

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

BIOMETRICKÁ IDENTIFIKACE OTISKU PRSTU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

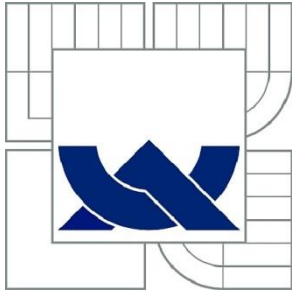
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

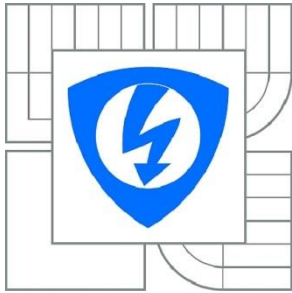
Bc. MICHAL RUTTKAY

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

BIOMETRICKÁ IDENTIFIKACE OTISKU PRSTU

BIOMETRIC FINGERPRINT IDENTIFICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

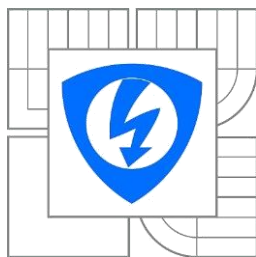
AUTHOR

Bc. MICHAL RUTTKAY

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN VÍTEK, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské inženýrství a bioinformatika

Student: Bc. Michal Ruttkay
Ročník: 2

ID: 133981
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Biometrická identifikace otisku prstu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Nastudujte a popište metody biometrické identifikace otisku prstu. Zaměřte se především na příznaky, které se k identifikaci používají. 2) S využitím volně dostupných databází vytvořte vlastní testovací databázi otisků prstů. 3) Na základě nastudovaných metod zvolte sadu příznaků vhodnou pro identifikaci otisku prstu. 4) S ohledem na zvolené příznaky navrhnete a v prostředí Matlab realizujte vhodné předzpracování obrazů. 5) Realizujte algoritmus identifikace otisku prstu založený na kombinování zvolených příznaků. 6) Navržený algoritmus otestujte a dosažené výsledky statisticky zpracujte. Účinnost algoritmu porovnejte s ostatními autory. 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 978-80-254-8979-6.
[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: 9.2.2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Martin Vítek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

Předseda oborové rady

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

Diplomová práce popisuje anatomické vlastností otisků prstů a jejich uplatnění při identifikaci osoby. V teoretické části se popisuje význam papilárních linií na otiscích prstů, statistické vyhodnocení a především předzpracování obrazů. V praktické části jsou uvedeny potřebné operace k porovnání otisků prstů. Realizace byla provedena v programovém prostředí Matlab.

Klíčová slova

otisk prstu, markant, singulární body, předzpracování obrazu, identifikace

Abstract

This thesis describes the anatomical characteristics of fingerprints and their applications in identifying the person. The theoretical part describes the importance of papillary lines on fingerprints, statistical analysis and pre-processing of images in particular. The practical section provides the necessary operations to compare fingerprints. The implementation was done in Matlab.

Keywords

fingerprint, minutae, singular point, image pre-processing, identification

Bibliografická citace mé práce:

RUTTKAY, M. *Biometrická identifikace otisku prstu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 70 s. Vedoucí semestrální práce
Ing. Martin Vítek. Ph.D

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj diplomový projekt na téma biometrická identifikace otisku prstu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomového projektu 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 uvedeného diplomového projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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. 40/2009Sb.

V Brně dne:

podpis autora:

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Vítkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, vynaloženou snahu o vysvětlení a další cenné rady, které mi byly nápomocné při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

podpis autora:

Obsah

1. Úvod	1
2. Biometrie.....	2
2.1. Biometrické vlastností	2
2.2. Biometrické systémy.....	4
3. Otisk prstu	6
3.1. Charakteristiky otisku prstu	6
3.2. Vznik otisku prstu.....	7
3.3. Singulární body	8
3.3.1. Detekce singulárních bodů - Poincarého index.....	9
3.4. Markanty.....	11
3.4.1. Detekce markantních bodů – založená na morfologii	13
3.4.2. Detekce markantních bodů – Crossing Number (CN)	14
4. Metody porovnávání otisků prstů.....	15
4.1. Metody založené na korelaci	15
4.2. Metody založené na markantech	17
4.3. Metody založené na charakteristických rysech papilárních linií	18
5. Vznik databáze otisků prstů	20
5.1. Snímání otisků prstů	20
5.2. Senzory.....	21
5.2.1. Požadavky na senzory.....	21
5.3. Formát otisků prstů.....	22
6. Statistické hodnocení spolehlivosti.....	24
6.1. Pravděpodobnost chybného přijetí (FAR)	24
6.2. Pravděpodobnost chybného zamítnutí (FRR).....	25
6.3. Pravděpodobnost chybné shody (FMR)	25
6.4. Pravděpodobnost chybné shody (FNMR).....	25

7. Předzpracování obrazu.....	27
7.1. Normalizace obrazu	28
7.2. Výpočet pole orientací.....	29
7.3. Odhad frekvencí papilárních linií	31
7.4. Filtrace Gaborovými fitry	33
7.5. Binarizace a skeletonizace obrazu	34
8. Praktická část.....	35
8.1. Načtení a normalizace obrazu	35
8.2. Předzpracování otisku prstu	36
8.3. Analýza otisku prstu.....	39
8.4. Porovnávání otisku prstu	41
8.5. Vyhodnocení výsledků	44
8.6. Grafické uživatelské rozhraní GUI.....	50
9. Závěr.....	51
10. Seznam obrázků	52
11. Seznam tabulek	54
Literatura	55
Seznam použitých zkratk	57
Seznam symbolů.....	58
Seznam příloh	60

1. Úvod

Vypracovaná diplomová práce je na téma identifikace podle otisků prstů. V teoretické části práce jsou popsány vlastnosti otisků prstů, druhy singulárních bodů a markant, které jsou vytvořeny papilárními liniemi. Popisují se zde základní metody srovnávání otisků: metoda založena na markantech, na korelaci a na vlastnostech papilárních linií. Dále je zde teoreticky popsán výpočet pravděpodobností účinnosti systému k identifikaci dané osoby, předzpracování obrazů a detekce singulárních bodů a markant. V praktické části je na základě teorie vytvořeno předzpracování otisků prstů, detekce markantů a singulárních bodů. V této části je vyhodnocena i účinnost programu. Vytvořený program k identifikaci otisků je naprogramován v prostředí Matlab.

Identifikace osob na základě otisku prstu je čím dál více využívána v běžném životě. Otisk prstu je používán především svou jedinečností a časovou stálostí, který je vytvořen papilárními liniemi. Manuální vyhodnocování je časově velmi náročné z důvodů sekvenčního vyhledávání a porovnávání otisků. Zefektivnění procesu identifikace bylo docíleno použitím výpočetní techniky, která umožnila zautomatizovat analýzu, porovnávání otisků prstů a především zjednodušení archivování otisků.

Spolehlivé a uživatelsky přívětivé ověření totožnosti je potřebné v osobním i profesním životě. Běžné způsoby identifikace jsou založeny na nejrůznějších heslech, certifikátech a dokladech. Další možností identifikace jsou založeny na anatomických a behaviorálních vlastnostech. Těmito vlastnostmi se zabývá vědní obor nazvaný biometrie.

2. Biometrie

Vědní obor sloužící k měření biologických (anatomických a fyziologických) vlastností a chování živých organismů se nazývá biometrie. Je odvozena z řeckých slov “bios“ (život) a “metron“ (měřit). Pod pojmem biometrie v oboru IT rozumíme proces automatizované metody rozpoznávání jedince na základě biologických (např. otisk prstu, sítnice, duhovka) a behaviorálních (např. chůze, dynamika podpisu, ověření hlasu, chůze, dynamika stisku počítačové klávesy) vlastnostech, zatímco v biomedicinské oblasti tento pojem znamená statistický výpočet v biologii nebo medicíně. [1], [3]

2.1. Biometrické vlastnosti

Hlavní myšlenka identity: každá osoba je identická jen a pouze sama se sebou. Pro efektivní identifikaci osoby je nutná jedinečnost fyzických a psychických vlastností, které jsou pro každého člověka přirozené už od narození a je téměř nemožné je absolutně napodobit nebo pozměnit. [2]

Rozdělení biometrických vlastností:

1. Anatomické (fyzické statické) vlastností – Statické vlastnosti

Identifikace podle statických vlastností je pomocí jednoho konkrétního znaku, který představuje jednu konkrétní biometrickou vlastnost. Tento znak je časově stálý a unikátní. Tato metoda bývá označována jako metoda statická. [1]

Seznam anatomických vlastností [1]:

- otisk prstu
- obličej
- duhovka oka
- sítnice oka
- geometrie ruky
- dlaň

- termogram obličeje
- termogram ruky
- dentální obraz
- podpis (statická forma)
- tvar ucha
- snímek nehtu
- DNA

2. Behaviorální (dynamické) vlastností

Identifikace podle dynamických vlastností je spojena s aktivní účastí pozorované osoby. Behaviorální biometrické vlastností jsou unikátní, ale v závislosti na čase mohou být nestálé.

Behaviorální (dynamické) vlastností [1]:

- hlas / řeč
- mimika obličeje a pohyb rtů
- podpis
- dynamika stisku kláves
- chůze

Mezi hlavní charakteristiky při výběru biometrického systému patří[1]:

- univerzalita – každá osoba disponuje touto vlastností
- jedinečnost – vlastnost u osoby je jedinečná
- konstantnost – daná vlastnost je časem neměnná
- získatelnost – vlastnost musí být snadno měřitelná
- výkonnost – nesmí dojít ke změně a zestárnutí dané vlastnosti → vliv na výkonnost systému
- akceptace – souhlas uživatelů k nasnímání dané vlastnosti
- odolnost proti falšování – obtížnost vytvoření falsifikátu dané vlastnosti
- cena – náklady na pořízení systému s danou vlastností

Tabulka 1: Přehled biometrických parametrů

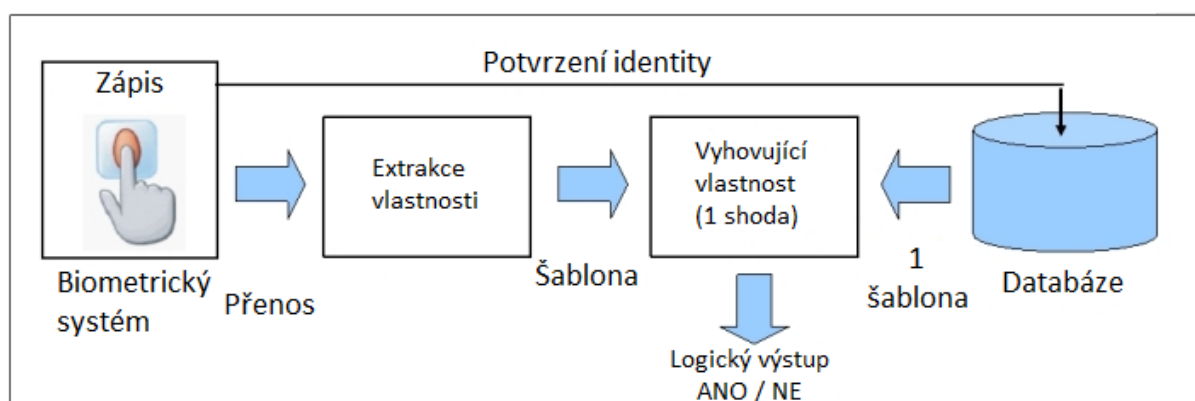
	univerzalita	jedinečnost	konstantnost	získatelnost	výkonnost	akceptace	odolnost proti falšování	cena
obličej	vysoká	nízká	střední	vysoká	nízká	vysoká	nízká	nízká
otisk prstu	střední	vysoká	vysoká	střední	vysoká	střední	vysoká	nízká
geometrie ruky	střední	střední	střední	vysoká	střední	střední	střední	střední
žíly ruky	střední	střední	střední	střední	střední	střední	vysoká	střední
duhovka	vysoká	vysoká	vysoká	střední	vysoká	nízká	vysoká	vysoká
sítnice	vysoká	vysoká	střední	nízká	vysoká	nízká	vysoká	vysoká
podpis	nízká	nízká	nízká	vysoká	nízká	vysoká	nízká	nízká
hlas	střední	nízká	nízká	střední	nízká	vysoká	nízká	nízká
termogram	vysoká	vysoká	nízká	vysoká	střední	vysoká	vysoká	vysoká

2.2. Biometrické systémy

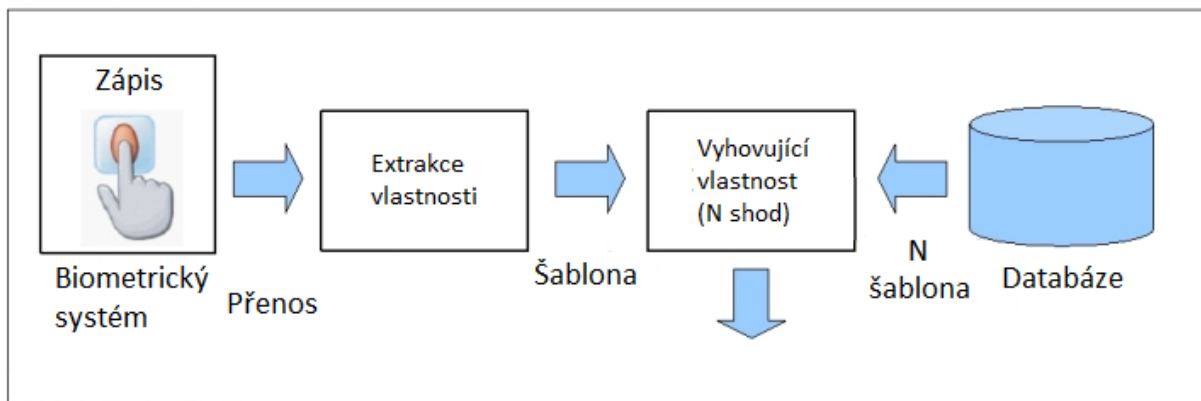
Biometrické systémy lze rozdělit na dva základní typy. Je to systém ověřovací a systém identifikační.

V systému pro ověřování vstupem je ověření identity a biometrického zápisu. Systém porovnává nasnímaný biometrický záznam s uloženými záznamy v databázi, přičemž dochází k ověření identity. Takový systém slouží pouze k porovnávání. [4]

V identifikačním systému je vstupem pouze biometrický záznam. Systém musí prohledávat velkou databázi biometrických údajů podobných s hledanými biometrickými daty. Tento systém provádí spoustu porovnávání a poté se musí rozhodnout, zda výsledné data patří stejné osobě. [4]



Obrázek 1: Schéma ověřovacího systému [4]



Obrázek 2: Schéma identifikačního systému [4]

Biometrické systémy se dělí i podle počtu použitých biometrických vlastností na systémy unimodální a multimodální.

