.



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

6.3.2 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 tmavými jasovými hodnotami. Obraz je normalizován na obraz s nulovou střední hodnotou a jednotnou směrodatnou odchylkou a jasové hodnoty jsou transformovány do rozmezí 0-1.

6.3.3 Stanovení lokální orientace papilárních linií

Jak již bylo zmíněno výše, pro kvalitnější zvýraznění papilárních linií je třeba získat tzv. obraz orientací, jež reprezentuje lokální orientace papilárních linií v obraze otisku prstu.

Kroky stanovení orientace pixelu (i,j) byly provedeny následovně:

1. Konvolucí normalizovaného obrazu se Sobelovými operátory (*obrázek 18*), jež aproximují první derivaci, jsou získány gradienty ve směru osy x a ve směru osy y .
2. Pomocí následujících rovnic (23), (24) a (25) je stanovena lokální orientace pro pixel (i,j) .
3. Obraz orientací je vyhlazen Gaussovým filtrem a převeden na vektorové pole, které je definováno rovnicemi (26) a (27).

4. Obraz je znovu vyhlazen Gaussovým filtrem a finální obraz orientací je dán rovnicí (28). [15]

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}$$

Obrázek 18: Horizontální a vertikální Sobelův operátor

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v), \quad (23)$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} \partial_x^2(u, v)\partial_y^2(u, v), \quad (24)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{V_y(i, j)}{V_x(i, j)}, \quad (25)$$

$$\Phi_x(i, j) = \cos(2\theta(i, j)), \quad (27)$$

$$\Phi_y(i, j) = \sin(2\theta(i, j)), \quad (28)$$

$$O(i, j) = \frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{\Phi'_y(i, j)}{\Phi'_x(i, j)}. \quad (29)$$

6.3.4 Stanovení lokální frekvence papilárních linií

Lokální frekvence papilárních linií je v tomto kroku stanovena ze vzdálenosti dvou maxim v jasovém profilu, jež je orientován kolmo na orientaci v počítaném bloku. Nejdříve je však jasový profil vyhlazen Gaussovým dolnopropustním filtrem. Rozestup papilárních linií $S(i, j)$ je počítán jako medián pixelů mezi dvěma nalezenými lokálními minimálními hodnotami v jasovém profilu vlny. Výsledná lokální frekvence linií je pak pro pixel (i, j) vypočtena podle rovnice (30). [15]

$$F(i, j) = \frac{1}{S(i, j)} \quad (30)$$

6.3.5 Gaborova filtrace

Z lokálních hodnot orientace a frekvence z předchozích kroků je vytvořena banka Gaborových filtrů a jednotlivé bloky obrazu jsou filtrovány vybraným Gaborovým filtrem pro zvýraznění papilárních linií. Bloky jsou filtrovány reálnou částí Gaborova filtru. Gaborov filtr je definován rovnicemi (31), (32) a (33). θ v rovnicích představuje orientaci Gaborova filtru, f frekvenci vlny cosinus, σ_x a σ_y představují směrodatné odchylky podél os x a y (elipticita Gaborova filtru) a x_0 a y_0 definují osy x a y pro souřadný systém filtru.

$$G(x, y; \theta, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2} \right] \right\} \cos(2\pi f x_\theta), \quad (31)$$

$$x_\theta = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (32)$$

$$y_\theta = -x \sin \theta + y \cos \theta, \quad (33)$$

$$E(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_x}{2}}^{\frac{w_x}{2}} \sum_{v=-\frac{w_y}{2}}^{\frac{w_y}{2}} G(u, v; O(i, j), F(i, j)) N(i - u, j - v). \quad (34)$$

Odezva Gaborova filtru G je vypočítána pomocí 2D konvoluce, kde pro zvýrazněný obraz E , orientaci $O(i, j)$ a frekvenci $F(i, j)$ platí, jak je uvedeno v rovnici (34). [15]