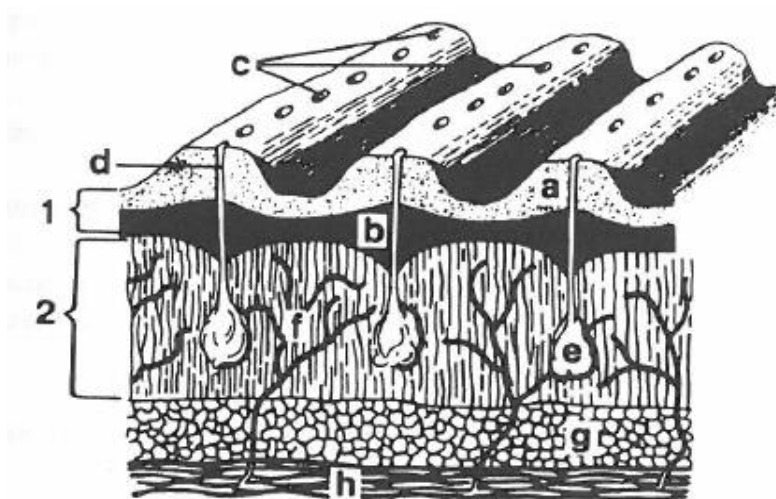
- O unimodálním systému hovoříme tehdy, používá-li systém pouze jednu biometrickou vlastnost. Takový systém má nižší spolehlivost při klasifikaci.
- Multimodální systém slouží k použití více příznaků jedné biometrické vlastnosti (např. podpis – statické a dynamické vlastností) nebo použití více biometrických vlastností (rozpoznání obličeje a duhovky současně). Ve srovnání s unimodálním systémem je multimodální spolehlivější na rozpoznání a odolnější proti falšování identit. [1]

3. Otisk prstu

Otisk prstu je tvořen grafickou reprezentací papilárních linií neboli dermatoglyfy, které se vyskytují na povrchu prstů jak u rukou, tak u nohou už během embryonálního vývoje. Výjimka je u lidí postižených různými poruchami kůže. Papilární linie jsou pro každou osobu unikátní a určují fyzickou identitu člověka. Papilární linie jsou neměnné na čase, ale v případě poškození zárodečné vrstvy je poškození nevratné. [1]

3.1. Charakteristiky otisku prstu

Na vnitřní straně rukou a spodní straně chodidel se na povrchu vyskytuje jedinečná prostorová kresba, kterou tvoří papilární linie. Kůže se skládá ze tří základních vrstev: z pokožky, škály a podkožního vaziva viz. Obrázek 3. V druhé vrstvě kůže (dermis) se nacházejí papily, které jsou na hranici pokožky a škály (dermis). Papily jsou zvlněné za účelem větší plochy, kterou mohou živiny pronikat do pokožky. Z tohoto důvodu je možná identifikace podle otisku prstu. Výška papilárních linií je v rozmezí 0,1 - 0,4 a šířka v rozmezí 0,2 – 0,5 mm. [1] [5]



Obrázek 3: Schéma stavby kůže s papilárními liniemi (podle Borovanského): 1- pokožka, 2- škára, a- rohová vrstva, b-zárodečná vrstva, c- póry, d- vývody potních žláz, e- potní žlázy, f- cévy, g- podkožní tuk, h- svalstvo. [1]

Tři základní zákonnosti využití otisku prstu pro identifikaci [1]:

1. Stálost papilárních linií:

Kresba papilárních linií se během života téměř nemění. V průběhu vývoje člověka dochází ke změně pokožky a tedy i kreseb papilárních linií, např. absolutní velikost otisku, výskyt vrásek, ale v těchto případech zůstává sled, skladba a relativní vzdálenost papilárních linií.

2. Neodstranitelnost papilárních linií:

Papilární linie při poškození mají tendenci obnovy do původního stavu, ale v případě zranění zárodečné vrstvy kůže je poškození nevratné.

3. Individuálnost kreseb papilárních linií:

Neexistují dva jedinci a to ani v případě jednovaječných dvojčat, kteří by měli kresby papilárních linií identické. Toto tvrzení je dáno velkým počtem markantů na otisku prstu. Pravděpodobnost shody dvou otisků prstů je 1 : 64 miliardám.

3.2. Vznik otisku prstu

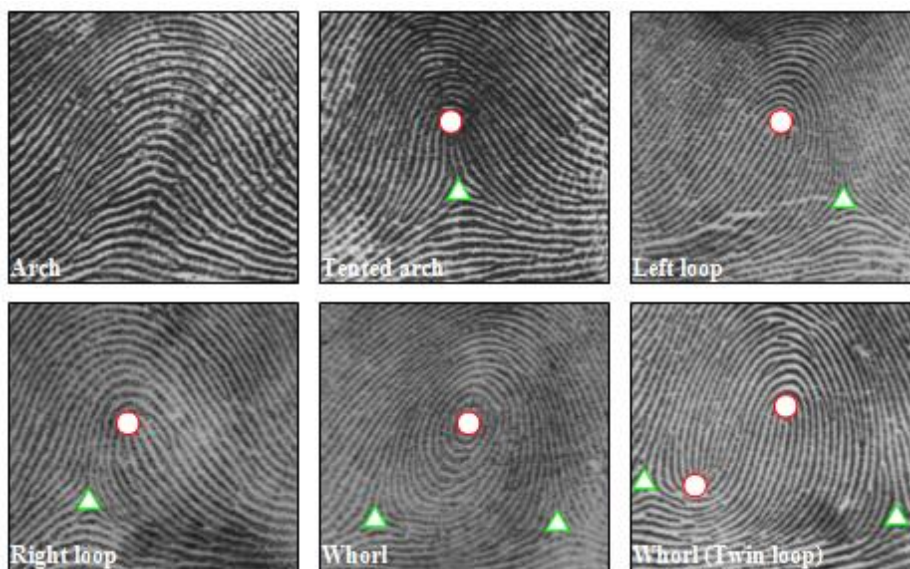
Otisk prstu vzniká při kontaktu s objektem, který má schopnost tuto informaci zachovat. Existují tři možné druhy: objemové, viditelné a latentní.

1. Objemové (plastické) daktyloskopické stopy jsou v materiálech, ve kterých je zachován detail otisku prstu a materiál má schopnost měnit svůj tvar, tzv. plastická deformace. Mezi tyto objekty například patří vosky, plastelína, ale i potraviny, např. sýr. Výsledný reliéf je zrcadlově otočen. [5]
2. Viditelná daktyloskopická stopa vznikne v případě otisku vhodné látky na povrchu papilární linie. Předměty, které přišly do kontaktu s přenášenou látkou (barva, krev) na prstu vytvoří otisk, který je zřejmý pomocí lidského oka. [5]
3. Latentní daktyloskopická stopa je obvykle tvořena potem, který se skládá z vody, kyseliny mléčné, chloridu sodného, močoviny, aminokyselin a tuků. Latentní otisky jsou většinou lidským okem neviditelné, ale v některých případech vhodným nasvícením se mohou

zviditelnit. Další způsoby zviditelnění jsou založeny na fyzikálních, chemických a fyzikálně-chemických metodách. Ve výjimečných případech se používají k zviditelnění otisků i speciální metody, mezi které patří autoelektronografie, fluorotec a metody založené na laserové technice. [5]

3.3. Singulární body

Každý otisk prstu má charakteristický vzor, který je dán polohou a počtem singulárních bodů. Mezi singulární body patří jádro a delta. Bod delta je charakterizován jako místo, ze kterého se papilární linie rozbíhají do tří různých směrů. Jádro na otisku prstu připomíná vrchol, kolem kterého se stáčí papilární linie. Z důvodu snížení počtu porovnávání otisků prstů a ke zlepšení odezvy procesu identifikace, bylo nutné rozdělit otisky prstů do několika předdefinovaných tříd, kdy po zjištění odpovídající třídy, byl otisk prstu porovnáván pouze s podmnožinou otisků prstů v databázi. Klasifikační systémy v současné době využívají tzv. Henryho klasifikační schéma. V dnešní klasifikační technice se využívá pět tříd (oblouk, klenutý oblouk, spirála / závit / vír, levá smyčka, pravá smyčka), viz. Obrázek 4. Otisky prstů jsou nerovnoměrně rozděleny do klasifikačních tříd v přibližném odhadu, viz. Tabulka 2. [2] [6]



Obrázek 4: Rozdělení otisku podle singulárních bodů (Δ - delta, O - jádro) [6] (Z levé strany: oblouk, klenutý oblouk, smyčka vlevo, smyčka vpravo, spirála, dvojitá smyčka)

Definice klasifikačních tříd [2]:

- **oblouk** – charakterizován mírným obloukem papilárních linií ve středové části. Neobsahuje žádné singulární body (jádro, delta).
- **klenutý oblouk** - charakterizován strmým obloukem papilárních linií ve středové části. Obsahuje jádro a delta.
- **levá smyčka** – papilární linie vedoucí z levé části otisku prstu vytvářejí ve střední části oblouk a vracejí se zpět na levou stranu. Obsahuje jádro a delta.
- **pravá smyčka** – papilární linie vedoucí z pravé části otisku prstu vytvářejí ve střední části oblouk a vracejí se zpět na pravou stranu. Obsahuje jádro a delta.
- **spírala / závit / vír** – papilární linie jsou ve tvaru spirálového obrazce, který obsahuje tři singulární body (2 x delta, 1 x jádro)
- **dvojitá smyčka** – papilární linie vytváří obrazec, obsahující dva jádra a dvě delty.

Tabulka 2: Výskyt klasifikačních tříd

Klasifikační třída	Výskyt klasifikační třídy
oblouk	3,7 %
klenutý oblouk	2,9 %
spírala, závit, vír	27,9 %
levá smyčka	33,8 %
pravá smyčka	31,7 %

3.3.1. Detekce singulárních bodů - Poincarého index

Poincarého index slouží k jednoduché detekci singulárních bodů na otisku prstu. Tato metoda počítá singulární body z orientační mapy (θ), která byla vytvořena z původního obrazu. Pro každý bod (i, j) orientační mapy jsou počítány Poincarého indexy $P(i, j)$. Tyto hodnoty jsou dány součtem rozdílů mezi sousedními body orientačního pole. V závislosti na hodnotě bodu $P(i, j)$ může být identifikován jako jádro nebo delta. Je-li hodnota v bodě $P(i, j)$ rovna $1/2$ je singulární bod vyhodnocen jako jádro. Singulární bod delty je označen

v obraze za předpokladu hodnoty $P(i, j)$ rovné $-1/2$. V jiném případě se nejedná o singulární bod. [14]

Rovnice pro výpočet mezi sousedními body pro $0 \leq k \leq 6$ [14]:

$$\delta_k(i, j) = \theta(i_{k+1}, j_{k+1}) - \theta(i_k, j_k)$$

Rovnice pro výpočet mezi sousedními body pro $k = 7$:

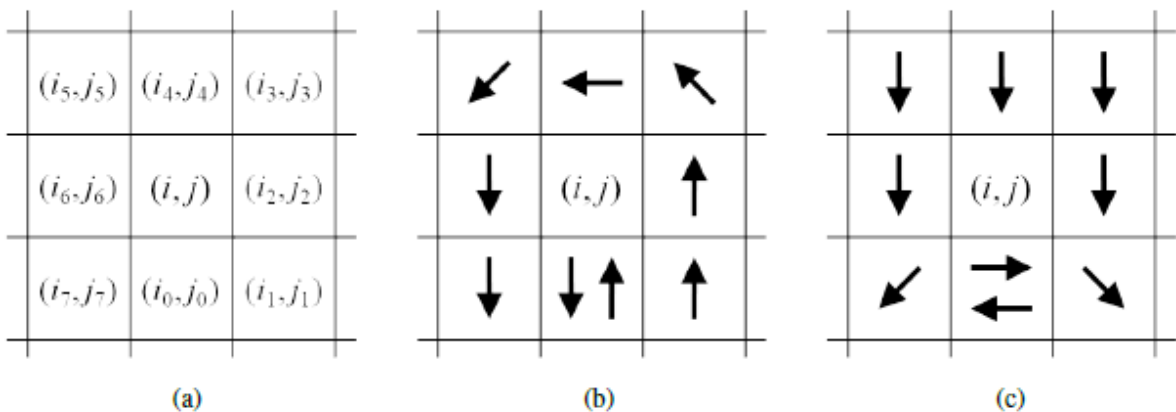
$$\delta_7 = \theta(i_0, j_0) - \theta(i_7, j_7)$$

Poincarého index je vypočítán z následující rovnice:

$$P(i, j) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^7 \Delta_k(i, j)$$

,kde

$$\Delta_k(i, j) = \begin{cases} \delta_k(i, j) & \text{if } |\delta_k(i, j)| < \pi \\ \pi + \delta_k(i, j) & \text{if } \delta_k(i, j) \leq -\pi \\ \pi - \delta_k(i, j) & \text{jinak} \end{cases}$$

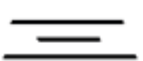

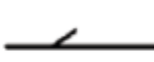


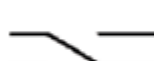


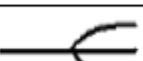





Obrázek 5: a) pozice pro výpočet Poincarého indexu, b) směry odpovídající jádru, c) směry odpovídající deltě [14]

3.4. Markanty

Identifikace otisku prstu je založena na základě speciálních útvarů, které vytvářejí papilární linie. Tyto útvary, které mají velkou identifikační hodnotu, slouží jako identifikační materiál k určení dvou stejných otisků. Markanty lze určit po stránce kvalitativní a kvantitativní. Kvalitativně určujeme tvar daktyloskopického znaku, mezi který například patří začátek nebo konec papilární linie nebo vidlice, viz. Tabulka 3. Kvantitativně vyjadřujeme vzájemnou polohu znaků, které se určí počtem papilárních linií mezi sebou. Dojde-li ke shodě těchto charakteristických znaků po kvantitativní i kvalitativní stránce je identifikační proces u konce. [1] [2]

Tabulka 3: Daktyloskopické markanty [2]

Vzhled markantů	Název popisu	Identifikační hodnota	Popis
	krátká linie	2	Papilární linie ve tvaru úsečky leží uprostřed dvou rovnoběžných přímek Papilárních linií
	začátek a konec	1	Papilární linie má tvar polopřímky
	háček	2,1	Papilární linie se rozděluje, jedna není delší než 3 mm
	mústek	2,3	Dvě Papilární linie jsou spojeny další linií, ne však delší než 3 mm
	křížení	3,1	Dvě Papilární linie se kříží
	zdvojení	2,6	Zdvojení dochází u dvou paralelních linií. Jedna protilehlá dvojice je přerušena, u druhé dochází k propojení protilehlých linií
	posunutí	2,4	Jednoduchá Papilární linie je přerušena a oba konce jsou vyhnuty směrem ven
	dvojitá vidlice	1,3	Papilární linie se rozděluje ve dvě, které jsou delší než 3 mm, jsou přibližně paralelní
	trojitá vidlice	3,7	Obdoba dvojitě vidlice. Vidlice jsou však tři
	tečka	1,7	Samostatně stojící papilární linie ve tvaru tečky. V nejbližším okolí nejsou žádné papilární linie
	očko	2,4	Papilární linie se spojí do kruhu, ne větším než 3 mm
	ostrůvek s čárkou	2,8	Papilární linie, ne delší než 6 mm, je uzavřena do kruhového prostoru

Mezi další používané markanty patří ostrůvek, který je podobný očku, ale kruhová oblast je větší než 6 mm. Dále sem patří uzavřená smyčka (mezi dvěma papilárními liniemi je vytvořen prázdný prostor) a speciální znak (zřídka se vyskytující tvar, např. otazník). [2]

Zastoupení jednotlivých markant v populaci není stejný, z tohoto důvodu byl zaveden pojem identifikační hodnota, která je vyjádřena vztahem [2]:

$$I = -\log n \quad (3.1)$$

kde:

I – identifikační hodnota markantu

n – počet přítomností markantů na 1 mm^2

Nezbytný počet markantů ke stanovení vzájemné shody otisku prstu byl vyjádřen podle matematického vztahu [2]:

$$P = -\log \frac{1}{N} = \log N \quad (3.2)$$

kde:

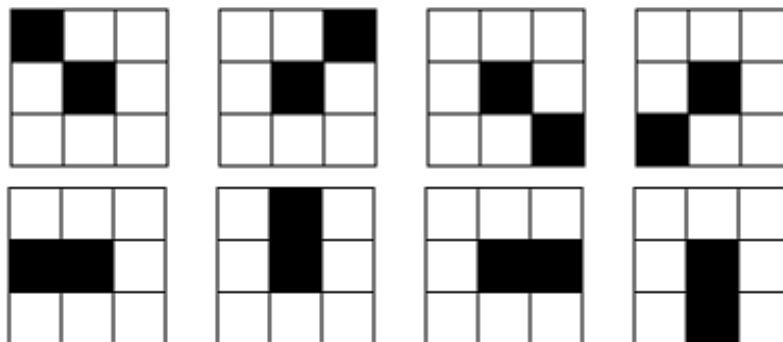
P – suma identifikačních hodnot jednotlivých charakteristik znaků v otisku prstu

N – otisky prstů všech osob

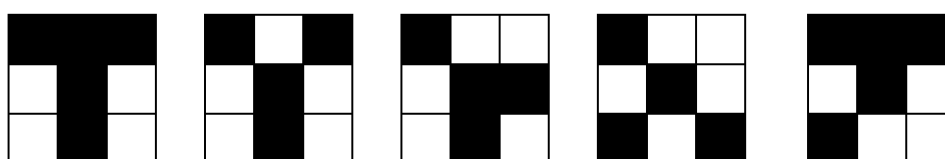
Ze vztahu vyplývá hodnota $P = 10,69897$ za předpokladu, že je na planetě zemi cca 5 miliard osob, kteří vytvoří otisk prstu. Z výsledné hodnoty P je zřejmé, že při shodě 10 a více markantů dojde k identifikaci. [2]

3.4.1. Detekce markantních bodů – založená na morfologii

Tato technika využívá morfologických operátorů k extrakci markantních bodů ze skeletu obrazu. Morfologické operátory jsou v podstatě masky o velikosti [3x3], které umožňují identifikaci hledaných tvarů ve skeletu obrazu [15]. Různým typům markantů odpovídají různé morfologické masky, kterými se prohledává obraz. V případě nálezu hledaného tvaru v obraze se ukládá jeho poloha a typ. Markantní bod ukončení může být zakončen ve dvou formách a to diagonálně nebo horizontálně (popř. vertikálně). Pro tyto dva typy ukončení jsou vytvořeny odpovídající masky i s rotacemi po 90°, tedy celkově 8 masek. Pro markantní bod typu rozdvojení existuje více masek, které slouží k detekci např. tvar T, Y.