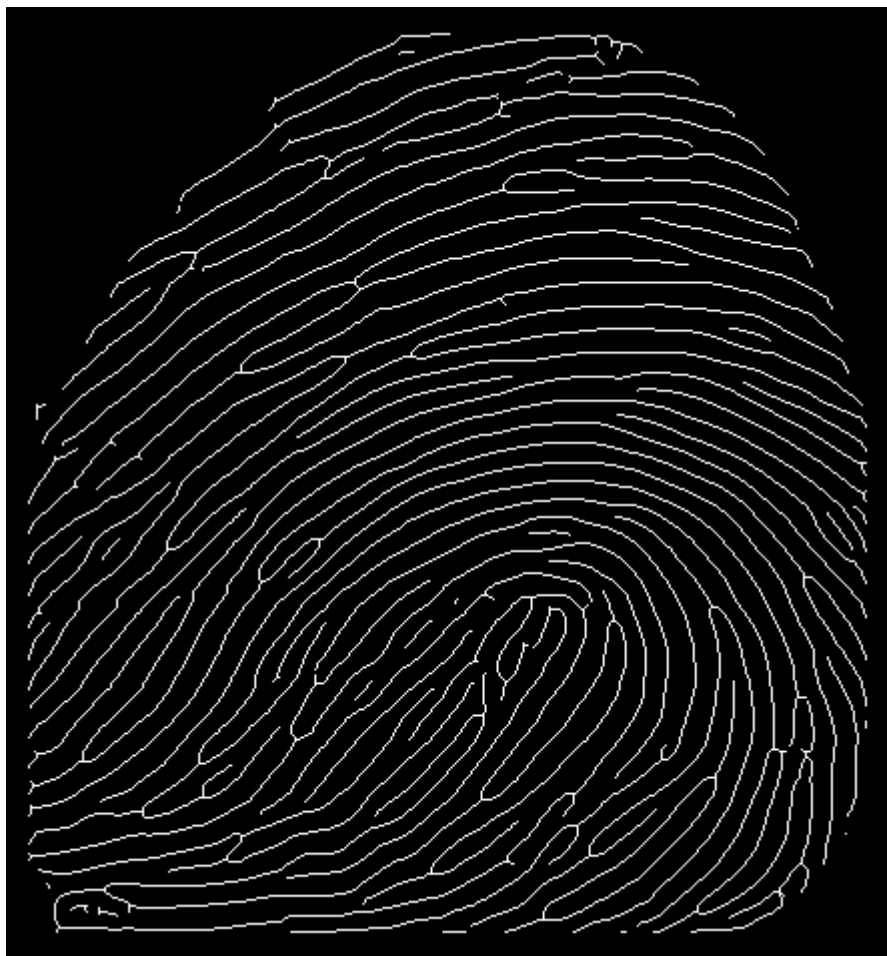
Obraz po Gaborově filtraci lze vidět na *obrázku 19*. Oproti původnímu vstupnímu obrazu na *obrázku 17* je značné zvýraznění a vyhlazení papilárních linií.



Obrázek 19: Obraz filtrovaný bankou Gaborových filtrů.

6.3.6 Binarizace a skeletonizace

Výstup z Gaborovy filtrace je binarizován převedením všech jasových hodnot větších než nula na hodnotu jedna. 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. Výsledek předzpracovaného obrazu je zobrazen na *obrázku 20*.



Obrázek 20: Finální předzpracovaný obraz po skeletizaci.

6.4 Extrakce příznaků

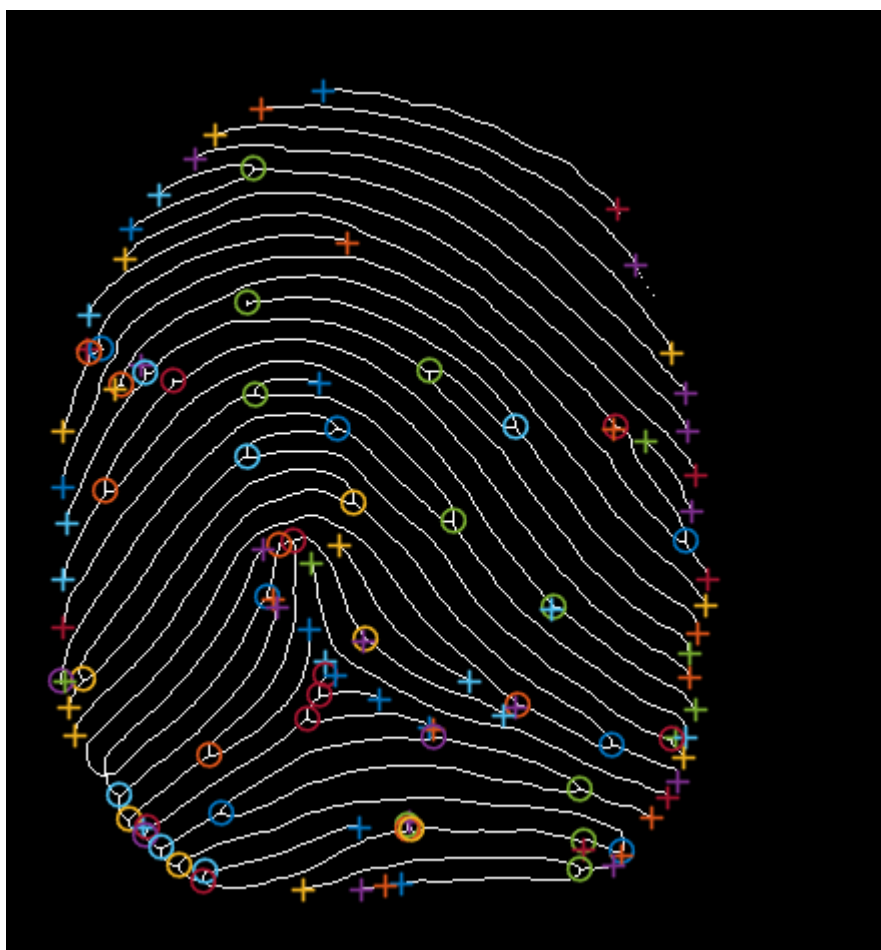
6.4.1 Nalezení a extrakce markantů

V rámci extrakce markantů jsou extrahovány pouze dva nejběžnější typy markantů a to jsou *terminace* (zakončení) a bifurkace (rozvětvení). Tyto dva typy zakončení papilárních linií jsou ve skeletonizovaném obraze detekovány párem rotovaných binárních masek. Obě masky jsou rotovány o 45° a za účelem nalezení pozic markantů jsou porovnávány s celým obrazem. V místě výskytu markantu je do matice nul vložena jednička. Použité masky jsou vyobrazeny na *obrázku 21*.

<pre>>> markanty{1,1}</pre>	<pre>>> markanty{9,1}</pre>
<pre>ans =</pre>	<pre>ans =</pre>
<pre> 0 1 0</pre>	<pre> 1 0 1</pre>
<pre> 0 1 0</pre>	<pre> 0 1 0</pre>
<pre> 0 0 0</pre>	<pre> 0 1 0</pre>

Obrázek 21: Dvojice masek pro bifurkaci a terminaci.

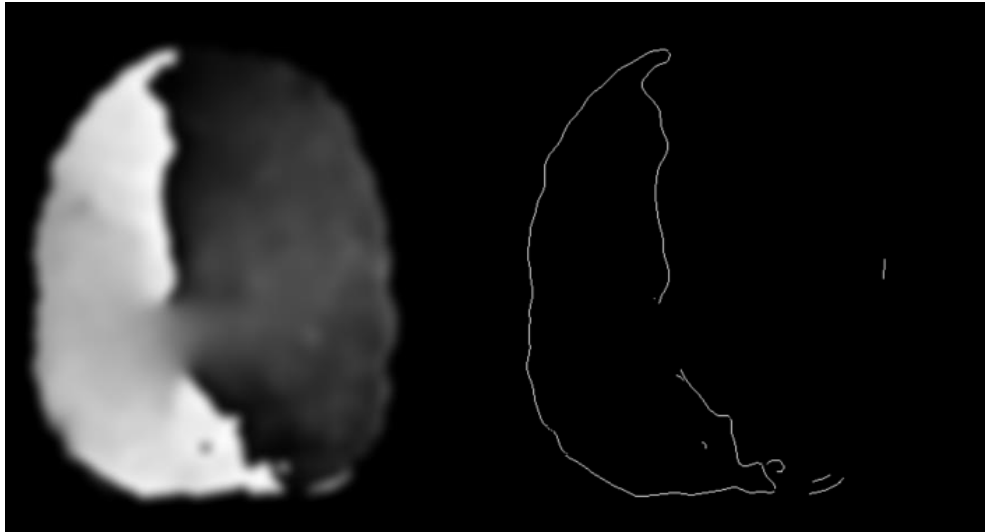
Pro odstranění falešných markantů na okrajích otisku je erodována původní maska pro segmentaci otisku a touto erodovanou maskou je vynásobeno pole markantů. Detekované markanty před násobením erodovanou maskou lze pozorovat na *obrázku 21*.