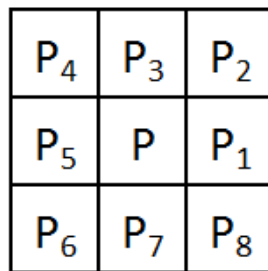
Obrázek 6: morfologické operátory ukončení



Obrázek 7: morfologické operátory rozdvojení

3.4.2. Detekce markantních bodů – Crossing Number (CN)

Počet křížení, neboli Crossing Number (CN), je nejčastěji používaná metoda z důvodu své jednoduchosti a především nízké výpočetní náročnosti. Tato metoda se používá na skelet obrazu, kterým se pohybuje maska o velikosti [3x3]. Ve výsledné masce se porovnává osmi okolí kolem centrálního bodu, který představuje zkoumaný pixel. Výsledek této metody je definován jako polovina součtu rozdílů mezi dvojicemi sousedních pixelů v osmi okolí a může nabývat hodnot 1 až 4. [15]



Obrázek 8: maska osmi okolí

Rovnice pro výpočet CN:

$$CN = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 |P_i - P_{i+1}|$$

,kde $P_9 = P_1$.

Tabulka 4: Možné hodnoty CN

CN	Vlastnosti
1	bod ukončení
2	pokračující linie
3	bod rozdvojení
4	bod křížení

4. Metody porovnávání otisků prstů

Metody porovnávání otisků prstů spočívají ve srovnávání dvou otisků prstů a jejímu přiřazení. Jakýkoliv algoritmus počítá míru podobnosti každého otisku prstu založenou na jejich charakteristických rysech. Výsledná hodnota představuje pravděpodobnost v rozmezí 0 – 1. Zjištění shody otisků prstů je náročné vzhledem k řadě faktorů. Často mezi tyto faktory patří posunutí, rotace, zkreslení, šum a stav kůže. Existují tři kategorie porovnávání otisků prstů [4]:

- Metody založené na korelaci
- Metody založené na markantech
- Metody založené na charakteristických rysech papilárních linií

4.1. Metody založené na korelaci

Metodou založenou na korelační technice je vypočítaná korelace každého odpovídajícího pixelu, ale z důvodu velké výpočetní náročnosti se počítá korelace pouze v lokálním místě markant a singulárních bodů. Hledaný a vzorový otisk prstu bývá většinou neznámě posunut a otočen. Algoritmus je založen na extrakci markantních bodů, který se aplikuje na vzorový a hledaný otisk. Velikost okna ve vzorovém otisku je vždy větší než u otisku hledaného, aby hodnoty korelace byly tolerantní k malým chybám výpočtů umístění markantních bodů. Chybějící detail v hledaném otisku nemá vliv na shodu, pokud existuje alespoň jeden dobrý odhad posunutí a rotace. [4] [7]

Mezi vzorovým otiskem prstu T a hledaným Q je měřená odlišnost pomocí sumy čtverců mezi intenzitami odpovídajících pixelů (SSD) [8]:

$$SSD(T, Q) = \|T - Q\|^2 = (T - Q)^t(T - Q) = \|T\|^2 + \|Q\|^2 - 2T^t Q \quad (4.1)$$

Kde:

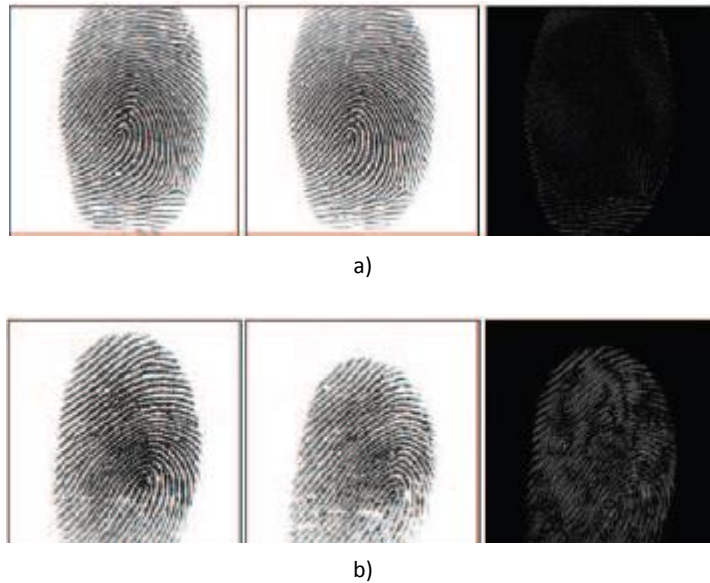
horní index „t“ – transpozice vektoru

T – vzorový otisk prstu

Q – hledaný otisk prstu

Předešlá rovnice nezahrnovala posun v osách x a y a rotaci θ , bylo tedy nutné zavést parametry u hledaného obrazu $Q^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}$. Stanovení podobnosti je dáno vztahem [8]:

$$S(T, Q) = \max_{\Delta x, \Delta y, \theta} CC(T, Q^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}) \quad (4.2)$$



Obrázek 9: Výsledky korelační metody a) rozdíly velmi malé b) velké rozdíly [18]:

Na obrázku jsou patrné 3 otisky prstů, kde první dva otisky jsou mezi sebou vzájemně korelovány. Výsledkem je obraz, jehož intenzita je úměrná ke shodě dvou porovnávaných otisků.

4.2. Metody založené na markantech

V otisku prstu je každý prvek markantní bod, který může být popsán pomocí různých vlastností, jako je umístění, orientace, typ atd. Nejběžnější určení markantů je pomocí umístění (x, y) , úhlu θ a typu. V každém otisku prstu v obrazech T a Q se může nacházet m (n) markant [8]:

$$T = m_1, m_2, \dots, m_m, \quad m_i = x_i, y_i, \theta_i, \quad i = 1 \dots m \quad (4.3)$$

$$Q = m'_1, m'_2, \dots, m'_m, \quad m'_j = x'_j, y'_j, \theta'_j, \quad j = 1 \dots n \quad (4.4)$$

Markanty m_i v obrazu T a m'_j v obrazu Q jsou považovány za shodné, pokud jsou splněny následující podmínky [8]:

$$sd(m'_j, m_i) = \sqrt{(x'_j - x_i)^2 + (y'_j - y_i)^2} \leq r_0 \quad (4.5)$$

$$dd(m'_j, m_i) = \min(|\theta'_j - \theta_i|, 360 - |\theta'_j - \theta_i|) \leq \theta_0 \quad (4.6)$$

r_0 a θ_0 jsou parametry tolerance okna, které jsou nutné pro kompenzaci chyby při extrakci příznaků a zkresleného otisku. Hodnota sd slouží k výpočtu euklidovské vzdálenosti a hodnota dd představuje rozdíl směrů. [8]

Správné zarovnání dvou otisků prstů vyžaduje znát geometrickou transformační funkci ($map()$), která mapuje markanty v otisku Q a T. Markantní shoda může být formulovaná jako [8]:

$$\max_p \sum_{i=1}^m match(map(m'_{p(i)}), m_i) \quad (4.7)$$

P je funkce, která určuje párování markantních bodů mezi otiskem Q a T. Algoritmus se pokouší najít odpovídající mapovací funkci, která odpovídá markantům mezi T a Q.

Metody jsou obecně založeny na globální a lokální shodě:

Globální shoda:

Tento postup se snaží současně sladit všechny markantní body. Zarovnání může být implicitní nebo explicitní. Implicitním zarovnáním se získává nejlepší shodné místo. Explicitní zarovnávání prvně zarovnává markantní body a poté vyhledává další shodné body. [8]

Lokální shoda:

Tento postup se snaží najít shodu v lokálních markantech. Lokální struktura má vlastností, které jsou neměnné vzhledem ke globální transformaci. [8]

4.3. Metody založené na charakteristických rysech papilárních linií

V případech drobného rozměru otisku s velmi malým počtem markantů, nebo je-li otisk nekvalitní, využívají se vlastností papilárních linií. Porovnávají se tyto vlastnosti:

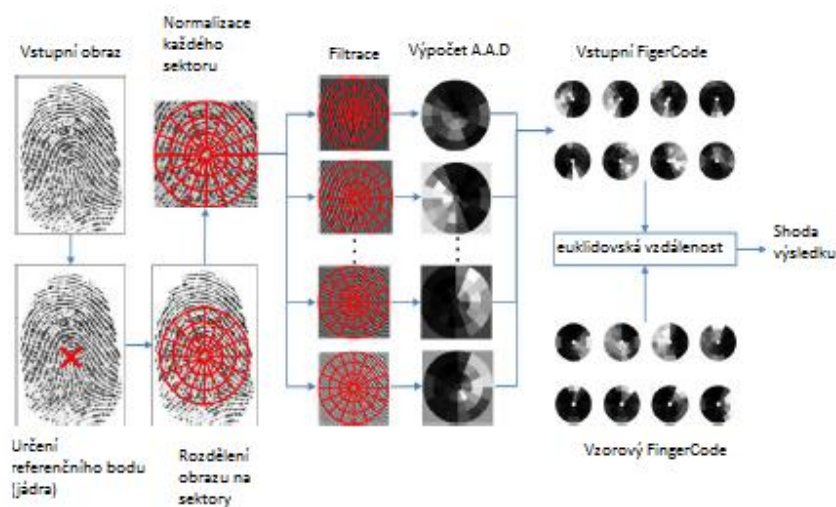
- Globální a lokální vlastností textury
- Počet, typ a souřadnice singularit
- Velikost otisku prstu

FingerCode

Metoda FingerCode je založena na získávání šablon při použití Gaborových filtrů na otisk prstu a výpočtů průměrné absolutní odchylky. Výsledné šablony mají pevné velikosti a porovnávání se provádí pomocí Euklidovské vzdálenosti. Metoda je založena na čtyřech hlavních krocích [9]:

- určení referenčního bodu
- oblast zájmu kolem referenčního bodu
- banka Gaborových filtrů s osmi směry v oblasti zájmu
- výpočet průměrné absolutní odchylky (AAD) od střední hodnoty v jednotlivých oblastech filtrovaného obrazu

Hlavním úkolem této metody je určení referenčního bodu. Tento bod musí být jedinečný v každém obraze. Nesprávný odhad tohoto bodu zaznamená jinou oblast zájmu kolem referenčního bodu.



Obrázek 10: Schéma metody založené na FingerCode, upraveno z [9]

5. Vznik databáze otisků prstů

Do března 2014 disponovala největší databází otisků prstů americká databáze AFIS, která obsahovala více než 120 milionů otisků prstů. Od března provozuje největší databázi (Aadhaar) biometrických údajů Indie, která disponuje s více než 560 miliony otisků prstů, obličejů a duhovky. [10]

5.1. Snímání otisků prstů

Pod pojmem snímání otisku prstu se rozumí převod snímaného otisku do elektronické podoby a zobrazení papilárních linií z prstu na zobrazovacím přístroji např. monitor. Fáze snímání otisku prstu je velmi důležitá. V případě, že dojde k získání snímku s nízkou kvalitou, je velmi velká pravděpodobnost, že s nasnímaným otiskem již nebude možné pracovat. Nízká kvalita snímku je ovlivněna použitím nevhodné technologie snímání, ale také v případě onemocnění kůže na konečcích prstů. Tyto nedostatky mohou vést k úplnému znemožnění procesu registrace, potažmo identifikace nebo verifikace. [2]

Podle časové posloupnosti a technologičnosti snímání existují dvě základní skupiny:

- 1) klasické snímání daktyloskopických stop
- 2) bezprostřední snímání daktyloskopických stop

ad 1)

V první řadě je vyhledání otisku prstu, které vzniklo vzájemným kontaktem mezi pokožkou obsahující papilární linie a nějakým objektem. Součástí tohoto procesu je jejich zviditelnění, fixace a přenesení do elektronické databáze, pomocí optických skenerů. [2]

ad 2)

Bezprostřední snímání daktyloskopických stop slouží k okamžitému sejmutí otisku prstu pomocí snímacího senzoru. Na snímací senzor se položí prst obsahující papilární linie a senzor převede otisk prstu do digitální podoby. Pro tento plně automatický režim, který zahrnuje proces snímání, převod a vyhodnocení otisků prstů se v praxi používá pojem live-scanning. Pojem

live-scanner zahrnuje všechny technologické zařízení, které otisky prstů snímají po přiložení k senzoru nebo skeneru. Tyto zařízení převádějí obraz papilárních linií do elektronické podoby. V tomto případě je skener meziklánek mezi sejmutým otiskem klasickou metodou a jeho převedením do digitální podoby. [2]

5.2. Senzory

Ke snímání otisků prstů lze použít různé typy senzorů, které jsou založeny na odlišných fyzikálních principech. Senzory lze rozdělit z hlediska kontaktu snímaného otisku na senzory kontaktní a bezkontaktní. [2]

Kontaktní senzory využívají mnoho fyzikálních způsobů snímání otisků prstů. Mezi kontaktní senzory patří optické, elektronické, opto-elektronické, kapacitní, tlakové a teplotní. [2]

Bezkontaktní senzory jsou nejčastěji založeny na optickém nebo ultrazvukovém principu. Optické bezkontaktní senzory jsou podobné optickým kontaktním, ale snímání otisků prstů probíhá pomocí světelného paprsku ve vzdálenosti 30 – 50 mm od senzoru. Tímto způsobem je eliminováno znečištění snímané plochy, které může být způsobeno přiložením znečištěných konečků prstů. Ultrazvukové senzory vycházejí z optického principu. V tomto případě nedopadá na snímaný povrch otisku světelný paprsek, ale krátké zvukové vlny s vysokou frekvencí (řádově MHz), které se odráží od povrchu otisku a jsou vyhodnoceny přijímačem zvukových vln. [2]

5.2.1. Požadavky na senzory

Kvalitní senzory musí splňovat řadu požadavků. Mezi nejčastější patří [3]:

- Vhodné rozměry – potřebná miniaturizace zejména pro přístup do notebooků
- Dostatečná snímací plocha – sejmutí dostatečného počtu markant
- Dostatečné rozlišení – v obraze by nemělo docházet ke zkreslení a měl by mít dostatečný kontrast a škálu šedé barvy
- Životnost snímačů – vhodné materiály prvků snímače, u nichž je omezena životnost
- Spolehlivost senzoru

5.3. Formát otisků prstů

Standardem pro komprimaci digitalizovaných otisků prstů je metoda WSQ, která oproti metodě JPEG neztrácí kvalitu obrazu. Metoda WSQ poskytuje vysoký komprimační poměr v rozsahu 1:4 až 1:50, přičemž téměř nedochází ke ztrátě zpracovaných dat s velmi vysokou komprimační rychlostí. Z těchto důvodů je tato metoda používána k automatické identifikaci osob. Metoda komprese se skládá z tří částí [2]:

- waveletová transformace
- kvantifikace
- standartní bezztrátová komprese

V této diplomové práci se použila databáze otisků prstů, která je volně přístupná z webových stránek. Databáze, která je pojmenovaná UPEK Fingerprint Database obsahuje 128 otisků prstů 16-ti osob, každý otisk osoby je nasnímán 8 krát. Všechny otisky prstů v databázi jsou přibližně o velikosti 50,0 kB a rozměrech 248 x 338 pixelů. Požadavkem na databázi je, aby obsahovala různé druhy otisků prstů (počet singulárních bodů).