Obrázek 21: Zobrazení markantů.

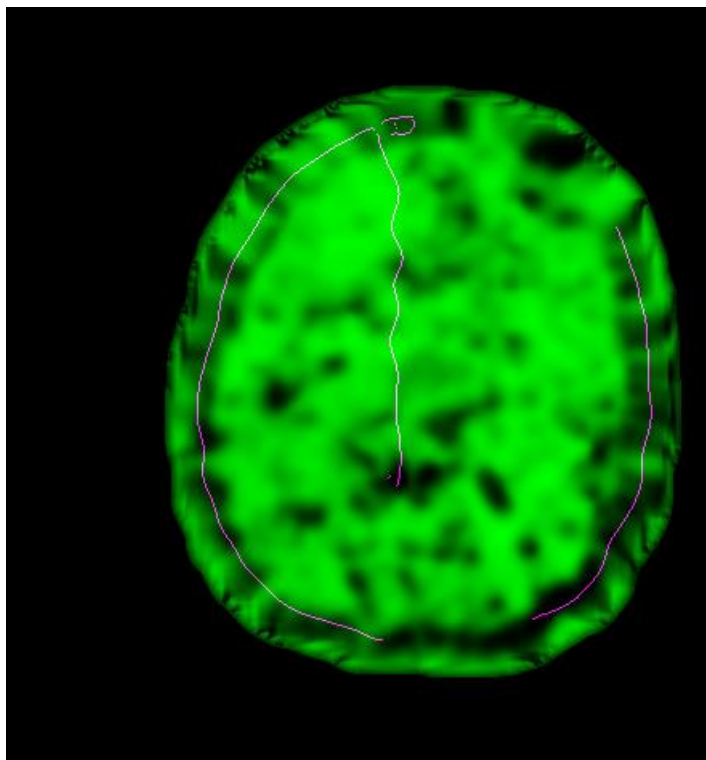
6.4.2 Nalezení a extrakce jádra

Pro nalezení jádra otisku prstu je využito obrazu orientací. Tento obraz je vyhlazen Gausovým filtrem a následně je získána jeho hranová reprezentace za použití operátorů Prewittové. Obraz orientací po vyhlazení a jeho hranovou reprezentaci lze pozorovat na *obrázku 22*. Z hranové reprezentace jsou za pomoci binární masky použité i pro nalezení terminace markantů extrahovány koncové body.

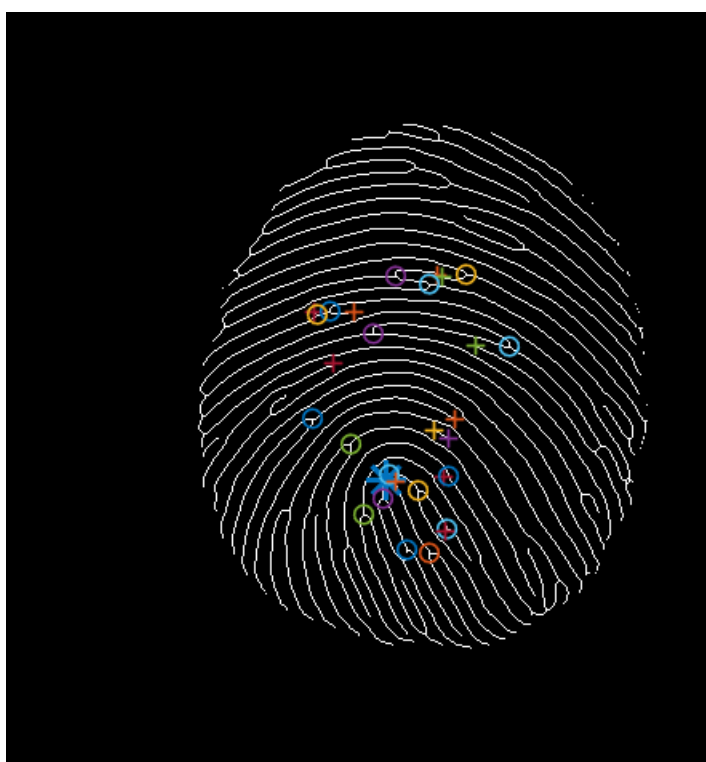


Obrázek 22: Vyhlazený obraz orientací a jeho hranová reprezentace.

Dalším krokem pro nalezení jádra je výpočet koherence z obrazu orientací. Vypočtená koherence obrazu je transformována na negativ a binarizována s pevným prahem (jasové hodnoty vyšší než 0.9). Tímto krokem jsou převedeny na binární objekty pouze nejsvětlejší objekty v obrazu koherence. Dále je obraz maskován erodovanou maskou, použitou již dříve pro odstranění okrajových markantů. Tato maska je nyní použita pro odstranění okrajových fluktací koherence a dále je z obrazu vyfiltrován jediný největší binární objekt. Tento obraz s jediným binárním objektem pak představuje masku a sečtením této masky s maticovým polem extrahovaných koncových bodů z hranové reprezentace obrazu orientací je získán 1 nebo více bodů s jasovou hodnotou 2. V případě existence jednoho bodu je tento bod stanoven jako jádro otisku, jak ukazují *obrázky 23 a 24*. [16] [17]



Obrázek 23: Překryv koherence a hranové reprezentace obrázu orientací



Obrázek 24: Výsledné extrahované markanty a jádro.

V případě nalezení dvou bodů a více pro případné jádro, je vybrán ten bod, jež se nachází blíže centrálnímu pixelu masky pro segmentaci. V případě selhání a nenalezení žádného

jádra je vybrán střed původní masky pro segmentaci. Výsledek správného určení jádra zobrazuje *obrázek 24*.

6.5 Vyčíslení podobnosti

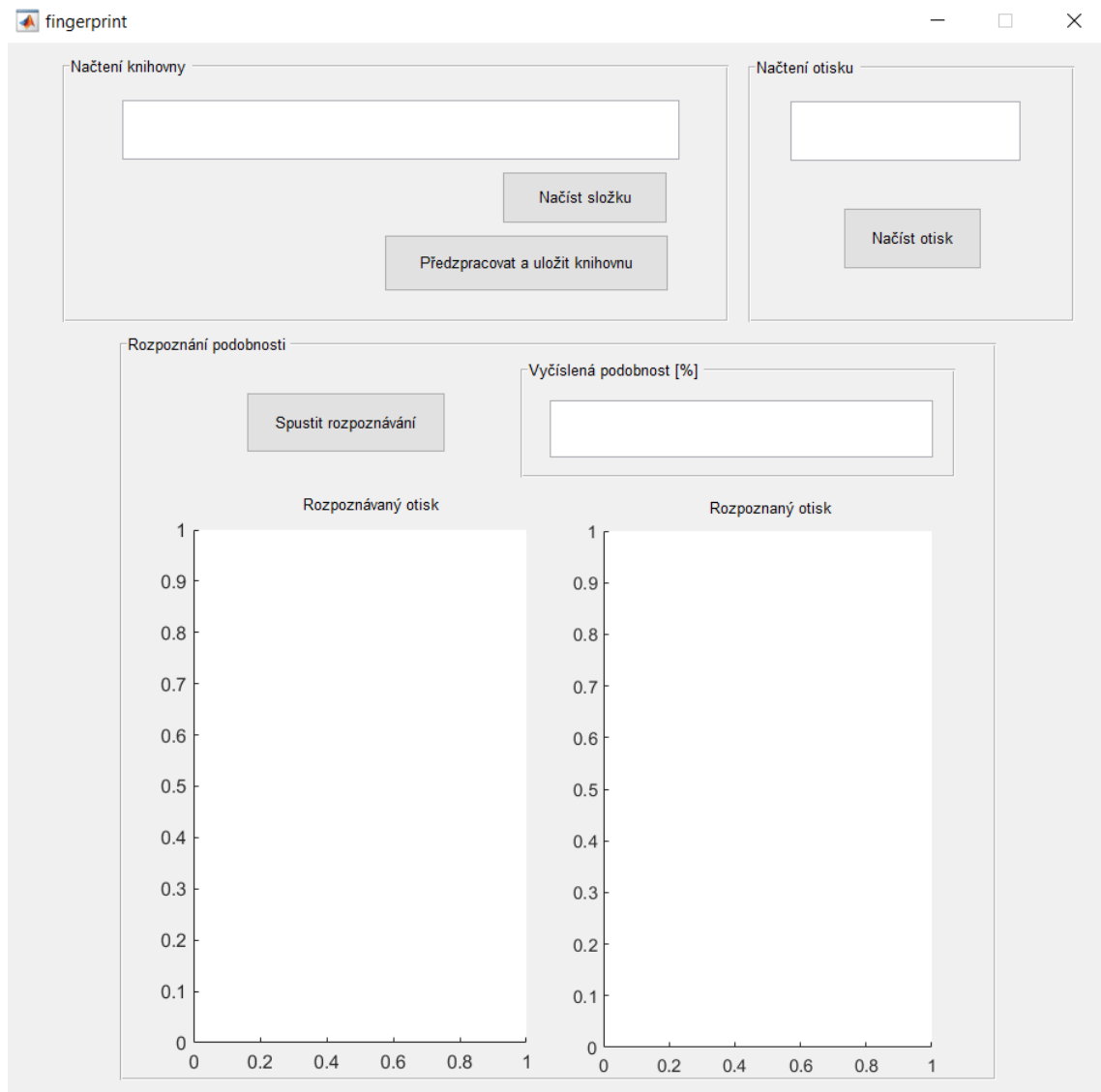
Pro vyčíslení podobnosti dvou otisků je nejdříve v rámci GUI načtena databáze otisků, kde se otisky od jedné osoby vyskytují pouze po jednom. Tato databáze je předzpracována a pro každý otisk je vytvořeno buňkové pole euklidovských vzdáleností od referenčního bodu, který v tomto případě představuje jádro otisku.