Obrázek 11: Otisky stejného prstu v databázi označeny jako 1_1 a 1_2 s jedním singulárním bodem



Obrázek 12: Otisky stejného prstu v databázi označeny jako 3_1 a 3_2 s více singulárními body

Na obrázcích 11 a 12 lze vidět po dvou stejných otiscích prstů, které obsahují různý počet singulárních bodů.

6. Statistické hodnocení spolehlivosti

Hlavním cílem biometrické identifikace je jednoznačné určení a identifikace osoby, která je založena na jednoznačných charakteristikách otisků prstů. Porovnávají se šablony právě nasnímaných otisků prstů se vzorovými šablonami, které byly sejmuty už dříve. Výsledkem je skóre, které udává míru shody kvantifikované podobnosti mezi šablonami. Shoda či neshoda dvou otisků je dána prahem T (threshold), který je v intervalu $<0 - 1>$. Pokud je výsledné skóre menší, než práh T je vyhodnocen otisk za neshodný. V opačném případě je skóre větší, než práh T a otisky jsou vyhodnoceny jako stejné. Při porovnávání může nastat správné nebo chybné rozhodnutí.

Mohou nastat tyto možnosti [2] :

- Osoba A je potvrzená jako A => správné přijetí (True Accept)
- Osoba A je zamítnutá jako B => správné zamítnutí (True Reject)
- Osoba A je potvrzená jako B => chybné přijetí (False Accept)
- Osoba A je zamítnutá jako A => chybné zamítnutí (False Reject)

6.1. Pravděpodobnost chybného přijetí (FAR)

Jedná se o pravděpodobnost v případě vyhodnocení dvou různých otisků jako shodné. Výpočet [1]:

$$FAR = \frac{\text{Počet různých otisků vyhodnocených jako shoda}}{\text{Celkový počet rozdílných otisků}} \quad (6.1)$$

6.2. Pravděpodobnost chybného zamítnutí (FRR)

Jde se o pravděpodobnost v případě vyhodnocení dvou stejných otisků od stejné osoby jako odlišné. Výpočet [1]:

$$FRR = \frac{\text{Počet stejných otisků vyhodnocených jako neshodné}}{\text{Celkový počet stejných otisků}} \quad (6.2)$$

6.3. Pravděpodobnost chybné shody (FMR)

Udává pravděpodobnost vyhodnocení různých otisků jako shodné. Na rozdíl od FAR nebere v úvahu neúspěšné pokusy před samostatným porovnáváním. Výsledný vztah [1]:

$$FMR(T) = \int_T^1 p(s|H_1)ds \quad (6.3)$$

kde:

T- rozhodovací práh

H1 – výrok „odlišné“

p – pravděpodobnost pravdivého výroku

s – skóre porovnávání

6.4. Pravděpodobnost chybné shody (FNMR)

Udává pravděpodobnost vyhodnocení stejných otisků jako shodné. Na rozdíl od FRR nebere v úvahu neúspěšné pokusy před samostatným porovnáváním.

Výsledný vztah [1]:

$$FNMR(T) = \int_0^T p(s|H_0)ds \quad (6.4)$$

kde:

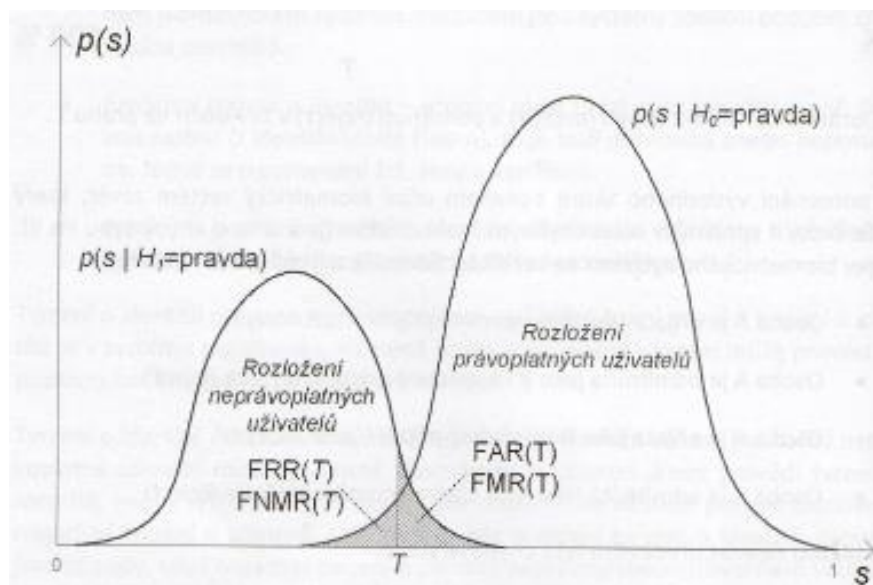
T- rozhodovací práh

H1 – výrok „shodné“

p – pravděpodobnost pravdivého výroku

s – skóre porovnávání

Průběhy právoplatných a neprávoplatných otisků se částečně překrývají. V jakémkoliv nastavení prahové hodnoty T bude část křivek otisků prstů klasifikovat chybně. Část křivky bude v jednom případě falešně pozitivní (FAR) a druhém případě falešně negativní (FRR). Jejich počet se bude měnit v závislosti na hodnotě prahu T.



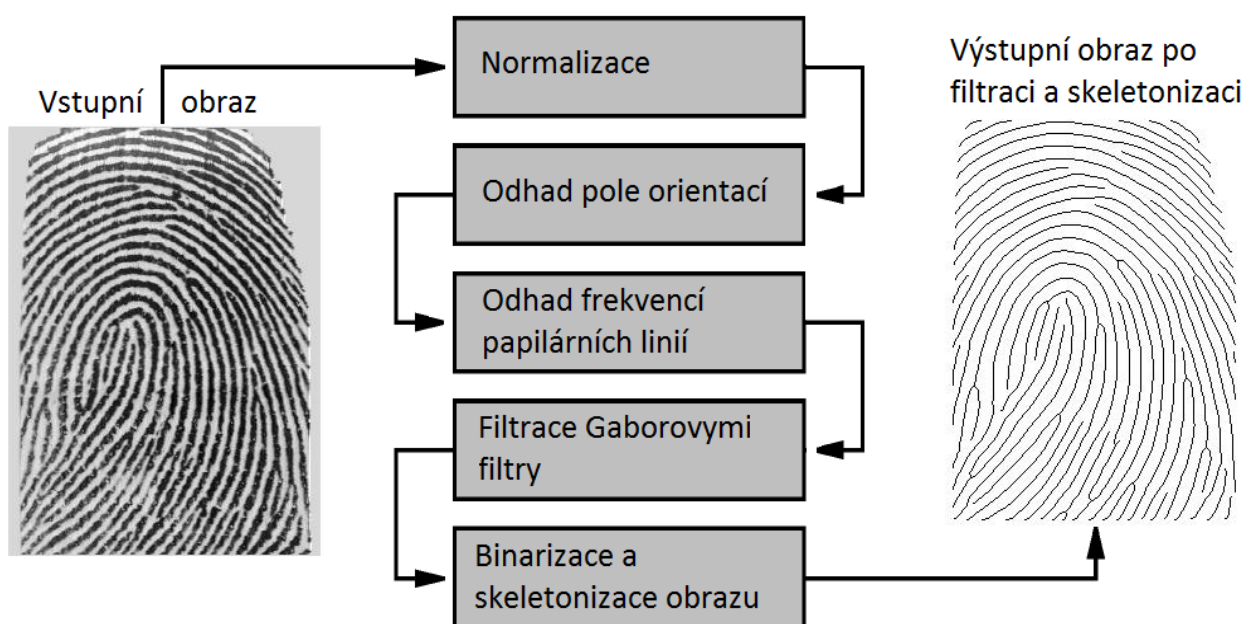
Obrázek 13: Vyznačené míry chyb FMR vs. FNMR a FAR vs. FRR [1]

7. Předzpracování obrazu

Cílem předzpracování obrazu je poskytnutí velice kvalitního obrazu k pozdější detekci markantních bodů. Rozdíl mezi kvalitním a nekvalitním otiskem je v kontrastu mezi hřebenem a údolím. Při špatné kvalitě otisku prstu je obraz zašuměný, rozmazaný a s nízkou hodnotou kontrastu.

Mezi kroky k úpravě otisku prstu patří [1] [12]:

- Normalizace obrazu
- Odhad pole orientací
- Odhad frekvencí papilárních linií
- Filtrace bankou Gaborových filtrů
- Binarizace a skeletonizace obrazu



Obrázek 14: Sled operací k vytvoření skeletonu obrazu

7.1. Normalizace obrazu

Normalizace obrazu slouží ke snížení odchylky v hodnotách ve stupni šedi podél hřebenů a údolí. Po této operaci mají všechny pixely hodnotu intenzity v rozmezí 0 - 1.

Normalizaci obrazu odpovídá rovnice (7.1).

$$N(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{\text{VAR}_0(I(i, j) - M)^2}{\text{VAR}}} & \text{pokud } I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{\text{VAR}_0(I(i, j) - M)^2}{\text{VAR}}} & \text{jinak} \end{cases} \quad (7.1)$$

,kde: $N(i, j)$ – normalizovaná šedotónová hodnota pixelu

I – šedotónová hodnota pixelu (i, j)

M_0 – požadovaná střední hodnota

VAR_0 – variance hodnoty pixelů



Obrázek 15: Rozdíl obrazu před a po normalizaci [12]

7.2. Výpočet pole orientací

Výpočet pole orientací slouží k určení směru papilární linie z okolí (podle tónu šedé barvy). Pokud se vyskytuje bod na papilární linii, je jeho směr určen s maximální pravděpodobností [1]. Metoda založená na gradientu získává směrový obraz z gradientu v bodech (x, y) . Gradient v bodě $\nabla(x, y)$ obrazu představuje dvourozměrný vektor, který je dán parciální derivací obrazu v ∇_x, ∇_y podle souřadnic x a y . Ten je získán pomocí příkazu gradient, který obsahuje filtraci podle Prewittovy nebo Sobellovy masky. Směr gradientu se určuje podle největšího růstu jasové intenzity. Směr gradientu je kolmý na směr papilární linie. [13]

Hlavní kroky algoritmu jsou [12]:

- Rozdělení normalizovaného obrazu na bloky o velikosti $w \times w$
- Výpočet gradientů ∇_x, ∇_y v každém bloku podle Prewittovy nebo Sobellovy masky. Mohou být využity i složitější operátory jako je Marr-Hildreth
- Odhad orientace každého bloku podle následujících rovnic:

$$V_x(x, y) = \sum_{u=x-\frac{w}{2}}^{x+\frac{w}{2}} \sum_{v=y-\frac{w}{2}}^{y+\frac{w}{2}} 2 \cdot \nabla_x(u, v) \cdot \nabla_y(u, v) \quad (7.2)$$

$$V_y(x, y) = \sum_{u=x-\frac{w}{2}}^{x+\frac{w}{2}} \sum_{v=y-\frac{w}{2}}^{y+\frac{w}{2}} \left(\nabla_x^2(u, v) \cdot \nabla_y^2(u, v) \right) \quad (7.3)$$

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{V_x(x, y)}{V_y(x, y)} \right) \quad (7.4)$$

,kde $\theta(x, y)$ je odhad orientace hřebene v bloku se středem v bodě (x, y)

- V důsledku přítomnosti šumu, přerušení papilárních linií a markantů ve vstupním obraze nemusí být odhad směrů papilární linie vždy přesný. Kompenzace tohoto problému je na základě filtrace dolní propustí, kdy je obraz převeden do kontinuálního vektorového pole následujícími vztahy:

$$\phi_x(x, y) = \cos(2\theta(x, y)) \quad (7.4)$$

$$\phi_y(x, y) = \sin(2\theta(x, y)) \quad (7.5)$$

kde ϕ_x a ϕ_y jsou prvky vektorového pole, které jsou filtrovány dolní propustí:

$$\phi'_x(x, y) = \sum_{u=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} W(u, v) \phi_x(x - uw, y - vw) \quad (7.6)$$

$$\phi'_y(x, y) = \sum_{u=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\phi}{2}}^{\frac{w_\phi}{2}} W(u, v) \phi_y(x - uw, y - vw) \quad (7.7)$$

,kde: W je dvourozměrný filtr typu dolní propust a W určuje velikost filtru.

- Orientace je vypočtena z následujícího vztahu:

$$O(x, y) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\phi'_x(x, y)}{\phi'_y(x, y)} \right) \quad (7.8)$$

Výsledek orientačního pole otisku prstu je znázorněn na obrázku 16, kde jsou na otisk prstu vykresleny čáry. Jednotlivé čáry představují směr orientace okna odpovídající směru papilární linie.



Obrázek 16:Obraz otisku prstu s orientačním polem

7.3. Odhad frekvencí papilárních linií

Papilárním liniím otisku prstu odpovídají vlny sinusového tvaru, které jsou kolmé na orientaci papilárních linií. Na této myšlence je založen odhad lokální frekvence, který je vypočten z průměrného počtu pixelů mezi maximálními hodnotami intenzit pixelů. Následující kroky představují určení lokální frekvence papilárních linií, kde G je normalizovaný obraz a O je orientovaný obraz [12]:

- Rozdělení normalizovaného obrazu na bloky $w \times w$
- Pro každý blok se středem na pozicích (i, j) je vypočteno orientované okno
- Výpočet x -signature pro každý blok se středem v bodě (x, y) :

$$X[k] = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} G(u, v) \quad , kde k = 0, 1 \dots l-1 \quad (7.9)$$

$$u = x + \left(d - \frac{w}{2}\right) \cos(O(x, y)) + \left(k - \frac{l}{2}\right) \sin(O(x, y)) \quad (7.10)$$

$$v = y + \left(d - \frac{w}{2}\right) \sin(O(x, y)) + \left(\frac{l}{2} - k\right) \cos(O(x, y)) \quad (7.11)$$

- Obraz otisku prstu má pevné rozlišení a hodnota odhadu frekvence v papilárních liniích v bloku je v určitém rozsahu. Obraz s rozlišením 500dpi odpovídá rozmezí od 1/3 do 1/25. V případě, je-li odhadovaná hodnota frekvence mimo tento rozsah, je bloku přiřazena hodnota -1.
- Bloky, které netvoří dobře definovaný sinusový tvar vlny, z důvodu výskytu singulárních bodů nebo došlo-li k poškození papilárních linií je pro tyto bloky přidělena frekvence z platných bloků. Interpolace se provádí následovně:

a) Pro každý blok se středem (i, j)

$$\Omega'(x, y) \begin{cases} \Omega(i, j) & \text{pokud } \Omega(i, j) \neq -1 \\ \frac{\sum_{u=-\frac{w_\Omega}{2}}^{\frac{w_\Omega}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\Omega}{2}}^{\frac{w_\Omega}{2}} (u, v) \mu(\Omega(i-uw, j-vw))}{\sum_{u=-\frac{w_\Omega}{2}}^{\frac{w_\Omega}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\Omega}{2}}^{\frac{w_\Omega}{2}} (u, v) \delta(\Omega(i-uw, j-vw))} & \text{jinak} \end{cases} \quad (7.12)$$

,kde

$$\mu(x) = \begin{cases} \text{pokud } x \leq 0 \\ x & \text{jinak} \end{cases} \quad (7.13)$$

$$\delta(x) = \begin{cases} \text{pokud } x \leq 0 \\ x & \text{jinak} \end{cases} \quad (7.14)$$

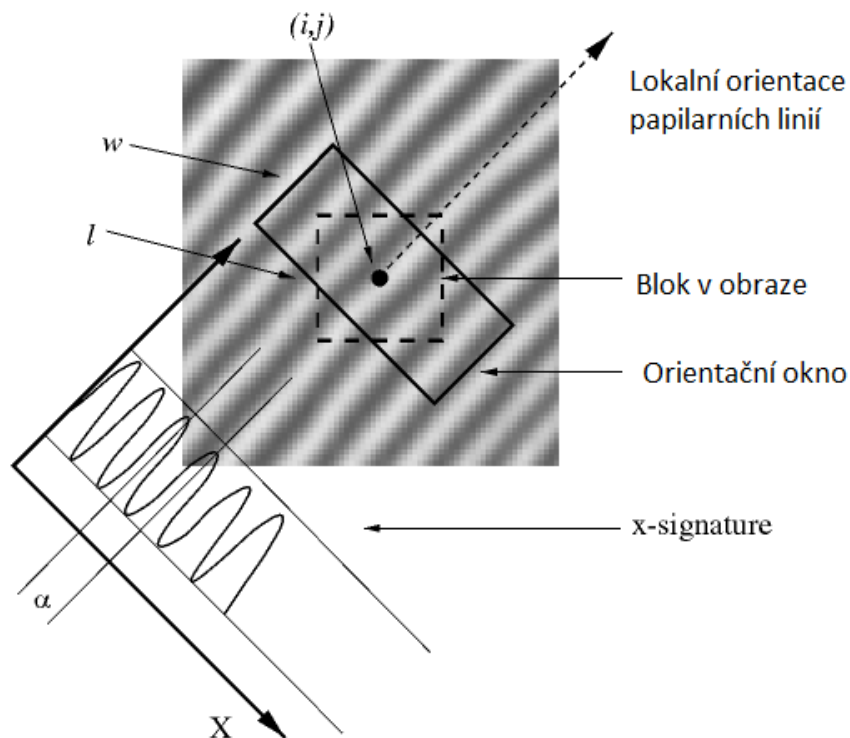
W_g – Gaussovo konvoluční jádro a $w_\Omega = 7$ (Velikost jádra)

b) Pokud existuje blok s frekvencí -1, je nahrazena Ω za Ω'

- Vzdáleností mezi papilárními liniemi se mohou pomalu měnit, v tomto případě se použije dolní propust k odstranění extrému:

$$F(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_l}{2}}^{\frac{w_l}{2}} \sum_{v=-\frac{w_\Omega}{2}}^{\frac{w_\Omega}{2}} W_1(u, v) \Omega'(i - uw, j - vw) \quad (7.15)$$

,kde W_1 je dvourozměrný filtr typu dolní propust a velikost filtru je $w_1 = 7$



Obrázek 17: Znáznornění odhadu lokální frekvence [12]

7.4. Filtrace Gaborovými filtry

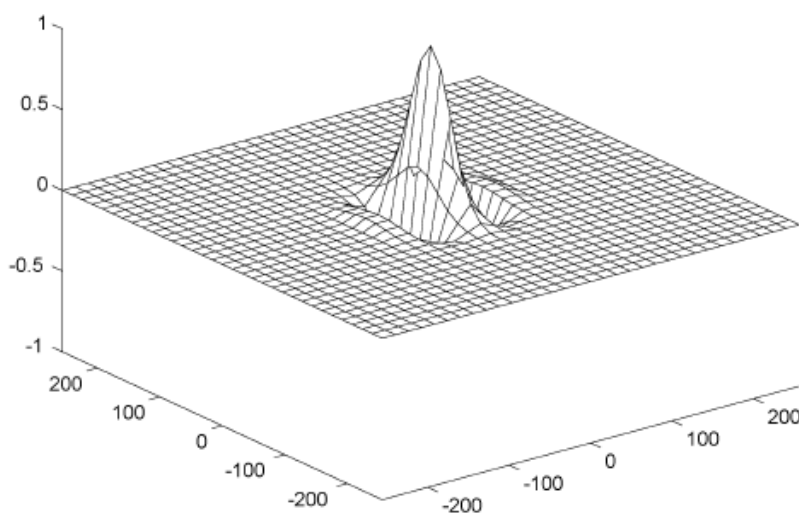
Pro extrakci papilárních linií se používá filtrace pomocí 2D Gaborovy funkce. Sinusový tvar vlny Gaborové funkce, který je přizpůsoben na odpovídající frekvenci a orientaci papilární linie může účinně odstranit nežádoucí šum a zvýraznit papilární linii. Gaborovy filtry jsou pásmové filtry, které mají směrově a frekvenčně selektivní vlastností a z tohoto důvodu jsou vhodné k zachování papilárních linií. Obecný tvar Gaborova filtru je [12]:

$$G(x, y; \theta, f) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x_\theta^2}{\delta_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\delta_y^2}\right]\right\} \cos(2\pi f x_\theta) \quad (7.16)$$

$$x_\theta = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (7.17)$$

$$y_\theta = -x \sin \theta + y \cos \theta \quad (7.18)$$

kde, θ je orientace Gaborova filtru, f je frekvence sinusové vlny, δ_x a δ_y jsou prostorové konstanty Gaborovy obálky podél os x a y .



Obrázek 18: Gaborovy filtr s $f=10$ a $\theta=0$ [12]

7.5. Binarizace a skeletonizace obrazu

Binarizace obrazu spočívá v převodu šedotónového snímku (256 hodnot intenzit) na obraz, který obsahuje pouze dvě hodnoty intenzit pixelů, tedy hodnotu 0 a 1. Hodnota pixelu 0 je přiřazena barvě černé a hodnota 1 v obraze reprezentuje bílou barvu. Metoda práhování obrazu je založena na metodě OTSU, která určí práh na principu minimalizace váženého součtu odchylek v jednotlivých třídách pixelů. Skeletonizace slouží ke ztenčení papilárních linií na tloušťku jednoho pixelu na základě:

- 1) V první subiteraci je vymazán pixel p , pokud jsou splněny podmínky G_1, G_2, G_3
- 2) V druhé subiteraci je vymazán pixel p , pokud jsou splněny podmínky G_1, G_2, G_3'

$$\text{Podmínka } G_1: \quad X_H(p) = 1 \quad (7.19)$$

$$, \text{ kde } X_H(p) = \sum_{i=1}^4 b_i \quad (7.20)$$

$$, \text{ kde } b_i = \begin{cases} 1 & \text{pokud } x_{2i-1} = 0 \text{ a } (x_{2i} = 1 \text{ nebo } x_{2i+1} = 1) \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (7.21)$$

$$\text{Podmínka } G_2: \quad 2 \leq \min\{n_1(p), n_2(p)\} \leq 3 \quad (7.22)$$

$$, \text{ kde } n_1(p) = \sum_{k=1}^4 x_{2k-1} \vee x_{2k} \quad (7.23)$$

$$n_2(p) = \sum_{k=1}^4 x_{2k} \vee x_{2k+1} \quad (7.24)$$

$$\text{Podmínka } G_3: \quad (x_2 \vee x_3 \vee \bar{x}_8) \wedge x_1 = 0 \quad (7.25)$$

$$\text{Podmínka } G_3': \quad (x_6 \vee x_7 \vee \bar{x}_4) \wedge x_5 = 0 \quad (7.26)$$

8. Praktická část

V praktické části této práce byly využity teoretické informace z předešlých kapitol k realizaci aplikace, která bude sloužit k identifikaci podle otisku prstu. Podle pokynu byla aplikace vytvořena v programovém prostředí Matlab 2014.

Praktická část se dá rozdělit do těchto částí:

- Načtení a normalizace obrazu
- Předzpracování otisku prstu
- Analýza otisku prstu
- Porovnávání otisku prstů
- Vyhodnocení výsledků
- Uživatelské rozhraní GUI

8.1. Načtení a normalizace obrazu

Požadované načtení obrazu je provedené pomocí 4 příkazů. K načtení obrazu do proměnné je realizováno pomocí funkce *imread*, kde proměnná je o rozměrech $m \times n \times 3$ (m – počet sloupců, n – počet řádků, 3 matice pro RGB model). Pro šedotónový obraz je model RGB zbytečný, proto použijeme příkaz *rgb2gray*. Příkaz *im2double* uloží obraz do datového typu *double* a k využití celého rozsahu hodnot slouží příkaz *mat2gray*, který normalizuje hodnoty intenzit v obraze v intervalu od 0 do 1, kde nulová intenzita představuje černou a intenzita o hodnotě 1 bílou. K zobrazení slouží funkce *imshow*.

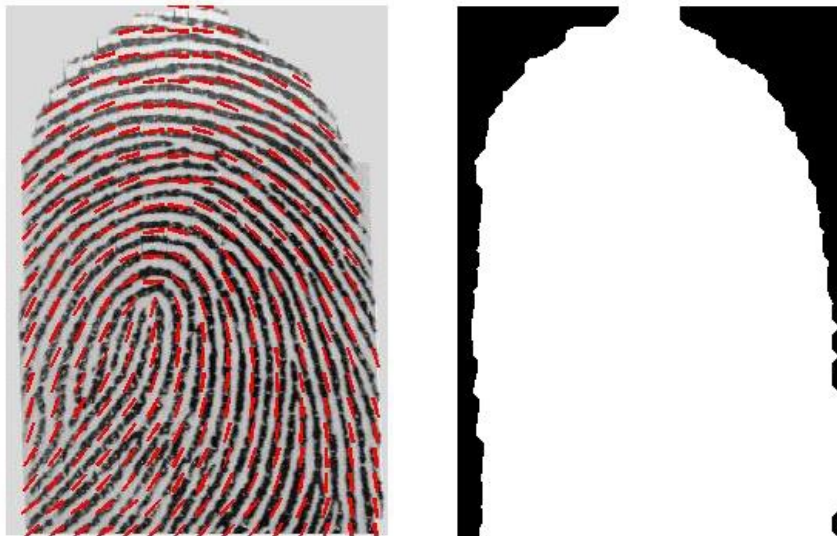


Obrázek 19: Načtení otisku prstu

8.2. Předzpracování otisku prstu

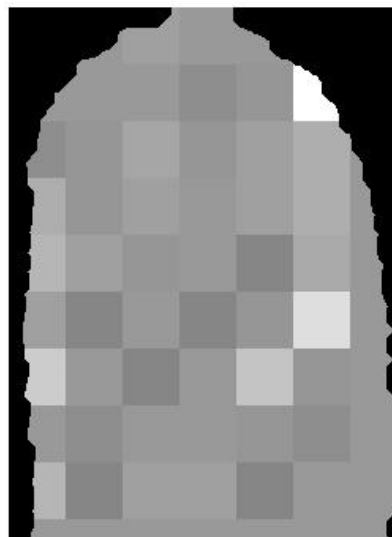
Předzpracování je realizováno na základě kapitoly 7, která zahrnuje výpočet orientačního pole otisku prstu, zjištění frekvence papilárních linií a použití Gaborových filtrů na otisk, kterému odpovídá orientační pole a jejich frekvence.

Odhad orientačního pole je vypočítán na základě algoritmu v kapitole 7.2. Pro výpočet byl použit gradient obrazu, který je vypočten pomocí příkazu *gradient*, kde vstupem je načtený obraz. Orientační pole je vypočteno pro každý pixel v obraze, proto je vytvořen obrys otisku prstu, který zajistí vykreslení pole orientací pouze v oblasti otisku prstu. Z Obrázku 20 je patrné, jak orientační pole kopíruje směr papilárních linií.



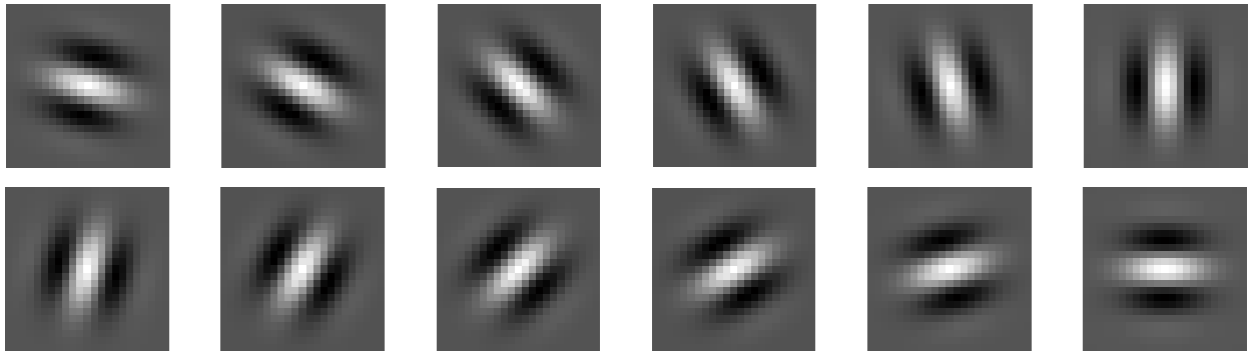
Obrázek 20: Vlevo vstupní obraz s orientačním pole a vpravo obrys tisku

Odhad frekvencí papilárních linií podle kapitoly 7.3, byl lehce modifikován. Neplatná frekvence v otisku není nahrazena nejbližší platnou frekvencí, ale mediánem. Jednotlivé frekvence v místech obrazu jsou znázorněny na Obrázku 21.



Obrázek 21: Lokální frekvence v obraze

Banka Gaborových filtrů je vytvořena podle kapitoly 7.4, pomocí kterých je filtrován otisk prstu. Počet Gaborových filtrů je závislý na počtu unikátních frekvencí v obraze otisku prstu a počtu úhlů s definovaným krokem. Kvalita výstupního obrazu tedy závisí na počtu vytvořených filtrů. Pro každou část obrazu je použit filtr, který má co nejpodobnější vlastností s částí obrazu.



Obrázek 22:Banka Gaborových filtru s krokem 15°

Výsledný obraz po filtraci má mnohem lepší vlastností k vytvoření skeletu obrazu než původní, kde by byly papilární linie přerušeny a vznikaly by falešné markanty viz. Obrázek 23.



Obrázek 23:Srovnání otisku před a po filtraci

Vyfiltrovaný obraz je nutné před vytvořením skeletu naprahnovat. Binární obraz je vytvořen pomocí globálního prahování příkazem *graythresh*, který stanovuje práh pomocí Otsu metody. Skelet otisku prstu je vytvořen na základě tenčení podle algoritmu z kapitoly 7.5. Díky funkci v Matlabu je tohoto ztenčení docíleno příkazem *bwmorph* a operací *'thin'* na binární obraz.

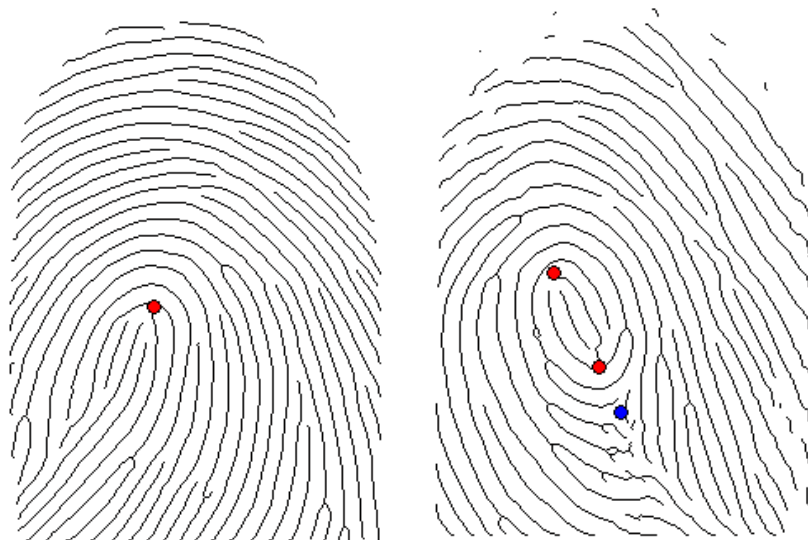


Obrázek 24: Binární otisk a skelet otisku

8.3. Analýza otisku prstu

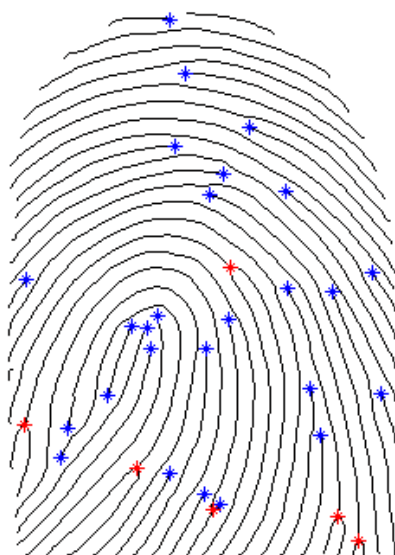
Cílem analýzy otisku prstu je detekce singulárních bodů (jádra a delty) a markantních bodů typu zakončení a rozdělení. Algoritmy k nalezení singulárních bodů a markant jsou popsány v teoretické části této práce.