Při přidání otisku pro porovnání s databází jsou všechny vzdálenosti markantů normalizovány a je spočítána euklidovská vzdálenost mezi porovnávaným otiskem a všemi šablonami v databázi.

Výsledná podobnost je vyčíslena procentuálně, a to odečtením výsledné sumované vzdálenosti od jedničky a vynásobením 100 %. Otisk je vyhodnocen jako souhlasný v případě podobnosti vyšší než 80 %.

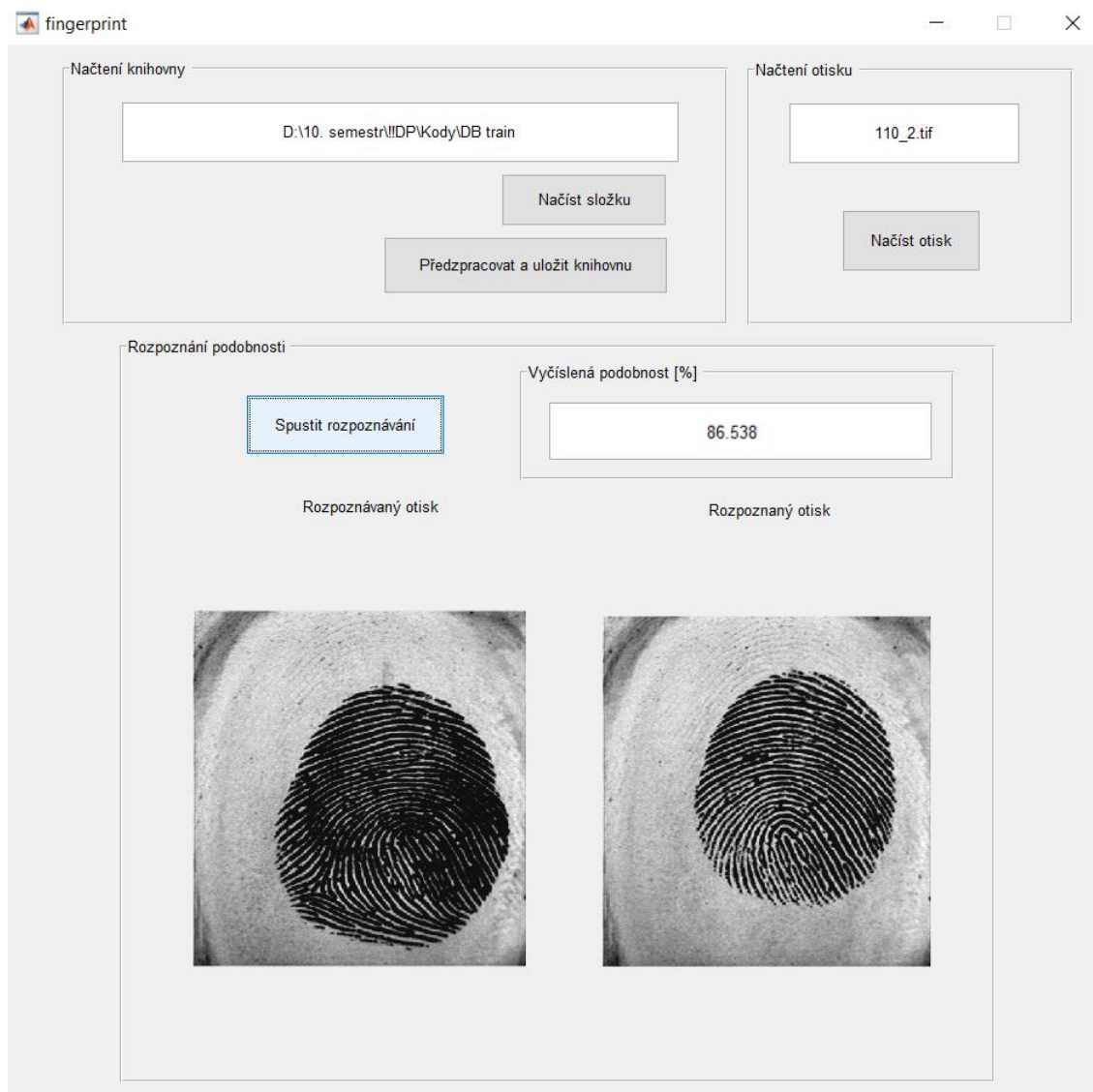
6.6 Grafické uživatelské rozhraní

Pro přehlednější užívání byl algoritmus opatřen grafickým uživatelským rozhráním (GUI). Při spuštění hlavního programu se otevře úvodní okno grafického rozhraní, zobrazené na *obrázku 25*. Prvním krokem pro správný běh programu je načtení knihovny stiskem tlačítka *Načíst složku*. Dalším krokem pak je Stisknout tlačítko „Předzpracovat a uložit knihovnu“. Toto tlačítko provede předzpracování a extrakci markantů do šablony pro celou zvolenou složku. Dalším logickým krokem je pak načtení otisku, jež je třeba identifikovat. Po jeho načtení Zbývá stlačit poslední možné tlačítko *Spustit rozpoznání*.



Obrázek 25: Úvodní GUI.

Vyhodnocenou podobnost poté program vypíše a zobrazí shodné otisky. Tento případ správného rozpoznání lze pozorovat na *obrázku 26*.



Obrázek 26: Správně rozpoznávaný otisk prstu v GUI.

Grafické uživatelské rozhraní také zobrazuje v editovatelných textových polích vybranou složku pro knihovnu referenčních otisků a název vybraného otisku pro porovnání.