Singulární body v otisku prstu jsou určovány pomocí Poincarého indexu, který je popsán v kapitole 3.3.1. Vytvořené orientační pole otisku prstu se prochází pomocí posuvného okna o velikosti $[3 \times 3]$, kde je pro centrální bod vypočten Poincarého index. Pro rychlejší vyhledávání singulárních bodů, prochází posuvné okno pouze rozměry vnitřního obrysu. Singulární bod je detekován v případě, je-li index roven $1/2$ (jádro) nebo $-1/2$ (delta). V programu je nastavený interval pro jádro i deltu, protože výsledné indexy nevyšly vždy podle teoretických předpokladů. V případě vypočteného indexu, který spadá do intervalu, dojde k uložení pozice a typu singulárního bodu. Tyto poté slouží k identifikaci.



Obrázek 25: Obrázky z vyznačenými singulárními body (červený bod jádro, modrý delta)

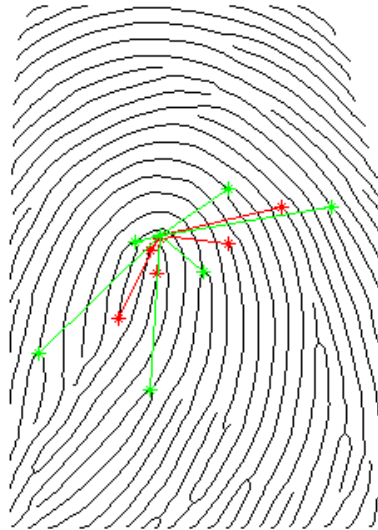
Detekce markantních bodů je popsána v kapitole 3.4.1 a 3.4.2. První metoda je založena na morfologii hledaných znaků. Je výpočetně náročná a zdlouhavá. Proto byla k detekci markantních bodů využita metoda křížení (Crossing Number), která byla při vyhledávání markantů mnohem rychlejší. K detekci byl použit skelet otisku prstu, ve kterém se pohybovalo okno o velikosti [3x3]. Výsledná hodnota v centrálním bodě okna se porovnávala s hodnotou, které odpovídá zakončení nebo rozdvojení. V případě splnění podmínky jsou uloženy souřadnice a typ markantu do proměnné, pomocí kterých se určuje pravděpodobnost shody otisku prstu. Na Obrázku 26 jsou znázorněny markantní body ukončení (modře) a rozdvojení (červeně).



Obrázek 26: Znázornění markantních bodů

8.4. Porovnávání otisku prstu

Porovnávání otisku prstu je realizováno na základě eukleidovské vzdálenosti mezi jádrem a markanty a také na úhlech. Eukleidovské vzdálenosti jsou vypočteny pro všechny markantní body ukončení a rozdvojení. Vzdálenost je počítána od singulárního bodu jádra k jednotlivým markantům. V případě výskytu dvou jader je vypočteno jejich těžiště, od kterého jsou vzdálenosti a úhly vypočteny. V testované databázi jsou otisky prstu, které singulární bod nemají. Proto se počítá těžiště ze všech markantních bodů kurčení středu, od kterého se vzdálenosti budou počítat.



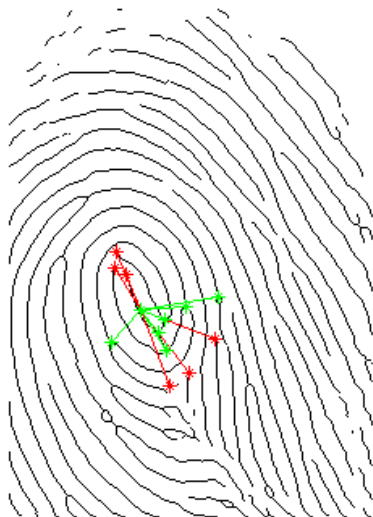
Obrázek 27: Vykreslení vzdáleností od jádra (počet ukončení = 6 a rozdvojení = 6)

Výpočet středu $S[s_1, s_2]$ dvou jader [16]:

$$s_1 = \frac{a_1 + b_1}{2} \quad (8.1)$$

$$s_2 = \frac{a_2 + b_2}{2} \quad (8.2)$$

,kde $A[a_1, a_2]$, $B[b_1, b_2]$ jsou souřadnice jader.



Obrázek 28: Vykreslení vzdáleností v případě 2 jader (počet ukončení = 6 a rozdvojení = 6)

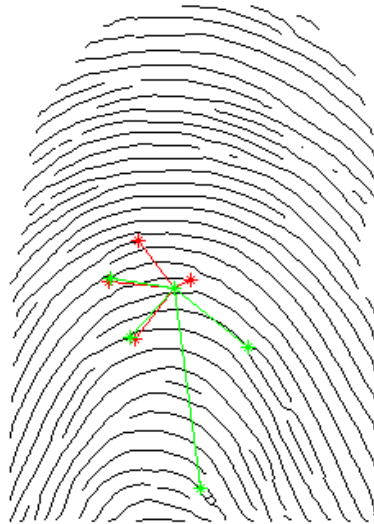
Zjištění polohy těžiště markantních bodů je vypočteno na základě těžiště čáry. Kde jednotlivé čáry představují eukleidovské vzdálenosti.

Výpočet je proveden z následujících vzorců [17]:

$$x_T = \frac{\sum_i l_i \cdot x_{Ti}}{\sum_i l_i} \quad (8.3)$$

$$y_T = \frac{\sum_i l_i \cdot y_{Ti}}{\sum_i l_i} \quad (8.4)$$

, kde x_T a y_T jsou souřadnice výsledného těžiště, x_{Ti} a y_{Ti} jsou souřadnice těžiště vzdálenosti i -té čáry.



Obrázek 29: Vykreslení vzdálenosti od těžiště (počet ukončení= 4 a rozdvojení= 4)

Do porovnávacího procesu vstupuje zadaný počet nejmenších vzdáleností od jádra pro typ ukončení a rozdvojení. Ten se může snížit v případě, nevyhovujícího počtu markant ve srovnávaných otiscích. Při procesu porovnávání je vytvořena matice rozdílů vzdáleností mezi referenčním a porovnávaným otiskem. V matici je vždy vyhledána nejmenší vzdálenost, která je uložena a souřadnice uložené hodnoty odstraní odpovídající řádek a sloupec v matici. V dalším kroku při hledání minima je matice o 1 řádek a sloupec kratší.

Kód pro vyhledávání minima z matice pro markantní typ rozdvojení:

```

for k=1:length(RefVyberDistBu)
    for i=1:length(vekTabEuklidBu)

        TabRozBu(k,i)=abs(RefVyberDistBu(k) - vekTabEuklidBu(i));
        %vytvoření matice rozdílů

    end
end

for k=1:length(vekTabEuklidBu)                                %délka cyklu

    VysRozBu(k)=min(min(TabRozBu));                            %hledání minima v matici
    [x,y]=find(VysRozBu(k)==TabRozBu);                        %určení pozice v matici
    x=min(x);y=min(y);                                        %odstranění pozic více minim
    TabRozBu(x,:)=[];                                         %vymazání sloupce
    TabRozBu(:,y)=[];                                         %vymazání řádku

end

```

Úhly jsou opět vypočteny pro zadaný počet bodů ukončení a rozdvojení, které vstupují do porovnávacího procesu. K určení úhlu bylo nutné určit směrnici přímky vytvořenou mezi jádrem a markantním bodem na základě rovnice (8.3). Odchylku dvou přímek se směrovými vektory u a v se vypočtou pomocí skalárního součinu z rovnice (8.4). Úhel je vždy počítaná k horizontální ose, kde výsledky vycházely podobněji, než u porovnávání úhlů dvou sousedních přímek. K porovnání odchylek je opět využito matice, jako při určování vzdáleností.

Výpočet směrnice přímky u [16]:

$$u = AB = B - A = (b_1 - a_1; b_2 - a_2) \quad (8.3)$$

Výpočet odchylky přímek se směrovými vektory u, v [16]:

$$\cos \varphi = \frac{|u \cdot v|}{|u| \cdot |v|} = \frac{|u_1 v_1 + u_2 v_2|}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \quad (8.4)$$

Rozdíly mezi vzdálenostmi a úhly jsou provedeny pouze u otisků, které vyhověly podmínce počtu jader. Otisky, které této podmínce nevyhověly, jsou z porovnávacího procesu vyřazeny. Výsledné rozdíly vzdáleností markantů od jádra jsou považovány za shodné, pokud vyhověly prahu, který byl experimentálně nastaven na hodnotu 10. Totéž platí pro odchylky úhlů, kde je práh nastaven opět na hodnotu 10. Pravděpodobnost shody otisku je dána sumou shodných vzdáleností a úhlů podělených celkovým počtem vzdáleností a odchylek úhlů.

8.5. Vyhodnocení výsledků

V tabulkách 5, 6 a 7 jsou uvedeny rozdíly vzdáleností a úhlů pro shodné otisky, kde referenčním otiskem byl první otisk. Byly vybrány otisky s různými počty singulárních bodů. V tabulce 5 jsou porovnávány shodné otisky s jedním singulárním bodem a v následující tabulce shodné otisky se dvěma singulárními body typu jádro. V poslední tabulce jsou porovnávány otisky, které singulární bod neobsahují.

Tabulka 5: Rozdíl vzdáleností a úhlů pro otisky 1

Typ 1	Marknt typ ukončení						Markant typ rozzdvojení					
Rozdíl vzdáleností	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,5668	1,3797	1,4651	1,5184	2,0507	2,3499	0,3123	0,7433	0,8104	1,2916	2,2061	8,6464
	0,0000	0,2326	1,2109	1,2901	2,0831	3,8712	0,2322	0,9612	2,0467	2,3827	5,6346	8,4863
	0,7859	0,8958	0,9906	2,2256	5,0501	39,1901	0,0000	1,2270	1,2893	2,8043	3,0521	80,7488
	0,2957	0,4405	0,7180	2,2256	3,0516	38,3440	0,0000	1,2270	2,3042	2,7602	3,0521	80,2019
	1,1657	1,5440	1,5629	2,0507	2,1056	40,8572	0,8562	1,3865	1,9268	4,6407	6,2215	82,3281
	0,4128	0,5121	1,2787	2,0507	3,7058	41,4127	0,7224	1,3470	2,2174	2,9251	8,4409	119,1925
0,1025	0,3530	0,5668	0,6786	1,1657	3,3289	0,8354	0,9612	2,1663	8,4507	20,8180	27,9512	
Rozdíl úhlů	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,4519	0,7425	2,4629	3,7186	7,7039	49,5279	0,0437	0,5060	1,2703	3,3381	4,4197	21,0883
	0,0000	2,0693	2,4776	4,7300	16,0416	56,8235	0,8960	0,9968	1,5140	2,8434	5,5523	22,0901
	0,4575	1,2621	1,9442	2,8568	4,2958	19,8520	0,0000	0,5152	0,8331	1,0072	2,7300	7,0811
	1,2621	1,3773	2,1734	4,2066	19,0116	21,7495	0,0000	0,5152	1,6501	2,7300	2,9031	7,4983
	0,2745	1,0638	3,7186	8,2473	13,4138	21,6566	0,1738	0,7277	1,8826	2,7719	6,9594	27,9841
	2,1851	3,7186	4,0471	6,6725	16,6148	20,2543	0,3134	0,7476	1,6192	2,9477	6,2929	45,2257
	0,3591	1,4645	2,4042	5,9764	13,2440	42,9966	0,9507	0,9968	2,4990	2,9666	18,4679	47,1681

Tabulka 6: Rozdíl vzdáleností a úhlů pro otisky 3

Typ 3	Marknt typ ukončení						Markant typ rozzdvojení					
Rozdíl vzdáleností	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,4009	0,9129	1,3649	1,4062	3,1904	21,8778	0,0659	0,3874	0,9796	0,9813	5,4084	5,8990
	0,0494	0,3696	1,1180	2,7573	30,9874	32,7063	0,6696	0,6854	1,3907	4,8395	35,2494	37,3695
	0,5387	0,7318	1,6333	1,8060	2,6260	20,3081	0,0502	0,6483	0,8823	23,5582	35,0355	38,5288
	0,1020	0,2039	0,3535	1,7208	2,3419	8,4042	0,0360	0,5540	1,4186	3,1399	35,3355	37,8402
	0,7945	2,9651	3,7650	4,6067	17,6862	30,6104	0,4035	0,4079	2,4847	3,7158	5,1323	26,5715
	0,5781	1,0905	2,1836	2,5540	2,6967	21,8182	0,0659	0,1463	0,5262	1,2374	2,6222	35,4922
0,0655	0,7542	1,6432	2,5809	42,7947	47,4410	0,5542	1,0408	1,5402	4,3861	35,9226	37,6967	
Rozdíl úhlů	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,3234	1,2431	1,8049	6,2991	8,8218	10,0920	0,9502	1,0397	1,4455	5,0113	9,2594	56,3323
	0,0397	0,4277	0,6860	3,3495	3,5581	6,4948	0,9871	2,8319	3,8907	3,8938	5,4210	5,6645
	1,2626	1,4761	2,9513	7,5312	25,4085	51,2830	0,7834	2,2280	6,0486	6,3017	6,7135	67,8972
	0,2846	0,4197	2,1275	2,2485	3,1154	50,8280	0,8212	1,3732	2,0371	3,7345	5,2482	25,3835
	0,2528	0,5592	0,7193	4,1410	5,9149	9,4497	1,7647	2,4851	3,0857	10,5785	44,7920	64,1259
	0,1559	0,2023	2,3496	4,5722	10,9068	24,6953	0,9502	1,7937	2,4897	2,8586	3,5727	4,9348
	1,4612	2,0842	4,1826	6,9896	7,2625	40,0188	0,2365	1,0845	1,3930	9,4135	9,8861	19,1472