7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Program byl otestován na kombinaci dvou veřejných databází *DB_2* a *DB_3* z roku 2000 pro mezinárodní soutěž v návržení vhodného algoritmu pro zvýraznění a porovnání podobnosti otisků prstů FVC (*Fingerprint Verification Competition*). [14]

Tabulka 1 ukazuje matici záměn výsledků testování algoritmu.

		Skutečnost	
		Shoda	Neshoda
Výsledek rozpoznání	Shoda	5	11
	Neshoda	30	4

Tabulka 1: Matice záměn.

Pro vyhodnocení experimentální míry chybovosti byla vytvořeno a do knihovny zaneseno 15 otisků verifikovaných uživatelů, od nichž mělo proběhnout 35 oprávněných povolených přístupů (35 testovaných otisků, jež měly svůj souhlasný pár ve verifikované knihovně) a 15 neoprávněných zamítnutých přístupů (15 testovaných otisků, jež neměly svůj souhlasný otisk ve verifikované knihovně).

Z 15 neoprávněných přístupů bylo 11 chybně vyhodnoceno jako oprávněných a z 35 oprávněných přístupů bylo 35 vyhodnoceno správně jako oprávněných.

Ovšem pro 30 oprávněných přístupů byl chybně spárován verifikovaný otisk s otiskem z knihovny verifikovaných uživatelů. To tedy znamená, že uživatel byl správně vpuštěn, ale chybně mu byla přiřazena identita.

Z prezentovaných statistických výsledků je patrné nemalé selhání algoritmu v identifikaci osob na základě rozpoznávání otisků prstů. Hlavním problémem v celé detekci je nedostatečné zpracování extrahovaných příznaků.

I když byly markanty i jádro zcela správně detekovány, algoritmus je nedokázal správně porovnat s dalšími takto extrahovanými příznaky druhého otisku. Myšlenkou bylo porovnat vzdálenosti nalezených markantů od referenčního bodu a získat vzdálenosti těchto hodnot a z těch pak vhodně vyčíslit podobnost, v případě otisků prstů se jako referenční bod příhodně vybízelo jádro otisku.

Dalším užitečným příznakem pro vyhodnocení podobnosti by bylo stanovení rozdílů mezi orientacemi v bodě markantu a orientací v referenčního bodu, tedy v jádře otisku. Hodnoty orientací jsou snadno získatelné z obrazu orientací, jež sloužil jako jeden ze vstupů pro Gaborovu filtraci.

Všechny otisky ve vybrané databázi byly vhodně předzpracovány. Počínaje segmentací otisku od pozadí metodou strukturní analýzy, následným normalizováním a vypočítáním lokální orientace papilárních linií a lokální frekvencí papilárních linií. Normalizovaný a segmentovaný obraz spolu s obrazem orientací a obrazem frekvencí umožnil výsledné úspěšné předzpracování všech testovaných otisků.

Otisky zvýrazněné bankou Gaborových filtrů byly binarizovány a skeletonizovány a tím byly získány finálně předzpracované obrazy. Z nich byly extrahovány příznaky v podobě markantů a jejich pozic a také pozice jádra otisku.

Rozšířením získaných charakteristik a následným vhodnějším vyčíslením podobnosti by algoritmus dával kvalitnější výsledky.

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámení s pojmy identifikace, biometrie a identifikace otisku prstu. Zvláštní pozornost je v práci 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 Technik vyhodnocení podobnosti otisků prstů.

Mezi existujícími metodami převažují metody využívající 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 metody pak kombinují více charakteristik otisku prstu, ať už globální jasový profil snímku či jiné lokální charakteristiky.

V praktické části je realizován algoritmus pro předzpracování snímků otisků prstů, extrakci vhodných příznaků, vyčíslení podobnosti a vyhodnocení shody dvou otisků.

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.

Identifikátor byl také otestován na zkušební soutěžní databázi FVC (*Fingerprint Verification Competition*) z roku 2000. Výsledky testování byly statisticky vyhodnoceny a odhalily chybovost navrženého algoritmu, jež spočívá převážně ve velkém množství falešně shodně identifikovaných otisků. V rámci diskuze byly detailně vyhodnoceny a rozebrány příčiny chybovosti.

I přes nepřesnou identifikaci navrženého algoritmus velmi spolehlivě zvýrazňuje vstupní snímky otisků prstů, spolehlivě detekuje specifické příznaky otisků v podobě markantů a jádra otisku prstu.

Přidáním jednoduchého příznaku v podobě rozdílu orientace markantů vůči orientaci referenčního jádra by byla spolehlivost a přesnost realizovaného algoritmu podstatně navýšena.

V rámci diplomové práce byly splněny všechny body zadání, navržený algoritmus zvolením vhodných příznaků vyčísluje podobnost dvou otisků na základě komplexního předzpracování a analýzy snímků.

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
- [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
- [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
- [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] SMÉKAL, O. *Biometrie otisku prstu: Bakalářská práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010, 42s., 2 příl. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Fedra.
- [10] ŠIKUDOVÁ, Elena, Zuzana ČERNEKOVÁ, Wanda BENEŠOVÁ, Zuzana HALADOVÁ a Júlia KUČEROVÁ. *Počítačové videnie*. Praha, 2014, 378s. ISBN 978-80-87925-06-5.

- [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 také z: <http://livdet.org/registration.php>
- [14] Fingerprint Verification Competition [online]. Dostupné také z: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2000/download.asp>
- [15] THAI, Raymond. *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction* [online]. 2003, , 71. Dostupné z: <https://www.peterkovesi.com/studentprojects/raymondthai/RaymondThai.pdf>
- [16] 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>
- [17] *International Journal of Computer Applications* [online]. 2010, **1**(15) [cit. 2020-05-29]. ISSN 09758887. Dostupné z: <http://www.ijcaonline.org/journal/number15/pxc387482.pdf>