Tabulka 7: Rozdíl vzdáleností a úhlů pro otisky 15

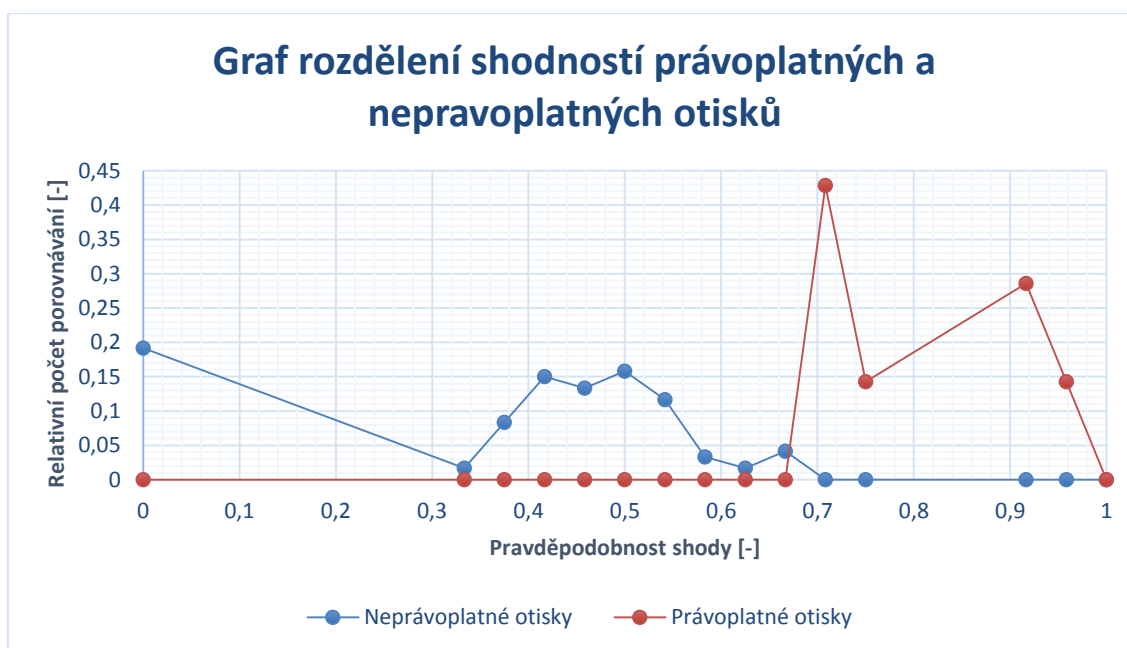
Typ 15	Marknt typ ukončení						Markant typ rozzdvojení					
Rozdíl vzdáleností	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	1,4408	2,1924	9,7805	18,3671	25,8990	30,3512	0,0997	7,4571	15,7085	29,1676	49,0457	52,4330
	0,4702	0,6842	17,6734	19,4262	24,6494	29,7629	0,3381	0,8239	4,8278	6,9855	25,3578	43,5676
	0,5538	0,9772	4,2262	9,8096	13,4366	17,5831	3,0823	9,3124	13,2768	19,6959	21,1565	65,2700
	1,8416	3,6451	8,3921	8,8954	14,6152	17,6315	0,9170	17,9520	20,6178	43,0370	53,0121	61,5626
	1,5049	3,1874	3,4580	5,1770	9,6686	18,2190	23,2563	25,0454	30,0052	31,5209	37,5198	49,6994
	1,3616	4,3660	6,6515	8,5159	9,6646	12,3482	0,6890	14,1330	30,9819	37,8730	41,1080	43,7267
	1,9318	3,4488	18,4044	23,0571	28,0087	31,8971	0,4191	10,9060	22,5351	27,3818	29,1538	58,4029
Rozdíl úhlů	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,6734	4,2331	4,8724	17,1005	23,8902	62,8419	0,1345	1,1495	5,3516	6,5539	7,0403	42,2851
	2,0851	2,9048	5,1532	6,3979	15,4431	74,1606	1,6934	3,4435	4,4917	15,7374	19,4701	52,1863
	0,9048	1,0111	5,3523	5,3837	16,7598	49,0134	0,7948	5,1237	6,0564	9,0258	12,0132	21,2638
	2,9173	4,7754	9,3517	36,9470	50,5068	78,7594	0,3056	1,5320	7,7385	26,4120	68,8788	79,3656
	0,2390	3,5067	7,1718	39,4003	49,9687	72,5682	0,4171	2,8888	3,1353	11,2844	14,8355	26,6546
	0,1552	0,2351	17,7037	20,3626	55,7488	79,6375	5,4321	6,3395	6,5284	8,5289	23,7651	27,2569
0,4617	1,5607	3,4218	11,5357	12,9095	49,7576	0,1808	0,9376	5,3101	5,5474	19,6874	54,4687	

V tabulce 8 jsou uvedeny výpočty pravděpodobností, které odpovídají rozdílům vzdáleností a odchylek úhlů uvedených v tabulce 5, 6 a 7, kde prahová hodnota vzdálenosti a odchylky úhlu byly nastaveny na hodnotu 10. Z výsledků pravděpodobností v tabulce 8 je patrné, že pro otisky se singulárním jádrem je pravděpodobnost shody větší než u otisků, které

jádro neobsahují. U porovnávání otisků prstů bez singulárních bodů klesá pravděpodobnost shody pod 0,5.

Tabulka 8: Výsledné pravděpodobnosti otisku

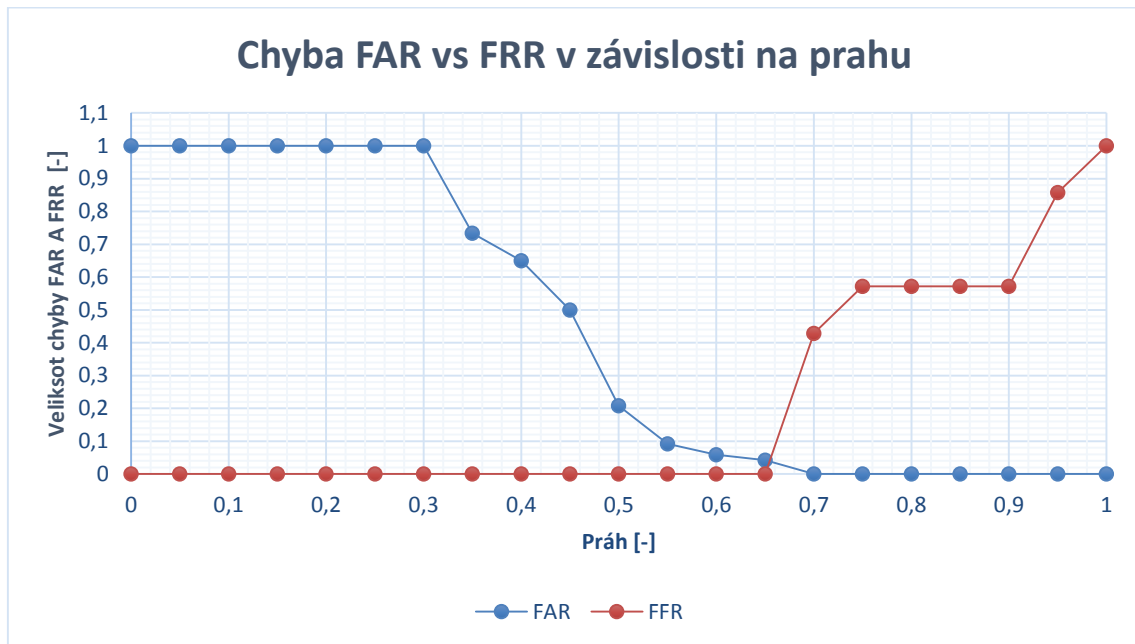
Názvy otisku	Pravděpodobnost shody otisku prstu	Názvy otisku	Pravděpodobnost shody otisku prstu	Názvy otisku	Pravděpodobnost shody otisku prstu
1_1	1.0000	3_1	1.0000	15_1	1.0000
1_2	0.9167	3_2	0.8750	15_2	0.5417
1_3	0.8750	3_3	0.8333	15_3	0.5417
1_4	0.8750	3_4	0.7083	15_4	0.5833
1_5	0.8333	3_5	0.8333	15_5	0.4583
1_6	0.7917	3_6	0.7500	15_6	0.4583
1_7	0.7917	3_7	0.8333	15_7	0.5000
1_8	0.7500	3_8	0.7500	15_8	0.4167



Obrázek 30: Míra shody s právoplatných a neprávoplatných otisků s otiskem 1_1

Ve výsledném grafu jsou vykresleny křivky, popisující pravděpodobnost relativního počtu otisků s porovnávaným otiskem. V tomto případě s otiskem 1_1, který má jeden singulární bod typu jádro. S porovnávaným otiskem bylo srovnáno 127 otisků, přičemž aplikace vyřadila 38 otisků, které nevyhovely počtu jader. Průběh neprávoplatných otisků je především v levé části

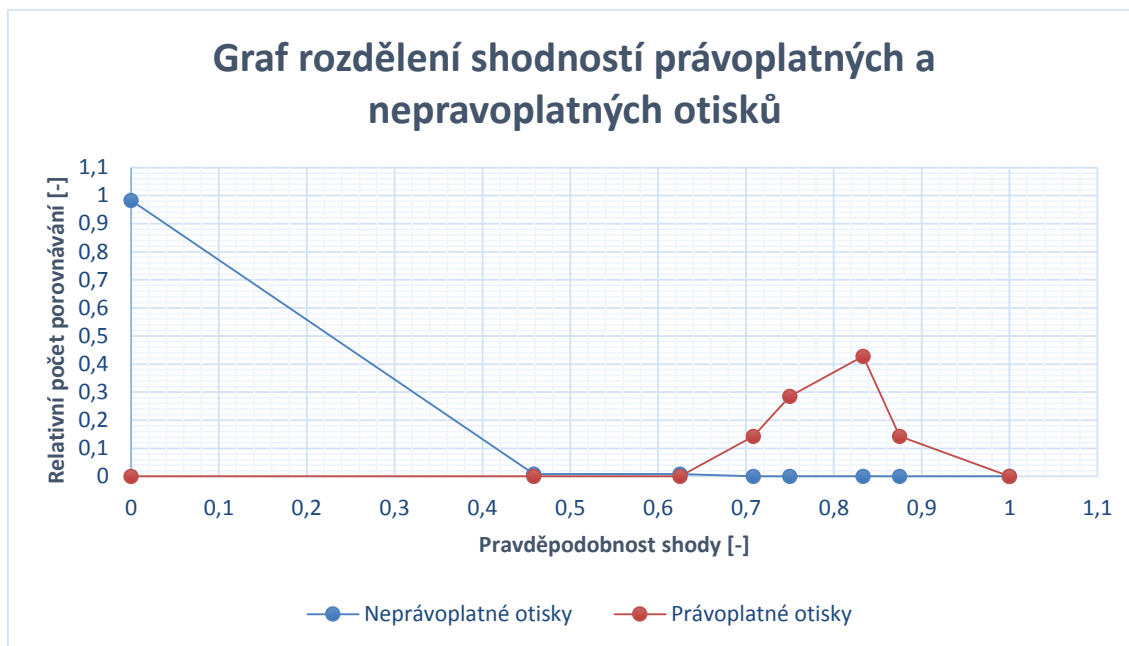
grafu, ale nulovou hodnotu má až od pravděpodobnosti 0,8, což je nejspíše dáno velmi podobným otiskem na hodnotě pravděpodobnosti 0,75. První pravoplatné otisky mají pravděpodobnost 0,75.



Obrázek 31: Závislost FAR/FRR na prahu pro otisk 1_1

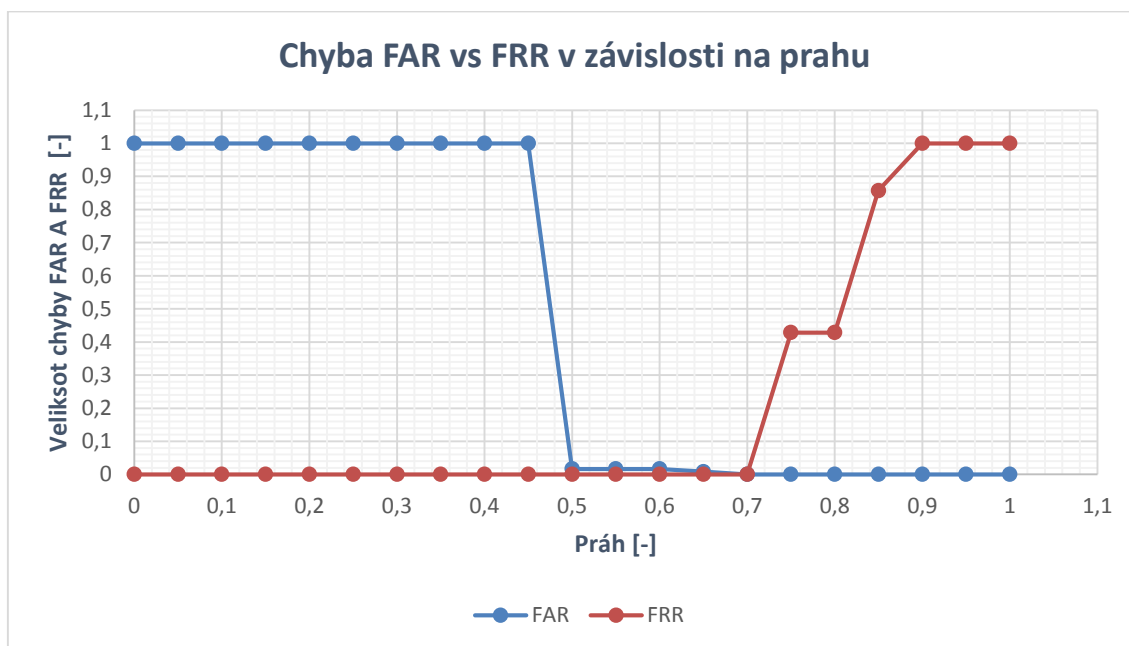
Z výsledného grafu na obrázku 31 lze téměř jednoznačně zvolit hodnotu prahu rovnu 0,7 pro porovnávaný otisk. Při tomto prahu bude ve výsledcích zahrnut jeden nepravoplatný otisk z celé databáze.

V následujících grafech jsou znázorněny průběhy shodností otisků a závislostí FAR/FRR na prahu pro otisky s jádrem, dvěma jádry a bez singulárních bodů.

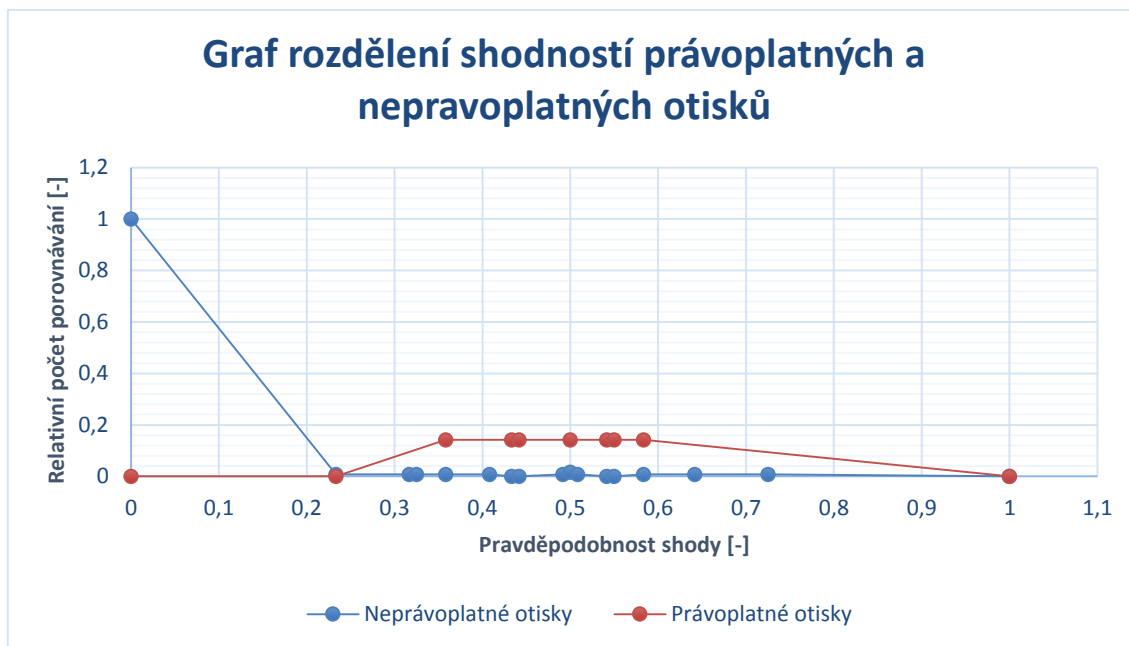


Obrázek 32: Míra shody s právoplatných a neprávoplatných otisků s otiskem 3_1

Výsledné grafy na obrázcích 32 a 33 odpovídají porovnávanému otisku 3_1, který obsahuje dva jádra. V tomto případě bylo ze 127 otisků nakonec porovnáno devět otisků, u kterých byl stejný počet singulárních bodů typu jádra. Z porovnávaných devíti otisků bylo sedm shodných. Výsledný prah se da určit v okolí hodnoty 0,7.

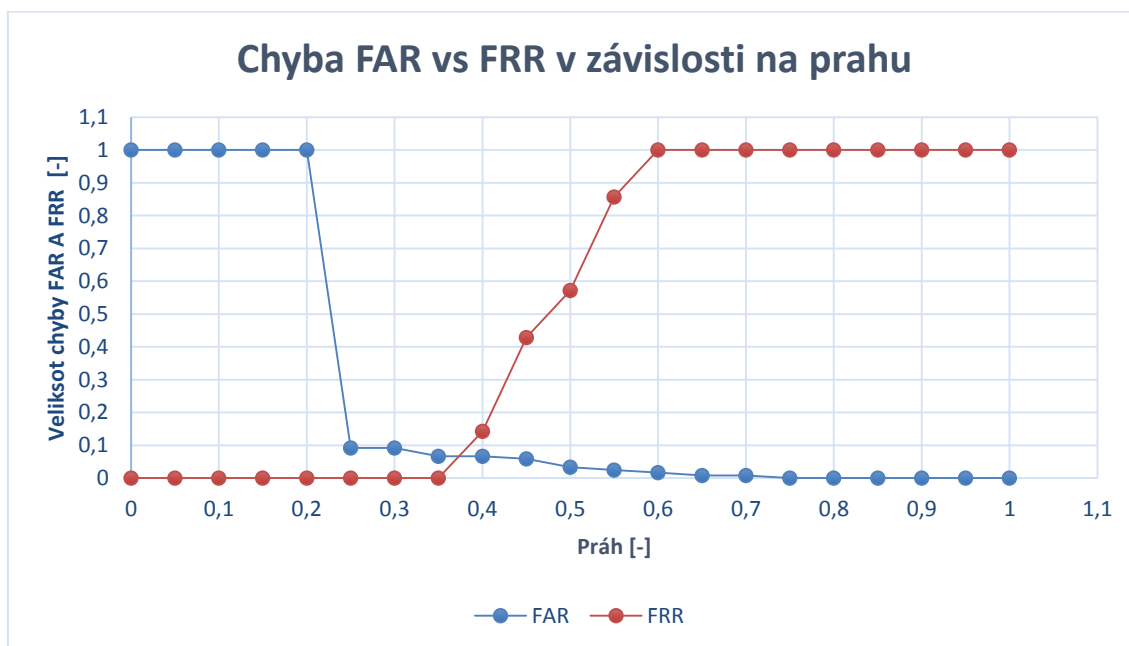


Obrázek 33: Závislost FAR/FRR na prahu pro otisk 3_1



Obrázek 34: Míra shody s právoplatných a neprávoplatných otisků s otiskem 15_1

Grafy na této stránce patří otisku prstu, který nemá žádný singulární bod. Funkci singulárního bodu při porovnávání v tomto případě nahrazuje těžiště všech markantů. Z výsledných grafů na této stránce je zřejmé, že při použití těžiště klesá práh na hodnotu 0,35.



Obrázek 35: Závislost FAR/FRR na prahu pro otisk 15_1

8.6. Grafické uživatelské rozhraní GUI

Uživatelské rozhraní slouží k obsluze aplikace bez znalostí příkazů nutných ke spuštění aplikace v příkazovém řádku. Při vytváření grafického rozhraní se myslí na intuitivní ovládání a na nejnutnější nastavitelné hodnoty.

Vytvořené uživatelské rozhraní se nachází v příloze, které bylo vytvořeno v Matlabu pomocí souboru m-file, který obsahuje popis grafické části a kód k ovládání GUI. Aplikace je navržena pro dva režimy porovnávání. První režim vyhodnotí podobnost mezi dvěma otisky, které se načtou pomocí tlačítek (Načíst referenční otisk, Načíst porovnávaný otisk) nad zobrazovacími místy otisků. Pravděpodobnost shody dvou otisků je poté vypsána v pravém dolním rohu. Uživatel může nastavit počet porovnávaných markant ukončení a rozdvojení. V případě překročení počtu markant, je hodnota automaticky snížena na maximální možnou hodnotu. V druhém případě aplikace porovná referenční otisk s náhodně vytvořenou databází, kdy minimálně jeden otisk je shodný. Počet otisků v databázi lze vybrat v rozmezí hodnot 10 až 100 s krokem deset. V dolním pravém rohu jsou vypsány názvy otisků s příslušnou pravděpodobností, které vyhověly zadanému prahu. Pravděpodobností pro jednotlivé režimy získáme pomocí příslušných tlačítek u výběru analýzy.

9. Závěr

V diplomové práci byly popsány vlastností otisků prstů z anatomického hlediska a také jejich uplatnění při identifikaci osoby. V teoretické části bylo popsáno rozdělení otisků do klasifikačních tříd v závislosti na počtu singulárních bodů. Dále jsou zmíněny charakteristické znaky na otiscích prstů, které jsou vytvořeny papilárními liniemi. Existují dva typy singulárních bodů (jádro, začátek) a dvanáct markantních bodů, ale většina algoritmů využívá pouze dva markantní body (konec respektive začátek a dvojitá vidlice). Popisují se zde i algoritmy k detekci těchto bodů. Singulární body se vypočítávají z Poincarého indexu. Pro markantní body lze využít metodu křížení nebo metodu založenou na morfologii. Po teoretické stránce je v této části popsáno předzpracování obrazů na základě Gaborových filtrů a statistické vyhodnocení účinnosti algoritmu.

V praktické části byla vyvinuta aplikace k identifikaci osob na základě otisků. K naprogramování aplikace bylo využito programového prostředí Matlab. Otisk prstů byl v Matlabu načten a na základě teorie předzpracován bankou Gaborových filtrů. Po úspěšné filtraci byl vytvořen skelet otisku prstu, na kterém se detekovaly singulární body a markanty. Porovnávání bylo založeno na eukleidovské vzdálenosti a úhlech mezi vypočtenou směrnicí od singulárního bodu jádra k markantnímu bodu a horizontální ose. Nejdříve se úhly určovaly mezi dvěma sousedními směrnicemi, ale tyto výsledky při porovnání shodných otisků byly příliš odlišné a výslednou pravděpodobnost shody snižovaly. Pro jednoduché otestování naprogramované aplikace bylo vytvořeno uživatelské rozhraní.

Z výsledných grafů lze určit hodnotu prahu pro jednotlivé druhy otisků. U otisků prstů s dvěma jádry, lze stanovit práh na hodnotu 0,7. Pro otisk s jedním jádrem je práh v rozmezí od 0,65 do 0,7. Otisk bez singulárního jádra má prahovou hodnotu přibližně 0,37. Z výsledků je patrná větší pravděpodobnost u shodných otisků, které singulární bod obsahují ve srovnání s otisky, kde se singulární bod nevyskytuje. V těchto případech jde většinou o částečné otisky, které vyžadují opětovné nasnímaní. V opačném případě se jedná o otisk nazývaný oblouk.

Pro staženou databázi otisků prstů nebyla nalezena data ostatních autorů, proto srovnání s ostatními uživateli nebylo provedeno.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma ověřovacího systému [4]	4
Obrázek 2: Schéma identifikačního systému [4]	5
Obrázek 3: Schéma stavby kůže s papilárními liniemi (podle Borovanského): 1- pokožka, 2- škára, a- rohová vrstva, b-zárodečná vrstva, c- póry, d- vývody potních žláz, e- potní žlázy, f- cévy, g- podkožní tuk, h- svalstvo. [1]	6
Obrázek 4: Rozdělení otisku podle singulárních bodů (Δ - delta , o - jádro) [6] (Z levé strany: oblouk, klenutý oblouk, smyčka vlevo, smyčka vpravo, spirála, dvojitá smyčka)	8
Obrázek 5: a) pozice pro výpočet Poincarého indexu, b) směry odpovídající jádru, c) směry odpovídající deltě [14].....	10
Tabulka 3:Daktyloskopické markanty [2]	11
Obrázek 6: morfologické operátory ukončení	13
Obrázek 7: morfologické operátory rozdvojení	13
Obrázek 8: maska osmi okolí.....	14
Obrázek 9: Výsledky korelační metody a) rozdíly velmi malé b) velké rozdíly [18]:.....	16
Obrázek 10: Schéma metody založené na FingerCode, upraveno z [9].....	19
Obrázek 11: Otisky stejného prstu v databázi označeny jako 1_1 a 1_2 s jedním singulárním bodem	22
Obrázek 12: Otisky stejného prstu v databázi označeny jako 3_1 a 3_2 s více singulárními body.....	23
Obrázek 13: Vyznačené míry chyb FMR vs. FNRM a FAR vs. FRR [1].....	26
Obrázek 14:Sled operací k vytvoření skeletonu obrazu.....	27
Obrázek 15: Rozdíl obrazu před a po normalizaci [12]	28
Obrázek 16:Obraz otisku prstu s orientačním polem	30
Obrázek 17: Znázornění odhadu lokální frekvence [12]	32
Obrázek 18: Gaborovy filtr s $f=10$ a $\theta=0$ [12]	33
Obrázek 19: Načtení otisku prstu.....	36
Obrázek 20: Vlevo vstupní obraz s orientačním pole a vpravo obrys tisku	37

Obrázek 21:Lokální frekvence v obraze	37
Obrázek 22:Banka Gaborových filtru s krokem 15°	38
Obrázek 23:Srovnání otisku před a po filtraci	38
Obrázek 24: Binární otisk a skelet otisku	39
Obrázek 25:Obrazy z vyznačenými singulárními body (červený bod jádro, modrý delta)	40
Obrázek 26: Znázornění markantních bodů.....	40
Obrázek 27:Vykreslení vzdáleností od jádra (počet ukončení = 6 a rozdvojení = 6)	41
Obrázek 28:Vykreslení vzdáleností v případě 2 jader (počet ukončení = 6 a rozdvojení = 6) .	42
Obrázek 29:Vykreslení vzdálenosti od těžiště (počet ukončení= 4 a rozdvojení= 4).....	43
Obrázek 30: Míra shody s právoplatných a neprávoplatných otisků s otiskem 1_1	46
Obrázek 31: Závislost FAR/FRR na prahu pro otisk 1_1.....	47
Obrázek 32:Míra shody s právoplatných a neprávoplatných otisků s otiskem 3_1	48
Obrázek 33:Závislost FAR/FRR na prahu pro otisk 3_1.....	48
Obrázek 34:Míra shody s právoplatných a neprávoplatných otisků s otiskem 15_1	49
Obrázek 35:Závislost FAR/FRR na prahu pro otisk 15_1.....	49

11. Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled biometrických parametrů	4
Tabulka 2: Výskyt klasifikačních tříd.....	9
Tabulka 3: Daktyloskopické markanty	11
Tabulka 4: Možné hodnoty CN	14
Tabulka 5: Rozdíl vzdáleností a úhlů pro otisky 1	45
Tabulka 6: Rozdíl vzdáleností a úhlů pro otisky 3	45
Tabulka 7: Rozdíl vzdáleností a úhlů pro otisky 15	45
Tabulka 8: Výsledné pravděpodobnosti otisku	46

Literatura

- [1] DRAHANSKÝ, Martin a Filip ORSÁG. *Biometrie*. 1. vyd. [Brno: M. Drahanský], 2011, 294 s. ISBN 978-80-254-8979-6.
- [2] RAK, Roman a Filip ORSÁG. *Biometrie a identita člověka ve forezních a komerčních aplikacích*. 1. vyd. Praha: Grada, 2008, 631 s., 32 s. barev. obr. příl. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [3] ŠČUREK, Radomír. Biometrické metody identifikace osob v bezpečnostní praxi: Studijní text. [online]. s. 58 [cit. 2015-01-05].
- [4] Understanding Biometrics. [online]. [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.griaulebiometrics.com/en-us/book/understanding-biometrics>
- [5] STRAUS, Jiří. *Kriminalistická technika: Criminalistic technique*. 3., rozšířené vydání. 446 pages. ISBN80-738-0409-3.
- [6] Fingerprint recognition [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://lisa.ulb.ac.be/image/index.php/Fingerprint_recognition
- [7] Local Correlation-based Fingerprint Matching. [online]. s. 6 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: http://biometrics.cse.msu.edu/Publications/Fingerprint/NandakumarJain_LocalCorrelation_FPM_ICVGIP04.pdf
- [8] A HIERARCHICAL FINGERPRINT MATCHING SYSTEM. [online]. s. 99 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.security.iitk.ac.in/contents/publications/mtech/AbhishekRawat.pdf>
- [9] BIANCHI, Tiziano, Stefano TURCHI, Alessandro PIVA, Ruggero Donida LABATI, Vincenzo PIURI a Fabio SCOTTI. Implementing FingerCode-based identity matching in the encrypted domain. *2010 IEEE Workshop on Biometric Measurements and Systems for Security and Medical Applications* [online]. 2010, s. 7 [cit. 2015-01-05]. DOI: 10.1109/bioms.2010.5610445. Dostupné z: http://www.researchgate.net/publication/224185321_Implementing_Fin

- [10] The History of Fingerprints. [online]. [cit. 2015-01-05].
Dostupné z: <http://www.onin.com/fp/fphistory.html>
- [11] A Review on Fingerprint-Based Identification System. [online]. s. 3 [cit. 2015-01-05].
Dostupné z:
<http://www.ijarcce.com/upload/2014/march/IJARCCE1J%20%20%20a%20ritu%20A%20review%20on%20fingerprint.pdf>
- [12] HONG, Lin, Yifei WAN a A. JAIN. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 1998, vol. 20, issue 8, s. 777-789 [cit. 2015-01-05]. DOI: 10.1007/springerreference_70834
- [13] MALTONI, Davide, et al. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York, USA : Springer, 2005. 347 s. ISBN 0-387-95431-7.
- [14] AWAD, Ali Ismail; BABA, Kensuke. Singular point detection for efficient fingerprint classification. *International Journal of New Computer Architectures and their Applications (IJNCAA)*, 2012, 2.1: 1-7.
- [15] BANSAL, Roli; SEHGAL, Priti; BEDI, Punam. Minutiae extraction from fingerprint images-a review. *arXiv preprint arXiv:1201.1422*, 2011.
- [16] KOČANDRLE, Milan a Leo BOČEK. 2001. *Matematika pro gymnázia: analytická geometrie*. 2., upr. vyd. Praha: Prometheus, 220 s. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 80-719-6163-9
- [17] HOFÍREK, Mojmír. *Mechanika - statika: učebnice*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998, dotisk 2001, 96 s. Učebnice pro odborné školy (Fragment). ISBN 80-7200-231-7.
- [18] Filla, David. Biometrie otisku prstu. Diss. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011.

Seznam použitých zkratek

AFIS *Automated Fingerprint Identification System*, Automatický systém identifikace dle otisku prstů

DNA deoxyribonucleic acid, deoxyribonukleová kyselina

dpi *Dots Per Inch*, počet bodů (pixelů) na palec

FAR *False Acceptance Rate*, míra chybného přijetí

FMR *False Match Rate*, míra chybné shody

FNMR *False Non-Match Rate*, míra chybné neshody

FRR *False Rejection Rate*, míra chybného odmítnutí

GUI *Graphical User Interface*, grafické uživatelské rozhraní

JPEG *Joint Photographic Experts Group*, formát zpracování obrazu

WSQ *Wavelet Scalar Quantization*, komprimační metoda zpracování obrazových dat

Seznam symbolů

∇_x	gradient ve směru osy x
∇_y	gradient ve směru osy y
φ	odchylka přímek
Ω	řezový vektor
CC	vzájemná korelace
CN	počet křížení
F	frekvence
F	lokální frekvence papilárních linií
G	Gaborův filtr
H_0	nulová hypotéza
H_1	alternativní hypotéza
I	sejmutý šedotonový obraz
$I(i, j)$	intenzita pixelu (i, j)
M_0	požadovaná střední hodnota
N	normalizovaný obraz
O	směrový obraz
P	pravděpodobnost
$P(i, j)$	Poincaré index
S	souřadnice středu
SSD	součet rozdílů mezi intenzitami odpovídajících si pixelů na druhou
T	obraz z databáze
u	směrnice přímky

V_0	požadovaná hodnota variance
x_0	souřadnice x
x_t	souřadnice těžiště x
$X[k]$	k-tý prvek x-signatury
y_0	souřadnice y
y_t	souřadnice těžiště y

Seznam příloh

- A** **Obsah přiloženého CD**
- B** **Grafické uživatelské rozhraní**

A Obsah přiloženého CD

Adresář:	Popis obsahu
Diplomová práce	V adresáři se nachází dokument v pdf
Program	Adresář obsahuje program s m-file a otisky

B Grafické uživatelské rozhraní

Nastavení

Počet markantů ukončení:

Počet markantů rozdělení:

Počet porovnaných otisků:


Práh:

Volba dat


Nacít referenční otisk

Nacít porovnaný otisk

Referenční otisk



Porovnaný otisk



Výběr analýzy

Porovnání 2 otisků

Dosažená pravděpodobnost: