



# 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

## BIOMETRICKÁ IDENTIFIKACE OTISKU PRSTU

BIOMETRIC FINGERPRINT IDENTIFICATION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Dašek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Smital, Ph.D.

BRNO 2020



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

**Student:** Filip Dašek

**ID:** 195729

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**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.

### 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:** 31.7.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Smital, Ph.D.

**prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

V biometrii využíváme fyzických znaků k identifikaci a verifikaci osob. Mezi nejznámější techniku patří rozpoznávání fyzické identity pomocí otisků prstů. Tato technika využívá jedinečných struktur, které vytváří papilární linie, pro jasné určení identity vlastníka otisku. Práce obsahuje souhrn metod, jež se během let vytvořily pro analýzu a zpracování otisků. V praktické části je popsán vytvořený algoritmus pro hledání shody otisků využívající metodu dvou párů a výpočtu transformační matice pro správné zarovnání otisků. Algoritmus je testován na vytvořené databázi obsahující otisky z databází LivDet. Úspěšnost hledání shody je pak vyjádřena hodnotou EER a tato hodnota je porovnána s dalšími algoritmy ze soutěže FVC 2006.

## **Klíčová Slova**

Otisk prstu, papilární linie, markant, singularita, jádro, delta, segmentace, pole orientací, binarizace, korelace, Gaborův filtr, potní pór

## **Abstract**

In biometrics we use distinctive physical features for identification and verification of identity. The most famous technique is identification by fingerprints. This technique use unique structure created by papillary lines for unambiguous identification. Thesis contains methods which were created throughout the years for analysis and adjustments of fingerprint. The algorithm is based on comparing two pairs of minutiae and calculating transform matrix for correct alignment. Algorithm is tested on dataset created from LivDet databases. Performance of algorithm is represented by value EER which is compared with EERs of other algorithms tested in FVC 2006.

## **Keywords**

fingerprint, papillary lines, minutiae, singularity points, core, delta, segmentation, orientation image, binarization, correlation, Gabor filter, sweat pore

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

# Obsah

Úvod .....	1
Historie .....	1
Teorie.....	2
1 Metody biometrické identifikace otisku prstu .....	3
1.1 Snímání otisků prstů .....	3
1.1.1 Optické snímače .....	3
1.1.2 Kapacitní snímače .....	3
1.1.3 Teplotní snímače .....	4
1.1.4 Ultrazvukové snímače .....	4
1.2 Třídy otisků prstů.....	5
1.2.1 Poincaré index .....	5
1.2.3 Henryho klasifikační systém .....	6
1.3 Metody založené na markantech .....	7
1.3.1 Markanty .....	7
1.3.2 Detekce markantů .....	8
1.3.3 Porovnávání markantů .....	9
1.3.4 Zarovnání otisků .....	9
1.3.5 Přímá extrakce z šedotónového obrazu .....	9
1.4 Metoda založené na korelaci.....	11
1.5 Metody nezaložené na markantech .....	12
1.5.1 detekce a porovnávání potních pórů .....	12
1.5.2 Počet a frekvence papilárních linií.....	13
1.5.3 Globální a lokální texturní informace .....	14
2 Zpracování otisku prstu .....	16
2.1 Normalizace obrazu.....	16
2.2 Segmentace .....	17
2.3 Pole orientací.....	17
2.3.1 Metoda založená na gradientu.....	18
2.4 Lokální frekvence papilárních linií .....	19
2.5 Filtrace obrazu.....	20
2.6 Binarizace obrazu .....	21
2.6.1 Ztenčování papilárních linií.....	22
3 Praktická část.....	23

3.1 Databáze otisků .....	23
3.2 Popis zpracování otisku .....	23
3.2.1 Normalizace .....	23
3.2.2 Pole orientací a lokální frekvencí .....	24
3.2.3 Gáborovy filtry .....	25
3.2.3 Segmentace .....	25
3.2.4 Prahování obrazu a ztenčení papilárních linií .....	26
3.2.5 Detekce markantů .....	26
3.3 Porovnávání otisků .....	27
3.4 Zhodnocení výsledků .....	28
3.4.1 Porovnání s dalšími algoritmy .....	29
3.5 Závěr .....	31
Seznam Obrázků .....	i
Literatura .....	ii

# Úvod

Tato práce shrnuje základní metody rozpoznávání otisků prstů. Popisuje základní znaky jako markanty, singularity a potní žlázy, které se při rozpoznávání otisků používají. Stručně definuje Henryho klasifikační systém. Dále se práce zaměřuje na zpracování otisku prstu. Především přibližuje jednotlivé kroky, které jsou důležité pro extrakci a detekci papilárních linií a s nimi spojená detekce markantů a singulárních bodů. Mezi tyto kroky patří úprava kontrastu, segmentace obrazu, při níž dojde k oddělení otisku od pozadí, filtrace šumu Gáborovými filtry, vytvoření pole orientací a binarizace. V praktické části se aplikovali metody pro zpracování otisků popsané v teoretické části. V matlabu byl vytvořen algoritmus detekující markanty nacházející se na otisku. Dále algoritmus porovnává extrahované markanty na jednotlivých otiscích a hledá nejlepší zarovnání. Skóre je vypočítáno z počtu shod markantů a korelace pole orientací.

## Historie

V biometrii dnes otisky prstů patří mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější metodu pro identifikaci osoby. Základní principy této metody byly vytvořeny již v 19. století, kdy se také poprvé začali objevovat pokusy o vytvoření prvních databází. V roce 1892 sir Francis Galton vydal rozsáhlou studii o otiscích prstů a představil metodu založenou na porovnávání markantů. Na konci 19. století byl vytvořen Henryho klasifikační systém, který rozděluje otisky do jednotlivých skupin podle vzorů vytvořenými papilárními liniemi.

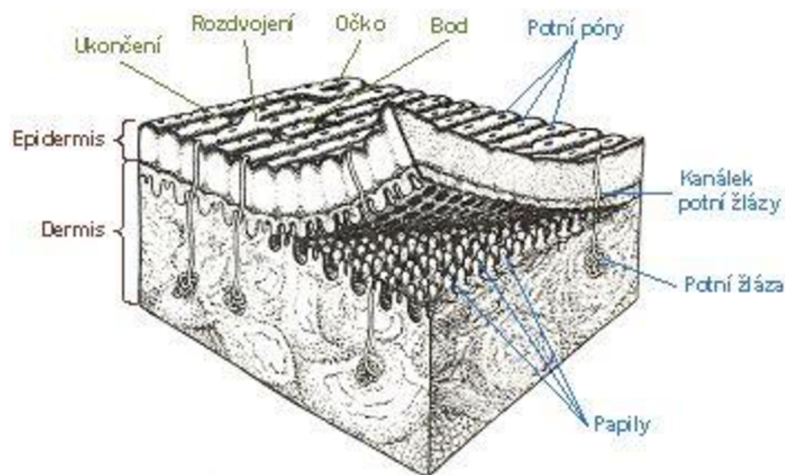
Velký rozmach však přišel ve 20. století a využití otisků v kriminologii. V roce 1924 vytvořila FBI databázi, která obsahovala 810 tisíc sad otisků. Vzhledem k rostoucímu počtu záznamů bylo nutné vytvořit automatizované systémy. V roce 1965 FBI poprvé použila daktyloskopický systém AFIS (Automated Fingerprint Identification System). V dnešní době využití identifikace pomocí otisků prstů v civilním sektoru přerostlo její původní dominanci v kriminologii.

## Teorie

Technologie rozpoznávání otisků prstů je v současnosti nejrozšířenější technologií pro identifikaci a verifikaci fyzické identity jedince. Využívá se papilárních linií, které se nacházejí na konečkách prstů (rukou i nohou), dlaních a chodidlech. Papilární linie jsou tvořeny papily, vyvýšenými částmi na povrchu kůže, které vytvářejí jedinečnou strukturu (obr. 1.1). Výška papilárních linií je v rozmezí 0,1 - 0,4 mm a šířka 0,2 – 0,7 mm. Grafickou reprezentací těchto struktur je otisk prstu, který využíváme k jednoznačnému určení fyzické identity osoby.

V praxi je daktyloskopie (nauka o kožních papilárních liniích) postavená na třech základních pravidlech:

1. relativní neměnnost obrazců – Papilární linie se tvoří již během embryonálního vývoje jedince. Během života se obrazce tvořené papilárními liniemi nemění. Z důvodů růstu se může měnit jejich velikost a absolutní vzdálenost jednotlivých linií.
2. individuálnost obrazců papilárních linií – Na světě neexistují 2 osoby se stejnými otisky prstů. Platnost tohoto zákona je ověřena dlouhodobou praxí a také matematicky např. Francis Galton spočetl pravděpodobnost shody 2 otisků prstů na 1:64 miliardám.
3. Relativní neodstranitelnost papilárních linií – Papilární linie jsou obnovovány dorůstáním kůže. Nemohou být změněny ani odstraněny, není-li poškozena zárodečná vrstva kůže.



Obrázek 1.1 Řez kůží



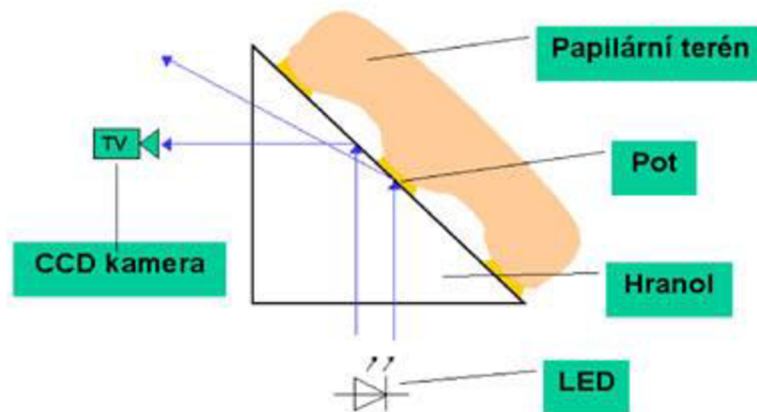
# 1 Metody biometrické identifikace otisku prstu

## 1.1 Snímání otisků prstů

Před seznámením s jednotlivými metodami identifikace otisků prstů je vhodné vědět, jak otisky získáváme. V dnešní době existuje spousta komerčních snímačů, které dělají snímky otisků různé kvality. Dříve se nejvíce používala inkoustová metoda, kdy na konečky prstů byl nanesen černý inkoust a poté byly otisknuty na papír. Papír s otisky byl pak pomocí skenu převeden do digitální podoby. Dnes se využívá tzv. live-scanning, kde není zapotřebí použití inkoustu. Tato metoda vytváří digitální otisky nasnímaný přímo z povrchu konečků prstů. Ke snímání používáme snímač otisku prstů. Nejdůležitější část live-scan snímače je jeho senzor, kde se vytváří obraz otisku. Mezi nejpožívanější patří optické a kapacitní senzory.

### 1.1.1 Optické snímače

Optické skenery jsou založeny na odrazu a pohlcení světla. Prst je přiložen na průhledný povrch senzoru a je osvětlen světlem. Světlo je pohlceno papilárními liniemi a od mezer mezi papilárními liniemi je naopak odraženo (obrázek 1.2). Na snímku otisku se budou papilární linie zobrazovat černě. Odražené světlo je pomocí čočky fokusováno do CCD nebo CMOS senzoru (tyto senzory přeměňují energii dopadajícího světla na elektrický signál). Optické senzory není jednoduché oklamat fotografií nebo inkoustovým otiskem prstu, protože snímání je založeno na 3D reprezentaci povrchu prstu.[2]

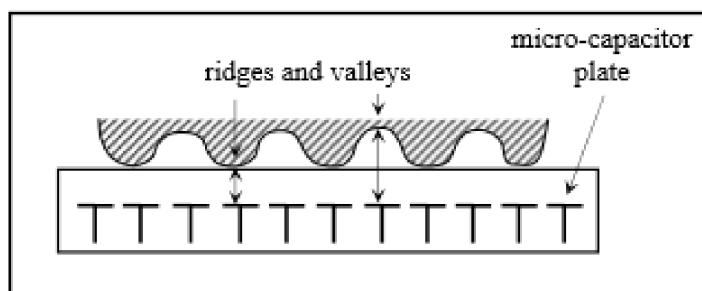


Obrázek 1.2 princip snímání optickým senzorem[18]

### 1.1.2 Kapacitní snímače

Kapacitní senzor je založený na principu rozdílu kapacity mezi deskou snímače a otiskem prstu. Samotný senzor je čip tvořen maticí mikro destiček a další desku tvoří samotný prst (obrázek 1.3). Mezi Otiskem a destičkami se vytváří malé elektrické výboje jejichž velikost zaleží na vzdálenosti povrchu otisku a jednotlivými destičkami. Následnou analýzou velikosti jednotlivých kapacit

můžeme vytvořit digitální reprezentaci povrchu prstu. Povrch čipu musí mít ochrannou vrstvu proti chemickému (Na v potu) a mechanickému poškození. Senzor musí mít také správné uzemnění pro ochranu před elektrostatickými výboji. Kapacitní skenery se stejně jako optické nedají snadno oklamat fotografií, jelikož snímají trojrozměrný povrch otisku.[2]



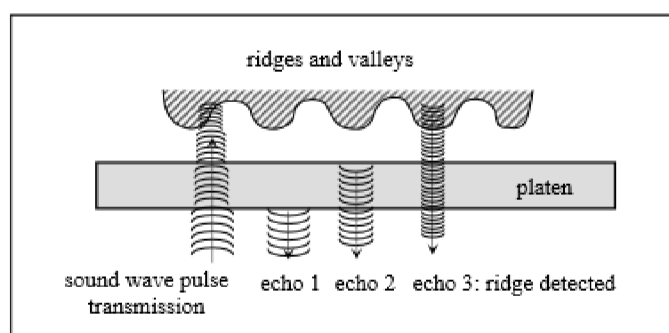
Obrázek 1.3 princip snímání kapacitním senzorem [2]

### 1.1.3 Teplotní snímače

Teplotní senzory jsou pyrodetektory, které jsou vytvořeny z pyroelektrického materiálu. Pyroelektrický materiál má schopnost generovat proud v závislosti na jeho teplotě. Papilární linie díky kontaktu s povrchem senzoru převádějí více tepla na senzor než zbytek povrchu prstu. Senzor je většinou udržován na poměrně vysoké teplotě, aby bylo docíleno zobrazení obrazu při kontaktu. Pro získání otisku je nutné přejíždět prstem po povrchu senzoru, což vytvoří tzv. digitální pásy, které se musí následně skládat do výsledného otisku prstu.

### 1.1.4 Ultrazvukové snímače

Ultrazvukové skenery získávají otisk prstu pomocí vysílání ultrazvukových vln směrem k povrchu prstu a registrací jejich odrazu od povrchu prstu (obrázek 1.4). Senzor se skládá z generátoru akustických signálů a z přijímače, který detekuje následný odražený signál. Výhodou ultrazvukových skenerů je jejich schopnost odhalit nalepený falzifikát otisku. Vlny odražené od falzifikátu neodpovídají charakteristickým odrazem od živé tkáně.[5]



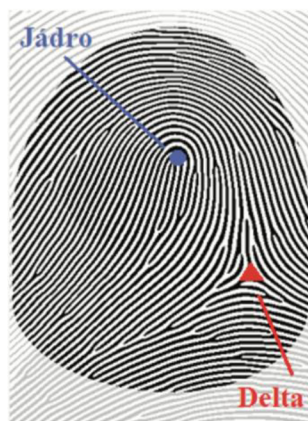
Obrázek 1.4 princip snímání ultrazvukovým snímačem [2]

## 1.2 Třídy otisků prstů

Důležitým rysem otisku prstu je jeho jádro a delta, také nazývané singularními body. Jádro se nachází na vrcholu nejvíce vnitřní papilární linie a delta je bod kde probíhají papilární linie do tří směrů (obrázek 1.6). Analýzou počtu a umístění singularních bodů dokážeme určit třídu otisku prstu (obrázek 1.5). Singularity se využívají ve většině klasifikačních systémů.[1] Existuje 6 základních tříd podle rozdělení singularních bodů. Oblouk neobsahuje žádnou singularitu. Klenutý oblouk obsahuje dva singularní body, deltu a jádro které je přímo nad deltou. Levá a pravá smyčka obsahuje jádro a deltu, orientaci smyčky určuje umístění delty. Závít obsahuje 2 delty a dvojitá smyčka k tomu obsahuje 2 jádra.



**Obrázek 1.5** a) Oblouk (arch), b) klenutý oblouk, c) levá smyčka, d) pravá smyčka e) závit, f) dvojitá smyčka [1]



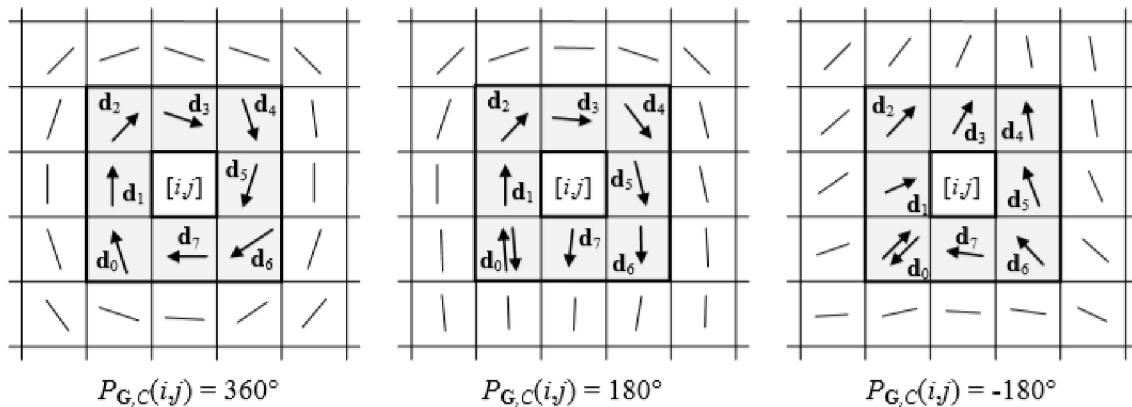
**Obrázek 1.6** Jádro a Delta [19]

### 1.2.1 Poincaré index

Pro detekci jádra a delty otisku se široce využívá metoda založená na tzv poincaré indexu. Metoda je založená na celkovém natočení vektorů, které se nacházejí ve vektorovém poli G

kolem křivky C. Použijeme-li pole orientací (viz kapitola 2.3 Pole orientací) jako vektorové pole G, kde se na pozici  $[i, j]$  přidělí úhel  $\theta_{ij}$ , pak se Poincaré index  $P_{GC}(i, j)$  pro každý bod  $[i, j]$  vypočítá sečtením orientací všech přilehlých bodů křivky C.[2] Ke sečtení rozdílů úhlů je nutné znát jejich směr. Tento problém lze vyřešit přidělením náhodného směru prvnímu bodu a poté ostatním bodům postupně přidávat směr, který je nejbližší ke předchozímu směru. Tento postup je znázorněn na obrázku 1.4, kde se náhodně určil směr bodu  $d_0$  a postupně se přiděloval směr nejbližším bodům. V případě uzavřené křivky Poincaré index nabývá jedné z pěti diskrétních hodnot:  $0, \pm 180, \pm 360$  (obrázek 1.7)

$$P_{GC}(i, j) \begin{cases} 0^\circ & \text{bod } [i, j] \text{ neobsahuje žádnou singularitu} \\ 360^\circ & \text{v bodě } [i, j] \text{ se nachází závit} \\ 180^\circ & \text{v bodě } [i, j] \text{ se nachází smyčka} \\ -180^\circ & \text{v bodě } [i, j] \text{ se nachází delta} \end{cases}$$



Obrázek 1.7 směry  $d_n$  pro závit, smyčku a deltu (zleva) [2]

### 1.2.3 Henryho klasifikační systém

Klasifikační systémy vznikly z důvodů velkého množství otisků prstů nacházející se v databázích, a proto byly jednotlivé sady otisků v databázích roztrženy do menších podtříd. Vytvořením podtříd se zmenšila výpočetní náročnost a tím i doba hledání určité identity.[3]

Základním modelem pro třídění otisků prstů je Henryho klasifikační systém. Tento systém kategorizuje sady otisků prstů tzn. všech 10 prstů na ruce do jednotlivých skupin podle tří základních vzorů (oblouk, smyčka a závit), které jsou na otiskách. Jednotlivým otiskům je přiřazeno číslo podle jeho umístění na ruce. Číslování začíná na palci pravé ruky číslem 1 a končí na malíčku levé ruky číslem 10. Systém přidělí prstům obsahující závit hodnotu podle jejich čísla. Prsty 1 a 2 mají hodnotu 16, prsty 3 a 4 dostanou hodnotu 8 a to pokračuje až k prstům 9 a 10 kterým je přiděleno hodnota 1 (Tabulka 1). Prstům neobsahující závit je přiřazena hodnota 0.

**Tabulka 1: Henryho klasifikační systém**

	L malíček	L prsteník	L prostředník	L ukazovák	L palec	P palec	P ukazovák	P prostředník	P prsteník	P malíček
<b>číslo prstu</b>	10	9	8	7	6	1	2	3	4	5
<b>Hodnota (když má závit)</b>	1	1	2	2	4	16	16	8	8	4

Záznamy jsou rozděleny do skupin podle následující rovnice.

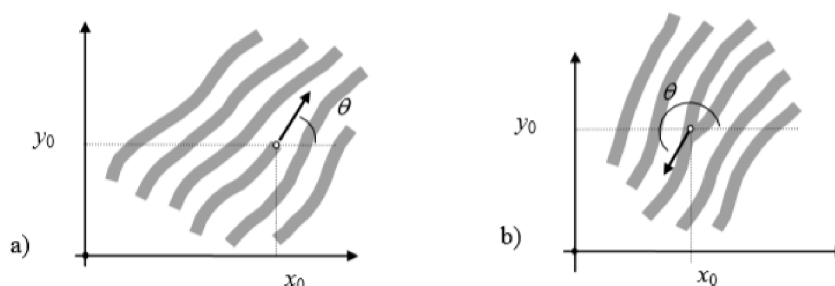
$$\frac{1 + (\text{suma hodnot sudých prstů})}{1 + (\text{suma hodnot lichých prstů})} = \text{poměrová skupin} \quad (1)$$

Jedinec s prsty obsahující pouze oblouky a smyčky by tedy patřil do skupiny 1:1 a jedinec se vzorem závitů na všech deseti prstech by patřil do skupiny 31:31. Henryho klasifikační systém tedy dosahuje 1024 hlavních skupin.[4]

## 1.3 Metody založené na markantech

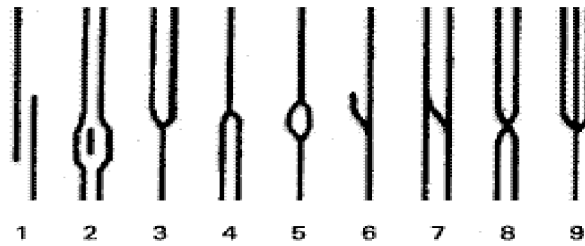
### 1.3.1 Markanty

Třídy nám pomáhají rozřadit otisky prstů do skupin, ale nestačí na jejich rozlišení a nalezení shody s hledanou identitou. K tomu využíváme speciálních útvarů tvořené papilárními liniemi tzv. markanty.[5] Porovnání pomocí markantů je nejvíce prozkoumaná a nejpoužívanější metoda pro hledání shody otisků. Systémy porovnávají polohy a sklon markantů pro vyloučení či potvrzení shody otisků.



**Obrázek 1.8** úhel a poloha markantu a) zakončení b) rozdvojení/vidlička [2]

Počet markantů se na otisku liší v závislosti na jeho kvalitě. Jeden otisk prstu může obsahovat více než 100 markantů, avšak pouze 15 markantů stačí pro určení shody otisků s vysokou přesností.[2] Základní markanty jsou zobrazeny na obrázku 1.6.



**Obrázek 1.9** 1) zakončení, 2) jednoduchá smyčka, 3 a 4) vidlička, 5) bod, 6) hák, 7) most, 8) křížení, 9) trojitá vidlička; [upraveno z 20]

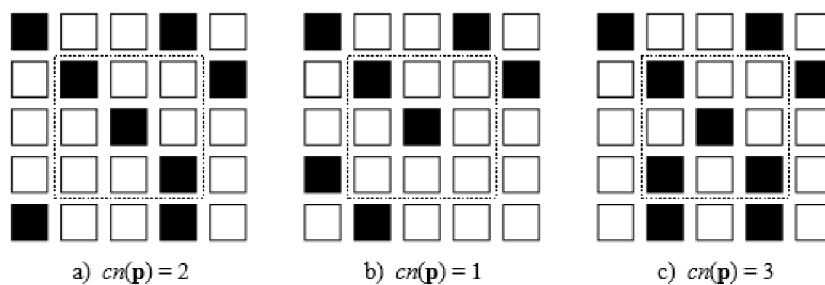
### 1.3.2 Detekce markantů

Markanty se většinou detekují ze skeletovaného otisku (viz. Kapitola 2.6.1). Snadnou metodou je porovnávání okolí pixelu  $p[x, y]$  patřící papilární linii pomocí tzv. *crossing number*  $cn()$ , kdy sčítáme rozdíly mezi dvojicemi sousedních pixelů patřící do okolí  $p[x, y]$  (obrázek 1.10).

$$cn(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1..8} |val(p_{i \bmod 8}) - val(p_{i-1})| \quad (2)$$

Podle hodnoty  $cn(p)$  se určuje, jestli je bod markant.

- Markant typu zakončení, když  $cn(p)=1$
- Pixel leží uvnitř papilární linie, když  $cn(p)=2$
- Markant typu vidlička, když  $cn(p)=3$



**Obrázek 1.10** detekce markantů [2]

Vzhledem k nepřesnostem, které vznikají při ztenčování papilárních linií je během tohoto procesu detekováno podstatné množství falešných markantů, a proto je nutné detekované markanty dále analyzovat a filtrovat.

### 1.3.3 Porovnávání markantů

Každý markant může být popsán hned několika vlastnostmi jako například jeho typem (rozdvojení, ukončení), polohou v obrazu otisku, orientací. Většina algoritmů považuje každý markant za triplet  $m = \{x, y, \theta\}$ , kde  $x, y$  značí jeho polohu a  $\theta$  jeho úhel.[2]

$$T = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}, m_i = \{x_i, y_i, \theta_i\}, i = 1 \dots m \quad (3)$$

$$I = \{m'_1, m'_2, \dots, m'_n\}, m'_j = \{x'_j, y'_j, \theta'_j\}, j = 1 \dots n \quad (4)$$

V těchto rovnicích  $m$  a  $n$  značí počet markantů v obrazech  $T$  a  $I$ . Markant  $m_i$  z otisku  $T$  a markant  $m'_j$  z otisku  $I$  můžeme považovat za shodný, pokud jsou v oblasti určené prostorové a úhlové tolerance ( $r_0, \theta_0$ ). Určení prahů – tolerancí  $r_0, \theta_0$  je nutné, neboť při snímání a zpracování otisků dochází k chybám, které mohou lehce změnit úhel či polohu markantu.

$$sd(m'_j, m_i) = \sqrt{(x'_j - x_i)^2 + (y'_j - y_i)^2} \leq r_0 \quad (5)$$

$$dd(m'_j, m_i) = \min(|\theta'_j - \theta_i|, 360^\circ - |\theta'_j - \theta_i|) \leq \theta_0 \quad (6)$$

### 1.3.4 Zarovnání otisků

Zarovnání a nalezení oblasti překryvu otisků je důležitý krok pro zvýšení počtu porovnávaných se markantů. Správné zarovnání otisků vyžaduje posun v osách  $x$  a  $y$ , rotaci  $\theta$  a také kompenzování dalších geometrických rozdílů, např. škálování v případě že jsou otisky nasnímané v jiném rozlišení.[2] Pomocí rovnice 6 s transformačními parametry ( $\Delta x, \Delta y, \theta$ ) se vypočítají nové souřadnice markantů  $m'_j$  nacházející se na otisku  $I$ ,

$$\begin{bmatrix} x''_j \\ y''_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (7)$$

Poté se pomocí úhlové a prostorové tolerance, popsané v kapitole 1.2.3, porovnávají jednotlivé markanty na otisku  $T$  a  $I$  a určuje se jejich shoda. Pro správné zarovnání otisků je nutné nalezení správných transformační parametrů, a proto algoritmy hledají transformační parametry, které zajišťují největší shodu otisků. Optimální párování zarovnaného otisku může komplikovat situace, kdy se do úhlové a prostorové tolerance vejde více jak jeden markant.

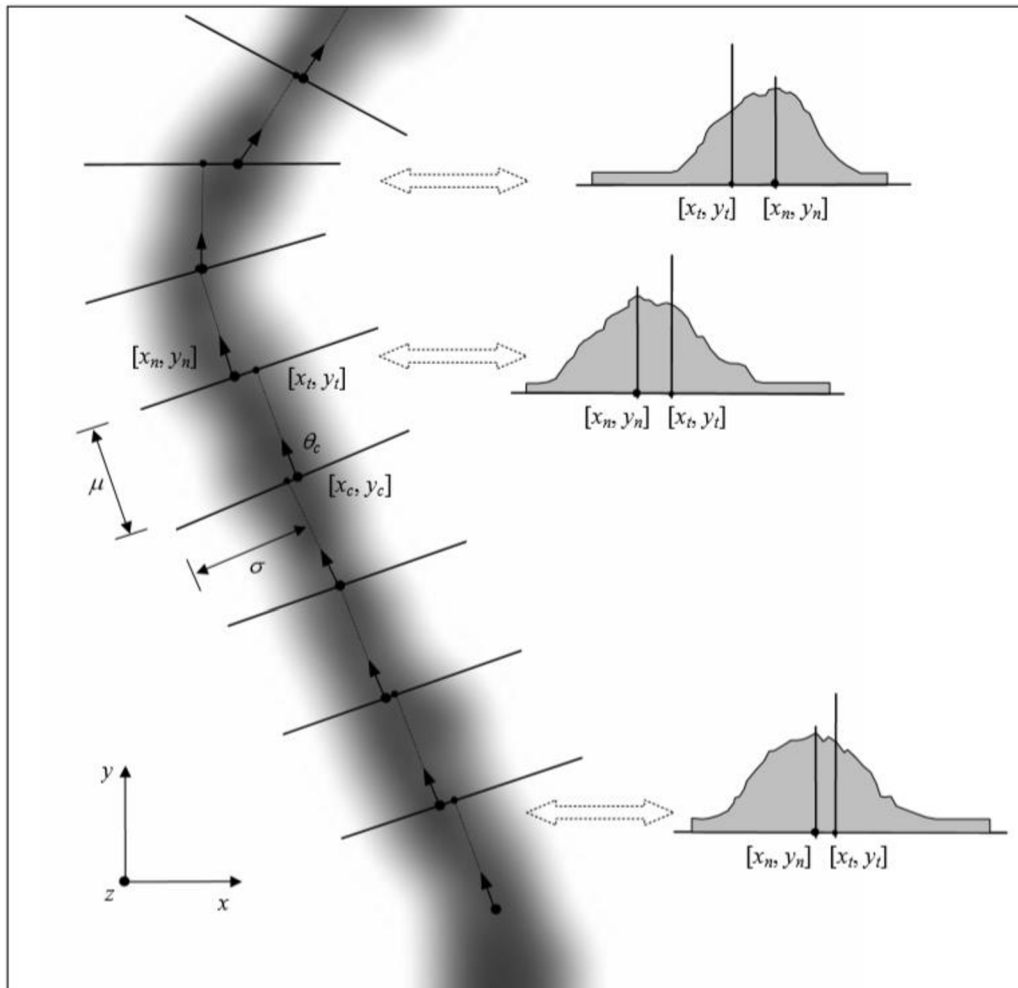
### 1.3.5 Přímá extrakce z šedotónového obrazu

Binarizací otisku a následné ztenčování papilárních linií (viz 2.6 Binarizace obrazu a 2.6.1 ztenčování papilárních linií) může vytvářet falešné markanty.[3] Pro vyhnutí se problémům spojené s binarizací a ztenčování linií vznikla metoda využívající detekci markantů přímo z šedotónového obrazu.

Metoda je založená na sledování papilární linie v šedotónovém obrazu pomocí lokální orientace této linie. Papilární linii lze definovat jako sadu bodů lokálních maxim, které jdou

v jednom směru.[2] Algoritmus se snaží v každém kroku lokalizovat lokální maximum v profilu které je kolmé ke směru papilární linie.

Ve startovací pozici  $[x_c, y_c]$  a směru  $\theta_c$ , algoritmus vypočítá nový bod  $[x_t, y_t]$  pohybující se krokem  $\mu$  z jeho současné pozice  $[x_c, y_c]$  podél směru  $\theta_c$ . Poté vypočítá oblast (profil) kolmou ke směru  $\theta_c$  s bodem  $[x_c, y_c]$  jako střed a o délce  $2\sigma + 1$ . Z oblasti se získá lokální maximum, ve kterém vznikne nový bod  $[x_n, y_n]$ . Bod  $[x_n, y_n]$  se v následujícím kroku stane novým  $[x_c, y_c]$ . Po vypočítání nového  $\theta_c$  v bodě  $[x_n, y_n]$  se celý proces opakuje. (obrázek 1.11).[6]



**Obrázek 1.11** sledování papilární linie v šedotónovém obrazu [2]

V tomto procesu je nutné správné zvolení parametrů  $\mu$  a  $\sigma$ , které se přizpůsobuje tloušťce papilárních linií. Algoritmus běží, dokud nenarazí na jedno z ukončujících kritérií. Pokud se linie rozdvojí nebo dojde k jejímu ukončení, algoritmus se zastaví a vypíše charakteristiku detekovaného markantu (poloha, typ a směr).

Tato metoda je realizačně poměrně náročná. Setkáváme se zde s problémem, aby algoritmus analyzoval každou linii pouze jednou a nedetekoval markanty které již byli detekovány.[6]



## 1.4 Metoda založené na korelaci

Korelační metoda porovnává dva otisky a určuje jejich podobnost. Čím větší je vzájemná korelace tím jsou si otisky více podobné.

$$CC(T, I) = T^T \cdot I \quad (8), [2]$$

Rovnice 8 ukazuje korelaci otisku  $T$  a  $I$  bez posunu a rotace. Pro nalezení největší shody se s jedním otiskem otáčí, nejčastěji okolo jádra otisku. V rovnici 9  $\Delta x$  a  $\Delta y$  značí posunutí na osách  $x$  a  $y$  a  $\theta$  reprezentuje úhel otočení.

$$S(T, I) = \max_{\Delta x, \Delta y, \theta} CC(T, I^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}) \quad (9), [2]$$

Použití přímo této rovnice většinou nevede k dobrým výsledkům z důvodů různé globální struktury nasnímaných otisků. [2] Na obrázku 1.12 jsou vidět snímky, *a)* a *b)*, vzájemné korelace dvou shodných otisků. Na snímku *b)* je vidět nízká hodnota korelace a to přesto, že jsou otisky shodné. Kvalita otisku prstu je ovlivněna tlakem prstu při snímání a stavu kůže. Světlost, kontrast a tloušťka linií se může výrazně měnit. Nevýhodou této metody je také velká výpočetní náročnost.



Obrázek 1.12 korelace otisků prstů [upraveno z 2]

Další korelační metoda je založená na vybrání charakteristické oblasti otisku prstu, která se použije pro nalezení místa na druhém otisku, ve kterém se oblast shoduje nejvíce. Poté se porovnává poloha obou oblastí a určí se, jestli se otisky shodují. [7]

Základním krokem je vybrat vhodnou oblast - šablonu. Dobře vybraná šablona bude jednoduše nalezená na druhém otisku a zvýší tím pravděpodobnost správného určení shody. Velikost šablony je také důležitá. Velká šablona nebude dosahovat vysoké spolehlivosti, protože během snímání a předzpracování obrazu dochází ke zkreslení tvaru otisku prstu (viz

výše). Větší šablony jsou také mnohem výpočetně náročnější. Když zvolíme příliš malou šablonu, nebude zde dostatek informací ke správnému určení shody a dojde k falešnému nalezení shody.[7] Vhodná velikost šablony je ovlivněna i rozlišením ve kterém je otisk pořízen. Typická velikost šablony je 24x24 nebo 32x32 pixelů.[2]

Jednou z možností pro získání dobré šablony je porovnáním šablony s dalšími místy na stejném otisku. Pokud šablona dobře sedí i na jiná místa stejného otisku, tak se jedná o špatně zvolenou šablonu a nevhodnou pro porovnávání. V případě že šablona nesedí do žádného jiného místa na stejném otisku prstu, tak je charakteristickou oblastí pro daný otisk a vhodná pro porovnávání. [7]

Pro vhodný výběr šablony lze také využít markantů. Šablona obsahující jeden nebo dva markanty zjednodušuje správné nalezení oblasti na druhém otisku. Nevýhodou této metody je, že musíme nalézt a lokalizovat markanty a poté kolem nich vytvořit šablony. Při tomto procesu bude pravděpodobně lokalizováno několik falešných markantů a tím i vytvořeno několik nevhodných šablon.[7]

## 1.5 Metody nezaložené na markantech

Markanty nesou důležité rozlišovací informace, ale nemusí být vždy nejvhodnější metodou. To obzvlášť platí pro otisky s velmi špatnou kvalitou. Tato metoda je také méně efektivní na menších otiskách obsahující například jenom 4-5 markantů. Další vlastnosti otisků používající se pro rozpoznávací metody se však často spojují s metodami porovnávající markanty, aby se docílilo lepších výsledků. Některé vlastnosti a metody se také využívají k zarovnávání otisků.[2]

Mezi vlastnosti používající se k porovnávání patří:

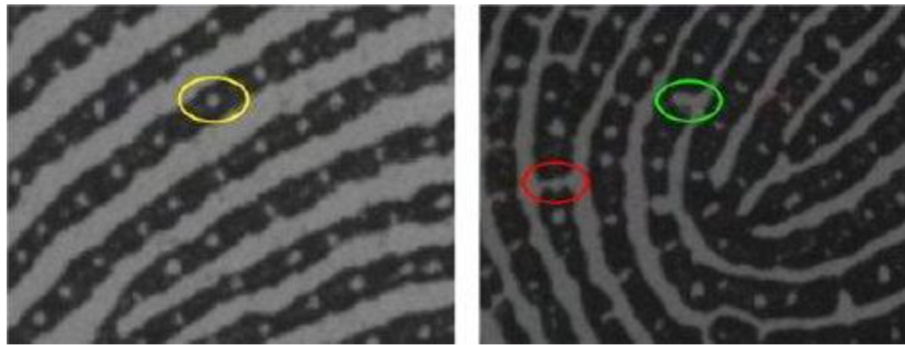
- 1.) Velikost a tvar otisku prstu
- 2.) Počet, typ a pozice vzorů
- 3.) Detekce a porovnávání potních pórů
- 4.) Orientace a frekvence papilárních linií
- 5.) Texturní informace

### 1.5.1 detekce a porovnávání potních pórů

Umístění a rozložení potních pórů je výborná rozlišovací informace. Tato metoda vyžaduje vysoké rozlišení otisků, což dříve ovlivňovalo širší využití. Dnes již existují i komerční snímače s vysokým rozlišením, které zajistili větší uplatnění v praxi. Detekce a extrakce pórů je však poměrně náročná. Analýza pórů našla uplatnění v detekci živosti otisku prstů. Póry je velmi těžké vytvořit do falešných otisků prstů, a to především kvůli malým rozměrům pórů (přibližně 60 – 250  $\mu\text{m}$ ), které se dají těžce replikovat běžně používanými materiály pro vytváření falešných otisků (silikon, želatina). Ve falešných otiskách prstů proto zpravidla najdeme mnohem méně pórů než v otiskách živých. K jejich detekci však potřebujeme snímky otisků

s vysokým rozlišením a poměrně náročné algoritmy pro jejich detekci. Při rozlišení 500 dpi jsou již póry viditelné, nicméně podle studií je potřeba alespoň 800 dpi pro detekci malých pórů.[8]

Struktura a rozložení pórů je unikátní a využívá se pro identifikaci fyzické identity. Póry mohou mnohé tvary – kulaté, elipsoidní, čtvercové i trojúhelníkové. Podle umístění na papilární linii je můžeme rozlišovat na uzavřené – jejich poloha je uvnitř papilární linie a na póry otevřené, které se nachází na hraně papilární linie. Na snímku vypadají uzavřené póry jako bílé tečky na černých liniích, otevřené póry vypadají jako nekompletní bílé tečky. [9]



**Obrázek 1.13** potní pór, druhý snímek nám ukazuje uzavřený a otevřený pór [9]

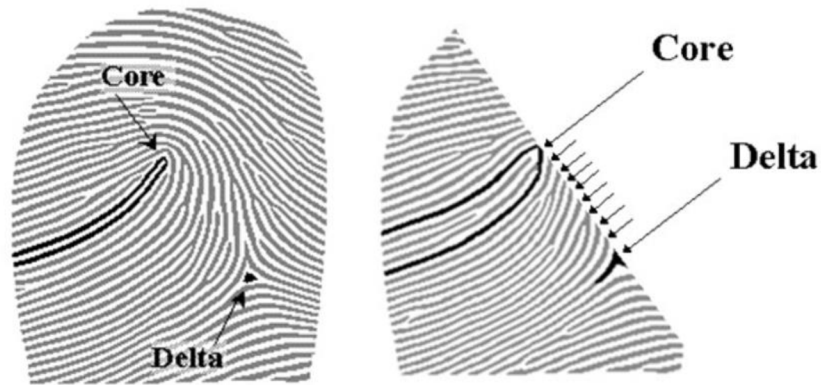
Pro spolehlivou identifikaci identity stačí analýza 20-40 pórů.[2] Hledání shody můžeme provádět hned na několika vlastnostech pórů:

- Velikost pórů
- Tvar póru
- Podle umístění póru na papilární linii (uzavřený/otevřený)
- Na frekvenci pórů

### 1.5.2 Počet a frekvence papilárních linií

Počet a frekvence papilárních linií je unikátním rysem otisku prstu. Počet papilárních linií se využívá pro zvýšení spolehlivosti detekce shody otisků. Hustota papilárních linií se zvětšuje směrem k jádru.[5] Porovnání počtu linií můžeme provést mezi jakýmkoli 2 body. Je snaha využívat body které jsou charakteristické pro otisk prstu např. pozice markantů, pozice vzorů. V automatizovaných systémech pro identifikaci otisků prstů se jako body nejčastěji využívá jádro a delta (obrázek 1.14).

Počet papilárních linií mezi dvěma body u binarizovaných černobílých obrazů zjistíme pomocí přechodů mezi 1 a 0 (bílá-černá). U šedotonových snímků hledáme lokální maxima. V obou případech se však přesnost zmenšuje u zašuměných snímků. Okolí vzorů a markantů může také komplikovat přesné určení počtu papilárních linií.



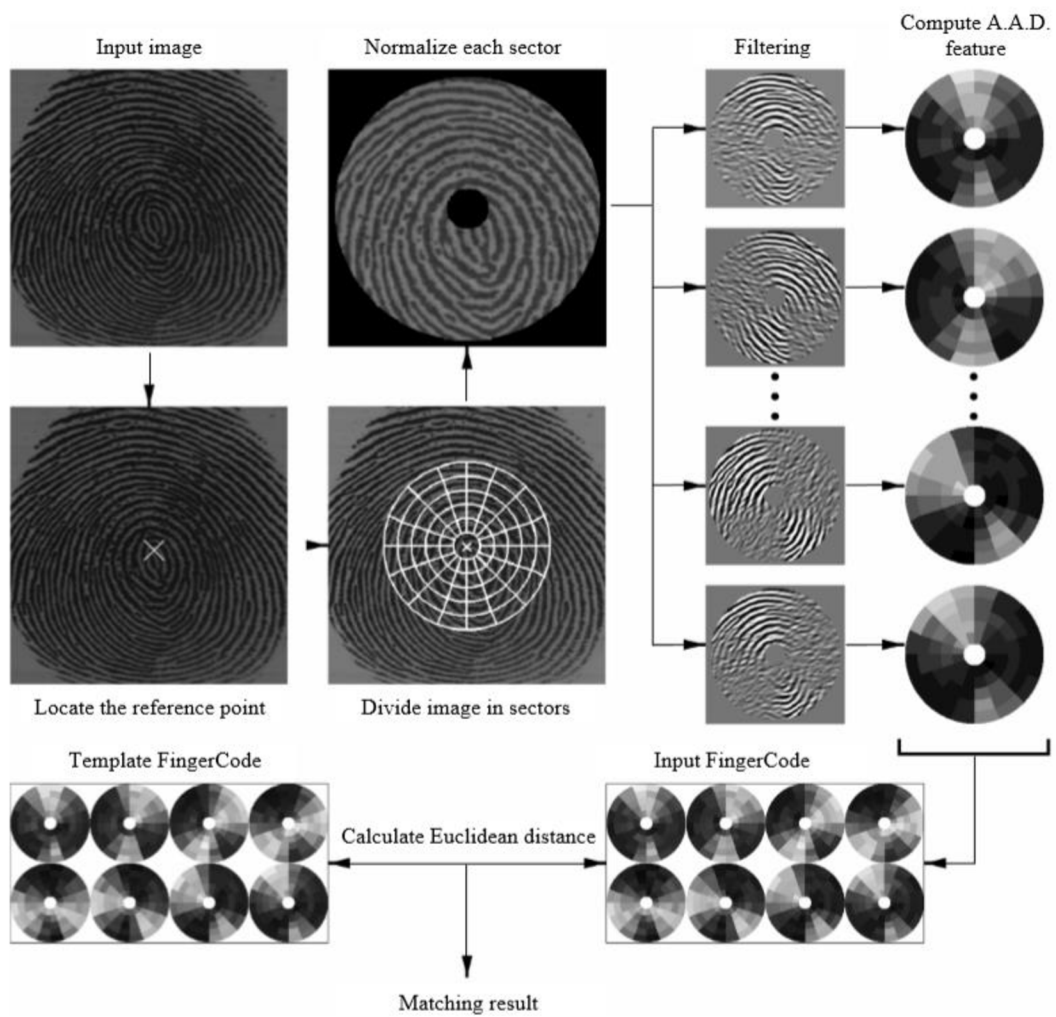
Obrázek 1.14 Počet papilárních linií mezi jádrem a deltou otisku[23]

### 1.5.3 Globální a lokální texturní informace

Texturní informace jsou definovány prostorovým opakováním základních znaků a charakterizovány vlastnostmi těchto znaků jako velikost, orientace, frekvence symetrie atd.

Otisky lze analyzovat pomocí Fourierovy transformace. Papilární linie vytváří v prostoru poměrně stálou frekvenci (ve frekvenční oblasti), rozpoznávací znaky jako specifická orientace linie a markanty vytváří odchylky dominantní frekvence papilárních linií, které dokážeme detekovat a použít pro rozlišení otisků.[2]

Nejpoužívanější technikou pro hledání shody otisků je metoda FingerCode využívající teselaci s ohledem na jádro. Teselace povrchu (z angl. *tesellation*, mozaikování) je vyplnění roviny pomocí jednoho nebo více geometrických útvarů, bez překrývání a bez mezer. [10] Z každého sektoru, které byly vytvořeny teselací, se vyjmou informace o znacích nacházející se v těchto sektorech. Lokální texturní informace v jednotlivých sektorech se rozloží do oddělených kanálů pomocí gaborových filtrů. Jain et al. (2000) rozdělil (teselaci) vybranou oblast do 80 buněk (5 pásem s 16 sektory) a použitím 8 gaborových filtrů. Každý otisk prstu je reprezentován vektorem 640 (8x80) rozlišovacích znaků nazývaným FingerCode. Rozpoznávání shody dvou otisků je poté provedeno vypočítáním euklidovské vzdálenosti mezi jejich vektory. Kritické je u této metody správné určení jádra otisku.[11]



obrázek 1.15 systémový diagram – Jain et al.'s (2000) FingerCode approach

## 2 Zpracování otisku prstu

Velká většina automatizovaných systémů je založená na shodě podle markantů. Správná detekce a extrakce markantů je proto velmi důležitá. Otisk prstu musí většinou projít několika kroky, aby bylo docíleno požadované podoby pro správnou extrakci a detekci markantů.

- Segmentace
- Normalizace obrazu
- Vytvoření pole orientací
- Adaptivní filtrací pro snížení šumu
- Binarizace
- Ztenčení papilárních linií

### 2.1 Normalizace obrazu

Normalizace se používá pro upravení hodnot intenzit pixelů v obraze do požadovaných úrovní. Kontrast může mít velký vliv v dalších krocích zpracovávající otisk prstu (pole orientací, binarizace), proto je normalizace dobrým počátečním krokem zpracování obrazu. [2]

$$I[x, y] = \begin{cases} m_0 + \frac{\sqrt{(I[x,y]-m)^2 \cdot v_0}}{v} & \text{když } I[x, y] > m \\ m_0 - \frac{\sqrt{(I[x,y]-m)^2 \cdot v_0}}{v} & \text{jinak} \end{cases} \quad (10 - 11)$$

V této rovnici  $m$  značí průměr intenzit obrazu a  $v$  jeho variaci,  $m_0$  a  $v_0$  jsou požadované hodnoty průměru a variace po normalizaci. Kvalita a kontrast obrazu se může měnit i na jednom snímku otisku. Pro přesnější normalizaci můžeme poupravit globální techniku zmíněnou výše a použít ji v lokálním měřítku.



**Obrázek 2.1** Otisk před normalizací a po normalizaci [22]

## 2.2 Segmentace

Prvním krokem v rozpoznávacích systémech je segmentace otisku prstu. Segmentace je rozdělení obrazu do komponentů. Otisk prstu se většinou skládá ze dvou komponentů, a to popředí a pozadí. Popředí vzniká kontaktem konečku prstu se senzorem. Zašuměná část na okrajích obrazu se nazývá pozadí. Úkolem segmentujícího algoritmu je rozlišit a oddělit popředí od pozadí obrazu. Přesná segmentace je obzvlášť důležitá k docílení spolehlivé detekce markantů a singulárních bodů. Mnoho algoritmů detekuje falešné znaky, když jsou použity na otisky se zašuměným pozadím. Hlavní úkol segmentace je tedy potlačení pozadí otisku a tím snížit riziko detekce falešných znaků.[12]

Segmentaci lze provést pomocí histogramu orientovaného okna o velikosti  $m \times n$ . Okno je centrováno kolem každého bodu a orientováno podle orientace papilární linie (obrázek 2.5). V případě že se jedná o popředí se v histogramu budou objevovat výrazné píky značící papilární linie.[13] Tato metoda selhává v případě, kdy není nalezena lokální orientace papilární linie (čisté bílé části v pozadí). Řešení tohoto problému je odstranění částí s šedotónovou variací nižší než předem určený práh  $t$ . [14] Segmentace pouze pomocí variace je také jedna z používaných metod. Segmentace pouze pomocí variace je neefektivní u otisků, ve kterých se nachází velké množství šumu v pozadí, a proto je často používána pouze jako jeden z kroků segmentace otisku.

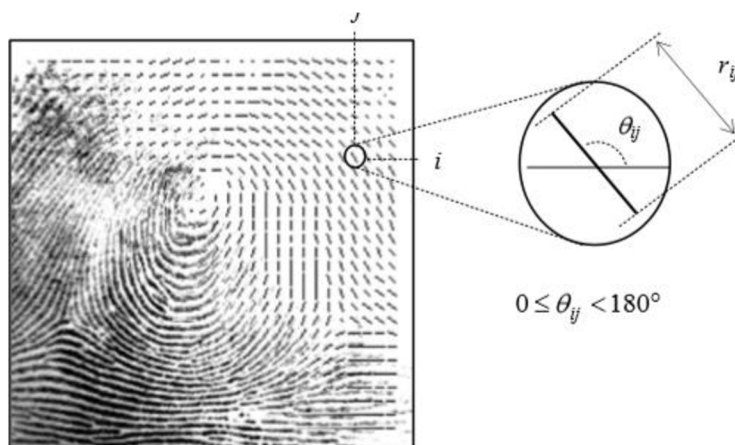


Obrázek 2.2 Segmentace otisku [2]

## 2.3 Pole orientací

Pole orientací je matice, která obsahuje informace o směru papilárních linií. V každém bodě se dle odstínu šedé barvy spočítá směr papilární linie z okolí a vypočte se pole orientací pro každý bod. V dalším kroku se vytvoří čtvercová síť a každá hodnota pixelů nacházející se ve čtverci  $[i, j]$  se zprůměruje a vytvoří se předpokládaný směr papilární linie. Každému čtverci je často přiřazena hodnota  $r$ , která nám značí důvěryhodnost předpokládaného směru papilární

linie. Nízká hodnota  $r$  nám značí malou důvěryhodnost a je pro oblasti s nízkou kvalitou a vysokým šumem.



**Obrázek 2.3** Vytváření pole orientací ve čtvercové síti o velikosti 16x16 [2]

### 2.3.1 Metoda založená na gradientu

Nejjednodušší přístupem k získání lokálních orientací je na základě výpočtu gradientů v obraze otisku (obrázek 2.4). Gradient  $\nabla(x, y)$  v bodě  $[x, y]$  je dvojměrný vektor  $[\nabla_x(x, y), \nabla_y(x, y)]$  obrazu  $I$ . [2] Fázový úhel gradientu nám značí směr maximální změny intenzity. Směr předpokládaného okraje linie v oblasti kolem bodu  $[x, y]$  je tedy kolmý k fázovému úhlu gradientu v bodě  $[x, y]$ . Komponenty  $\nabla_x$  a  $\nabla_y$  lze jednoduše získat pomocí Sobelovy masky.

Tato metoda je jednoduchá a efektivní, ale má své nevýhody. Výpočet gradientu se provádí v jemném měřítku, a tudíž je velice citlivá na šum v obraze. Gradienty také nejde jednoduše průměrovat,  $210^\circ$  a  $30^\circ$  nám udává stejnou orientaci. Tento problém se dá jednoduše vyřešit zdvojnásobením úhlu, takže odhad orientace je zapsán jako vektor [15]:

$$d = [r * \cos(2\theta), r * \sin(2\theta)] \quad (12)$$

Dominantí velikost úhlu  $\theta_{ij}$  je poté vypočtena z jednotlivých gradientů nacházející se v okně o velikosti  $m \times n$  s centrem v  $[x_i, y_j]$  (rovnice 13-16)

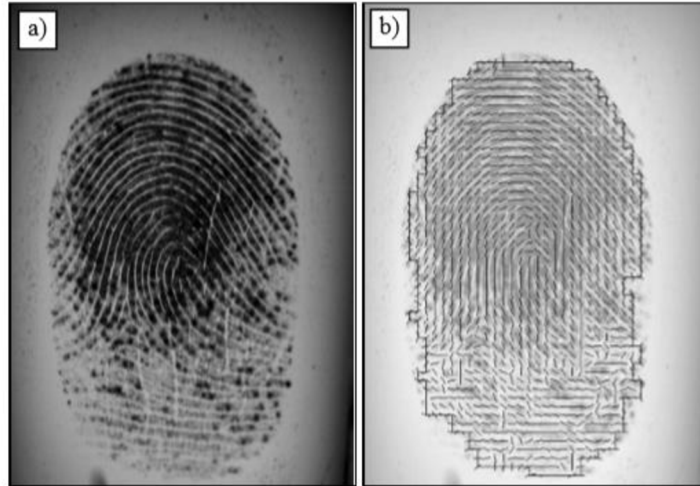
$$G_{xy} = \sum_{h=-m}^m \sum_{k=-n}^n \nabla_x(x_i + h, y_j + k) \cdot \nabla_y(x_i + h, y_j + k) \quad (13)[15]$$

$$G_{xx} = \sum_{h=-m}^m \sum_{k=-n}^n \nabla_x(x_i + h, y_j + k)^2 \quad (14)[15]$$

$$G_{yy} = \sum_{h=-m}^m \sum_{k=-n}^n \nabla_y(x_i + h, y_j + k)^2 \quad (15) [15]$$

$$\theta_{ij} = 90^\circ + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2 \cdot G_{xy}}{G_{xx} - G_{yy}}\right) \quad (16) [15]$$





Obrázek 2.4 a) obrázek otisku prstu b) pole orientací vypočítané rovnicí (16) [2]

## 2.4 Lokální frekvence papilárních linií

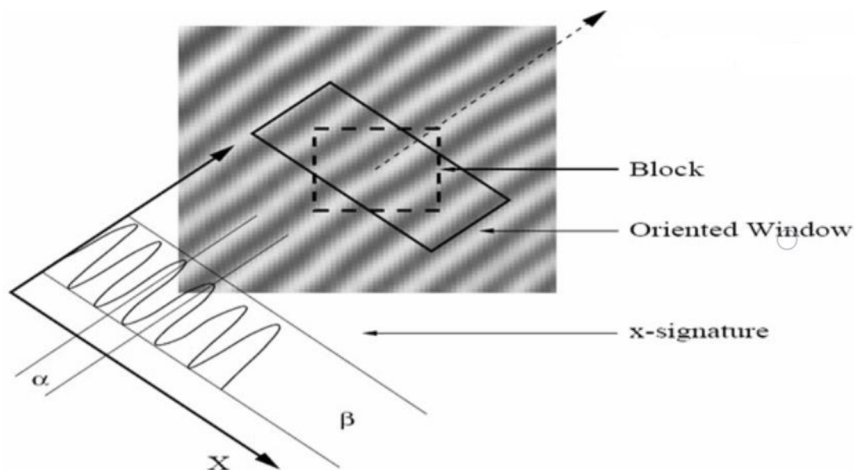
Lokální frekvence papilárních linií  $f_{ij}$  v bodě  $[i, j]$  značí počet linií patřící úseku centrováném v bodě  $[i, j]$  a kolmém k lokální orientaci papilární linie. Získáním lokální frekvence v každém bodě obrazu je důležité pro další zpracování otisku prstu a detekci znaků. K odhadu lokálních frekvencí papilárních linií rozdělíme obraz otisku prstu do nepřekrývajících se bloků o velikosti  $w \times w$  a odhadneme lokální frekvenci pro každý blok centrováný v bodě  $(i, j)$ . Orientované okno o velikosti  $l \times w$  centrováném kolem bodu  $[i, j]$ , kdy y osa tohoto okna je souběžná s lokální orientací papilární linie. Z osy x extrahujeme úrovně šedi (průměrováním každého sloupce osy x) a rovnicí se určí lokální frekvence papilárních linií  $f_{ij}$ .

$$X(k) = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} I(u, v), \quad k = 0, 1, \dots, l-1 \quad (17)$$

$$u = i + \left(d - \frac{w}{2}\right) \cos\theta_{ij} + \left(k - \frac{1}{2}\right) \sin\theta_{ij} \quad (18)$$

$$v = j + \left(d - \frac{w}{2}\right) \sin\theta_{ij} + \left(\frac{1}{2} - k\right) \cos\theta_{ij} \quad (19)$$

Poté je vypočítána hodnota  $d_{ij}$  značící průměrnou vzdálenost mezi dvěma sousedícími píky. Frekvenci papilárních linií  $f_{ij}$  se získá převrácením hodnoty  $d_{ij}$ . [16]



Obrázek 2.5 Lokální frekvence papilárních linií [2]

## 2.5 Filtrace obrazu

Filtrace otisku je důležitou součástí předzpracování otisku prstu. Filtrací se odstraňuje šum a nežádoucí artefakty, které může obraz obsahovat, s minimálním ovlivněním pravé struktury otisku (papilárních linií).[2] V současnosti většina metod využívá znalosti lokální orientace a frekvence papilárních liniích (viz 2.3 Pole orientaci, 2.4 lokální frekvence papilárních linií).

Vhodnou metodou je filtrace pomocí Gáborových filtrů. Filtrováním otisku několika pásmovými propustmi nastavenými na dominantní frekvenční a orientační složku efektivně odstraňuje nežádoucí šum. Gaborovy filtry jsou tedy pásmové propusti s nastavitelnou šířkou pásma, středovou frekvencí a orientací.[16] V prostoru je 2D Gáborův filtr definován jako Gaussova funkce (první část rovnice) modelovaná sinusovou rovinnou vlnou (druhá část rovnice).[17]

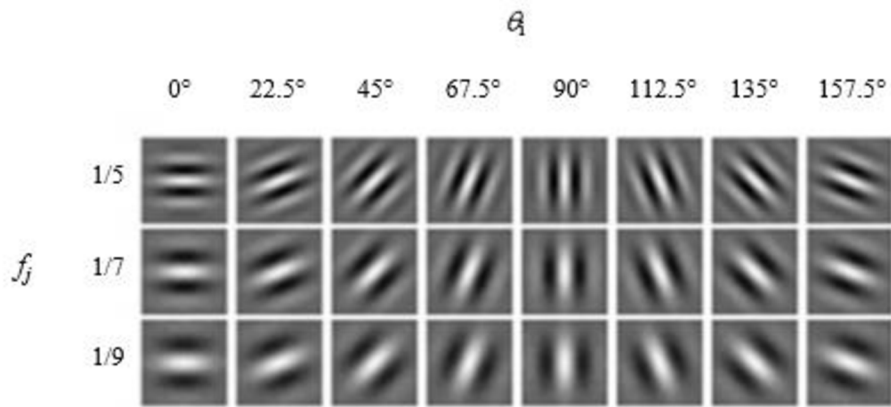
$$g(x, y, \theta, f) = \exp\left(-\frac{x_{\theta}^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_{\theta}^2}{2\sigma_y^2}\right) \cos(2\pi f + x_{\theta}) \quad (20)$$

$$x_{\theta} = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (21)$$

$$y_{\theta} = x \sin \theta - y \cos \theta \quad (22)$$

V rovnici je  $\theta$  orientace filtru,  $[x_{\theta}, y_{\theta}]$  jsou souřadnice  $[x, y]$  filtru po rotaci a  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$  jsou standardní odchylky podél os  $x$  a  $y$ . Orientace a frekvence filtru je určen z lokální frekvence a orientace papilárních liniích. Hodnoty  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$  je nutné vhodně nastavit. Vysoké hodnoty  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$  nám vyfiltrují téměř veškerý šum, ale také zvyšuje riziko vytvoření falešných papilárních linií. V opačném případě bude filtrace šumu méně efektivní.

Pro zrychlení filtrace můžeme použít sadu předpřipravených filtrů  $\{g_{ij}(x, y) | i = 1 \dots n_{\theta}, j = 1 \dots n_f\}$  tzv. banku filtrů. Každý pixel  $[x, y]$  je konvolován filtrem  $g_{ij}$ , který má nejbližší diskrétní orientaci  $\theta_i$  k orientaci bodu  $\theta_{xy}$  a nejbližší diskrétní frekvencí  $f_j$  k frekvenci  $f_{xy}$ . [16]

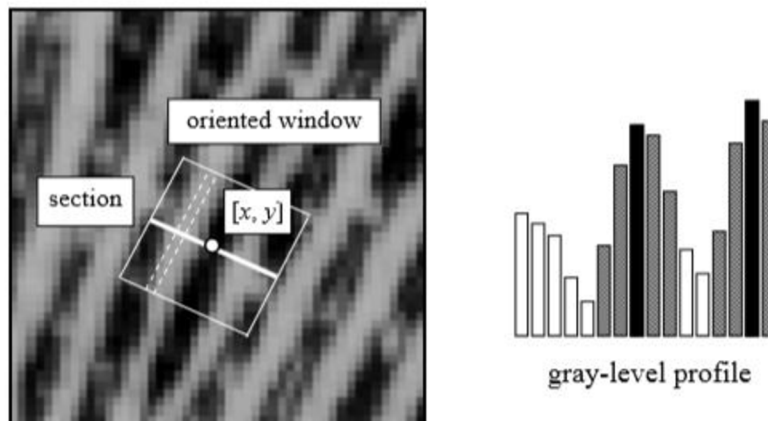


**Obrázek 2.6** Graficky znázorněná banka 24 Gáborových filtrů ( $n_0 = 8$  a  $n_f = 3$ ) [2]

## 2.6 Binarizace obrazu

Binarizace obrazu nám poskytne černobílé linie, které jsou poté dále filtrovány. Binarizace nejjednodušeji dosáhneme použitím globálního prahu  $t$ . Pixely přesahující  $t$  budou přepsány na 1 a zbylým pixelům bude přiřazena 0. Pokud neprovedeme normalizaci obrazu (viz 2.1 Normalizace obrazu), tak kontrast a kvalita obrazu se může v různých částech otisku měnit, a proto použití globálního prahu není vždy vhodné pro kvalitní binarizaci. Lokální prahy  $t$  se mění v závislosti na průměru kontrastu okolí, ani tato metoda nám nemůže zaručit kvalitní binarizaci, a to obzvláště na snímkách nízké kvality.[2]

Další z možností, jak docílit binarizace je pomocí histogramu. Metoda je založena na detekci píku v profilu vybrané oblasti kolmé ke směru papilární linie (obrázek 2.7). Okno o velikosti 16x16 pixelů je vycentrováno kolem každého bodu  $[x, y]$  a orientováno podle lokální orientace papilární linie  $\theta_{xy}$ . Profil úrovní šedi je poté vyhlazen pomocí lokálního průměrování píku a dvou vedlejších pixelů na obou stranách.[15]



**Obrázek 2.7** Získaný histogram z profilu orientovaného okna s centrem v  $[x, y]$  [2]

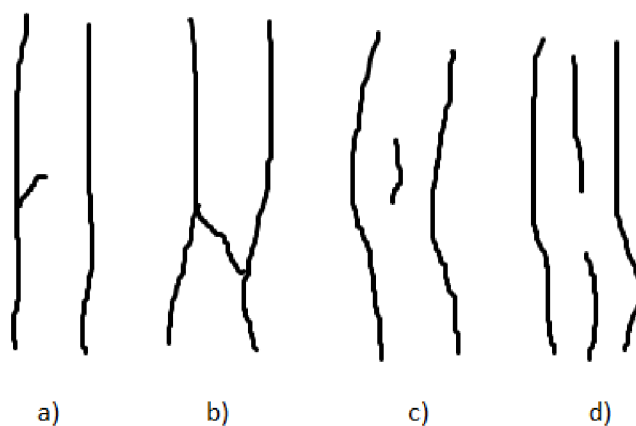
## 2.6.1 Ztenčování papilárních linií

Detekce markantu je z černobílého obrazu většinou provedena po ztenčení papilárních linií (obrázek 2.8). Pro ztenčení se používá relativně jednoduchý algoritmus, který nám postupně redukuje tloušťku papilární linie až na tloušťku jednoho pixelu. Mezi nejpoužívanější metodu řadíme metodu Emyroglu, která využívá dva typy bodů – RMP (Ridge Meeting Point) a RCP (Ridge Continuity Point). Tyto body zajišťují že papilární linie nebude ubývat v žádném směru a tím zachováli polohu markantů.[5]



Obrázek 2.8 Otisk před a po ztenčení papilárních linií [21]

Ztenčovací algoritmy mohou vytvářet spoustu nežádoucích artefaktů. V méně kvalitních snímcích vznikají díry, přerušování a mosty mezi jednotlivými liniemi, které vytváří falešné markanty. Ze ztenčených papilárních linií se detekují dva základní markanty – ukončení a rozdělení.



Obrázek 2.9 nejčastější artefakty způsobující detekci falešných markantů a) výběžek b) most c) krátká papilární linie d) přerušovaná papilární linie

## 3 Praktická část

V praktické části byl vytvořen algoritmus v aplikaci MATLAB R2017b, který předzpracovává otisk prstu, detekuje polohu a orientaci jednotlivých markantů a následně porovnává otisk s otiskem v databázi. Součástí praktické části je i algoritmus, který předzpracuje nové otisky a uloží je do databáze. Shoda otisku je určena podle počtu stejných markantů a podobnosti polí orientací.

### 3.1 Databáze otisků

Algoritmus využívá dvě databáze, databáze *otisky* a druhá databáze *sablony\_markanty*, která obsahuje otisky a jejich zpracované znaky – markanty a pole orientací. Databáze otisků jsou vytvořeny z databází LivDet z roků 2009, 2011 a 2013. LivDet se zaměřuje na testování a detekci živosti prstu. Algoritmus se nezabývá problematikou živosti prstů, a proto je databáze vytvořena pravými i uměle vytvořenými otisky. Databáze *sablony\_markanty* obsahující již segmentované otisky s jejich markanty ztelně urychluje výpočet porovnávání otisků.

### 3.2 Popis zpracování otisku

#### 3.2.1 Normalizace

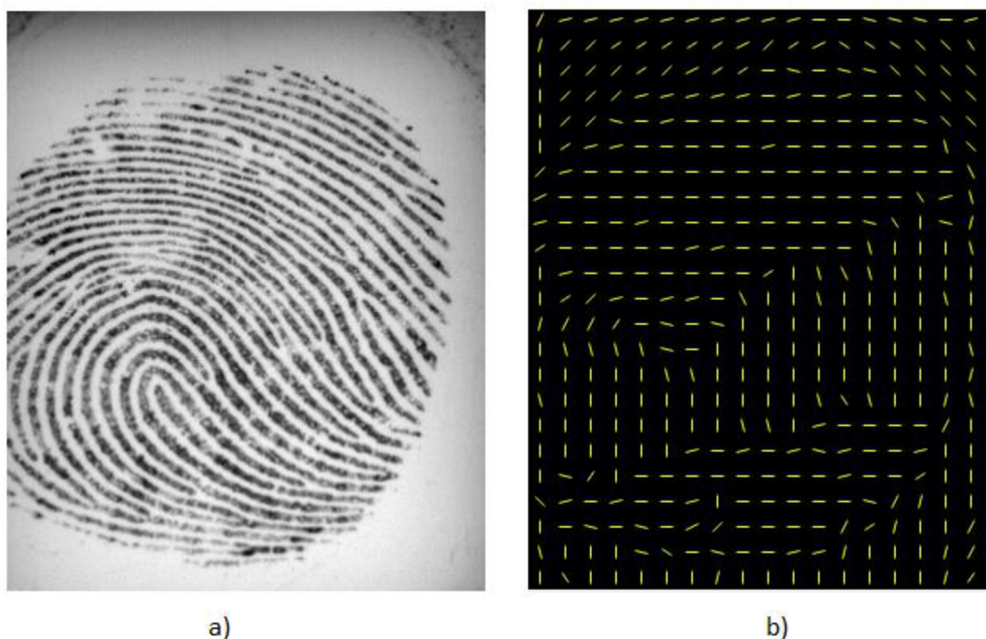
Funkce převede obrázek otisku na šedotónový obraz a poté za použití rovnice 10 a 11 popsané v kapitole 2.1 vypočítá nové hodnoty intenzit v jednotlivých pixelech. Názorné zobrazení obrázků otisků před a po normalizaci je zobrazeno na obrázku 3.1. Hodnoty  $m_0$  a  $v_0$  značí průměr a variaci pixelů po normalizaci jsou nastaveny na;  $m_0 = 0.55$ ,  $v_0 = 0.45$



Obrázek 3.1 otisk před a po normalizaci ( $m_0 = 0.55$ ,  $v_0 = 0.45$ )

### 3.2.2 Pole orientací a lokální frekvencí

Pro odhad pole orientací funkce používá metodu využívající gradienty popsanou v kapitole 2.3.1. Orientace je vypočítána pomocí rovnic 13-16 pro každý pixel a poté je pole orientací vyhlazeno gaussian filtrem o velikosti 5x5. Pole orientací je získáno zprůměrování orientací v okně 16x16. Výsledné pole orientací je zobrazeno na obrázku 3.2. Kvalita odhadu pole orientací je závislá na kvalitě obrázku otisku. Vzhledem že dochází k průměrování orientací, jizvy a jiná přerušení způsobují velké změny v gradientech a tím i zhoršují kvalitu výsledného pole orientací. Při filtraci Gáborovými filtry, využívající pole orientací, pak v místech kde se reálná hodnota orientace výrazně liší od odhadu v poli orientací vznikají falešné markanty, které je pak nutné filtrovat .



**Obrázek 3.2** Obrázek otisku a jeho pole orientací

Pro získání odhadu lokální frekvence funkce rozdělí obrázek do 16x16 bloků. Pro každý blok je vypočítána variace intenzit  $v$ . Pomocí variace intenzit se určí, jestli se v bloku nachází papilární linie (vysoká hodnota  $v$ ) nebo se jedná o převážně bílý blok (nízká hodnota  $v$ ). Lokální frekvence se poté vypočítá postupem popsaným v kapitole 2.4 a znázorněném na obrázku 2.5. V případech, kdy není nalezen žádný pik v profilu okna z důvodu nepřítomnosti papilární linie nebo příliš velké tloušťky papilární linie, je hodnota nastavená na  $f = 1/12$ . Přesnost odhadu lokální frekvence je zpravidla dostačující, a proto při filtraci Gáborovými filtry, jenž odhad lokální frekvence využívá, nedochází ke zkreslení a vytváření umělých papilárních linií.

### 3.2.3 Gáborovy filtry

Pro odstranění šumu algoritmus využívá filtraci Gáborovými filtry popsanou v kapitole 2.5. Pro urychlení výpočtu je použita banka 24 Gáborových filtrů o frekvenci  $f$  a orientaci  $\theta$ . Názorné grafické znázornění banky Gáborových filtrů je vidět na obrázku 2.6. Banka Gáborových filtrů je vytvořena funkcí `gaborFilterBank`.

$$f = \left[ \frac{1}{9}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4} \right]$$

$$\theta = [0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5]$$

Pro filtraci se použije filtr, jehož hodnoty se nejvíce přibližují k hodnotám v poli orientací a frekvenci z lokální frekvence. Výpočet pomocí banky filtrů má nevýhodu ve snížené přesnosti výsledného obrazu. Kvalita filtrace je také ovlivněna přesností odhadu pole orientací. Na obrázku 3.2 je vidět otisk po filtraci. V oblasti, kde se reálná hodnota orientace výrazně liší od hodnoty v poli orientací způsobuje filtrace zkreslení papilárních linií.

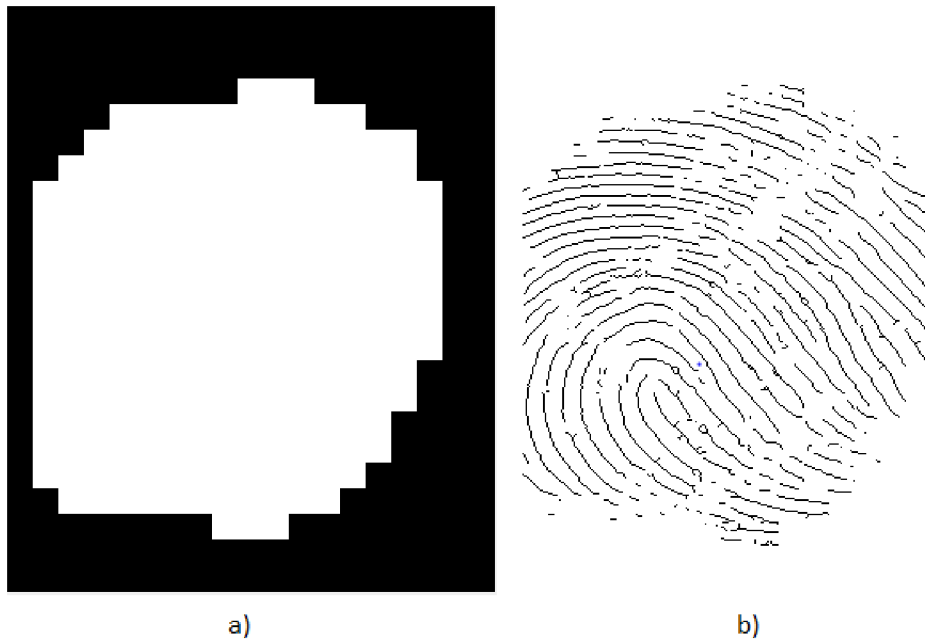


obrázek 3.3 a) obrázek otisku po filtraci Gáborovými filtry, b) obrázek otisku po ztenčení papilárních linií

### 3.2.3 Segmentace

Segmentace v algoritmu je rozdělena na 2 části. V první části funkce `segmentace` rozdělí obrázek otisku do bloků o velikosti 16x16 a poté porovnává variace jednotlivých bloků s globálním prahem. Blokům s variací nižší, než práh je přidělena hodnota intenzity 1 a ostatním blokům je přidělena hodnota 0. Vznikne nám matice, kterou lze použít jako masku. Kvalita této segmentace není dostačující pro otisky se silným šumem v pozadí.

V druhé části funkce *valid\_space* vezme matici získanou v části první a sečte všechny sousední bloky jednotlivých bloků. V případě že je součet větší než 0 je blok označen za pozadí. Tento postup je jednoduchý, rychlý a také nám vyfiltruje markanty na okrajích otisku. Nevýhoda této metody je u částečných otisků nacházející se na okrajích obrázku, kdy může dojít k velké ztrátě markantů potřebné k přesnému hledání shody.



**Obrázek 3.4** a) segmentace popředí a pozadí otisku b) segmentovaný otisk

Otisky, které mají tlusté papilární linie s minimálním rozestupem mají stejně jako bílé bloky velice nízkou variaci. U těchto otisků dochází k chybné segmentaci.

### 3.2.4 Prahování obrazu a ztenčení papilárních linií

K Prahování obrazu otisku algoritmus využívá globální práh. Po normalizaci obrazu jsou z pravidla papilární linie výrazné a prahování s pevně daným globálním prahem dosahuje dostatečně kvalitní binarizace. Globální práh je nastaven na hodnotu  $glob\_prah = 0.6$

Ke ztenčení papilárních linií je využita funkce v matlabu *bwmorph*. Ztenčování papilárních linií vytvoří velký počet falešných markantů, které se musí vyfiltrovat. Obrázek otisku po ztenčení papilárních linií je na obrázku 3.2 b).

### 3.2.5 Detekce markantů

K detekci algoritmus využívá hodnotu *crossing number* popsanou v kapitole 1.2.2. Markanty jsou detekovány a extrahovány v případě kdy se nachází v segmentované oblasti, ostatní markanty jsou automaticky vyřazeni. Falešné markanty vytvořené ztenčováním papilární linie (viz. Obrázek 2.9) jsou filtrovány pomocí algoritmu, jenž porovnává vzdálenost markantů s nastaveným prahem. Algoritmus markanty odstraní v případě, kdy jsou markanty blíže než



nastavený práh. Tato metoda odstraňuje nejčastější falešné markanty vytvořené ztenčovacím algoritmem (viz. Obrázek), ale odstraní i velkou část pravých markantů.

V případě kdy markant  $m [x,y]$  není eliminován je zjišťována jeho orientace. Funkce `orientace_markantů` vybere oblast otisku o velikosti 5x5 s centrem v bode  $[x,y]$ . Pokud je markant zakončení, na okraji oblasti se nalezne pouze jeden bod, kterou se papilární linie šíří. Tento bod určuje orientaci markantu. V případě markantu typu vidlička se na okraji oblasti naleznou 3 body. Funkce získá vzdálenosti okrajových bodů, které mají mezi sebou. Body s nejmenší vzdáleností od sebe jsou ignorovány a zbývající bod určuje orientaci. V situaci, kdy jsou na krajích nalezeny jiné počty bodů než 1 a 3, je markant vyloučen z množiny. Na obrázku 1.5 je vidět grafické znázornění orientace markantu typu zakončení a vidlička.

Na otiskách je většinou detekováno přes 30 markantů. Nižší číslo detekovaných markantů může indikovat uměle vytvořené otisky, které zpravidla mají méně rozlišovacích znaků než otisky živé.

### 3.3 Porovnávání otisků

Algoritmus k porovnávání otisků využívá sady detekovaných markantů. Každý markant je quadruplet  $m = \{x, y, k, \theta\}$ , kde  $k$  značí typ markantu (zakončení nebo vidlička). K určení shody otisků používáme metodu, kde porovnáme 2 páry markantů  $\overline{m_{i1}m_{i2}}$  z otisku A  $\overline{m_{j1}m_{j2}}$  z otisku B. Pro porovnání shody algoritmus otisk zarovná pomocí transformační parametrů  $(\Delta x, \Delta y, \theta, s)$ . Před výpočtem transformačních parametrů jsou nastaveny vstupní prahy, který musí páry splnit. Kontroluje se euklidovská vzdálenost markantů a úhel který markanty svírají. Za vhodné kandidáty pro získání transformačních parametrů jsou považovány páry s relativně stejnou délkou a minimálním rozdílem úhlů. Touto filtrací neprojde většina párů. Parametr  $\theta$  je získán jako úhel, který mezi sebou páry svírají a škála  $s$  jako poměr délky pomyslné úsečky mezi body.

$$\theta = \text{úhel } \overline{m_{i1}m_{i2}} - \text{uhel } \overline{m_{j1}m_{j2}} \quad (23)$$

$$s = \frac{\text{délka } \overline{m_{i1}m_{i2}}}{\text{délka } \overline{m_{j1}m_{j2}}} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} - s \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix} \quad (25)$$

Funkce `matching` získá přes transformační matici (rovnice 6) nové souřadnice všech markantů otisku B a tím provede zarovnání otisku. Všechny markanty na Otisku A jsou poté porovnávány s markanty na otisku B. Markanty jsou označené za shodné v případě kdy je splněna prostorová a uhlová tolerance. Tato metoda je popsána v kapitole 1.2.3. Markanty nemůžou být označeny za shodné, pokud už jeden z nich našel shodu. V případě, že jeden z markantů má více jak jednu shodu na druhém otisku je vybrána nejvhodnější shoda s ohledem na zarovnání. Nastavení vhodně úhlové a prostorové orientace je kritické. Příliš

nízké hodnoty snižují pravděpodobnost připsání shody nesprávným markantům, avšak díky geometrickým nesrovnalostem vzniklé při snímání otisku, filtraci a skeletizaci papilárních linií může mít za následek nenalezení shody ani u markantu s kterým tvoří pár. Příliš velké hodnoty prahu způsobují zvýšený počet falešných shod.

Podle počtu nalezení shod a počtu porovnávaných markantů je vypočítáno skóre indikující velikost podobnosti. Pro určení shody je nutné alespoň 6 shodných markantů a dostatečně vysoké skóre. Skóre je také ovlivněno výsledkem korelací polí orientací testovaných otisků. Hodnota korelace však není silným indikátorem pro shodu, a proto hodnota korelace má menší váhu než hodnota podobnosti nalezená pomocí shody markantů. Při testování bylo zjištěno, že hodnota korelace u shodujících se otisků je nad 0.5, v případě průměrné kvality snímku otisku. Tato hodnota však není důvěryhodná pro vyloučení shody v případě, kdy je hodnota korelace pod 0.5. Proto byl implementován práh  $t_{kor}=0.45$ , jenž v případě kdy otisky dosáhnou vysokého skóre označí shodu jako rizikovou.

$$celkove\ skóre = (skóre * 100) * (0.5 * H) \quad (26)$$

Rovnice 26 je použita pro výpočet celkového skóre rozhodující o shodě otisků. Minimální hodnota pro shodu je nastavená na hodnotu;  $min\_celkoveskore = 3.7$ . Tato hodnota je zjištěna empiricky z testování. Změnou prostorové a úhlové tolerance musí být nastavená nová vhodná hodnota.

### 3.4 Zhodnocení výsledků

Testování probíhalo na 2 databázích. První s 40 otisky, sloužící jako templáty a druhá databáze která obsahuje 4 různé varianty každého templátu. Každý otisk v první databázi má tedy přesně 4 shody s otisky v druhé databázi. Otisky jsou různé kvality, s různými úhly natočení a geometrickými deformacemi vzniklými při snímání otisku. Pro algoritmus byl vypočítán FAR (poměr falešného přijetí) a GAR (poměr správného přijetí). Nejlepší poměr pro FAR je 0%, kdy algoritmus nenajde žádnou falešnou shodu. Nejlepší poměr ukazatele GAR je 100%, kdy každý shodný otisk byl správně identifikován.

$$GAR = \left( \frac{\text{počet detekovaných správných shod}}{\text{počet správných shod}} \right) * 100 \quad (27)$$

$$FAR = \left( \frac{\text{počet falešných shod}}{\text{počet porovnání}} \right) \quad (28)$$

Při testování GAR a FAR je každý otisk testován se všemi otisky v druhé databázi. Proběhne tedy 6400 porovnávání (40x160). Hodnoty FAR a GAR můžeme vidět v Tabulce 2. FFR značí falešně negativní shodu a vypočítá se jako GAR-1.

**Tabulka 2:** hodnoty GAR, FAR a FFR

	FAR	GAR	FFR
<b>počet případů</b>	364	143	18
<b>Výsledek</b>	5,69%	89,4%	10,6%

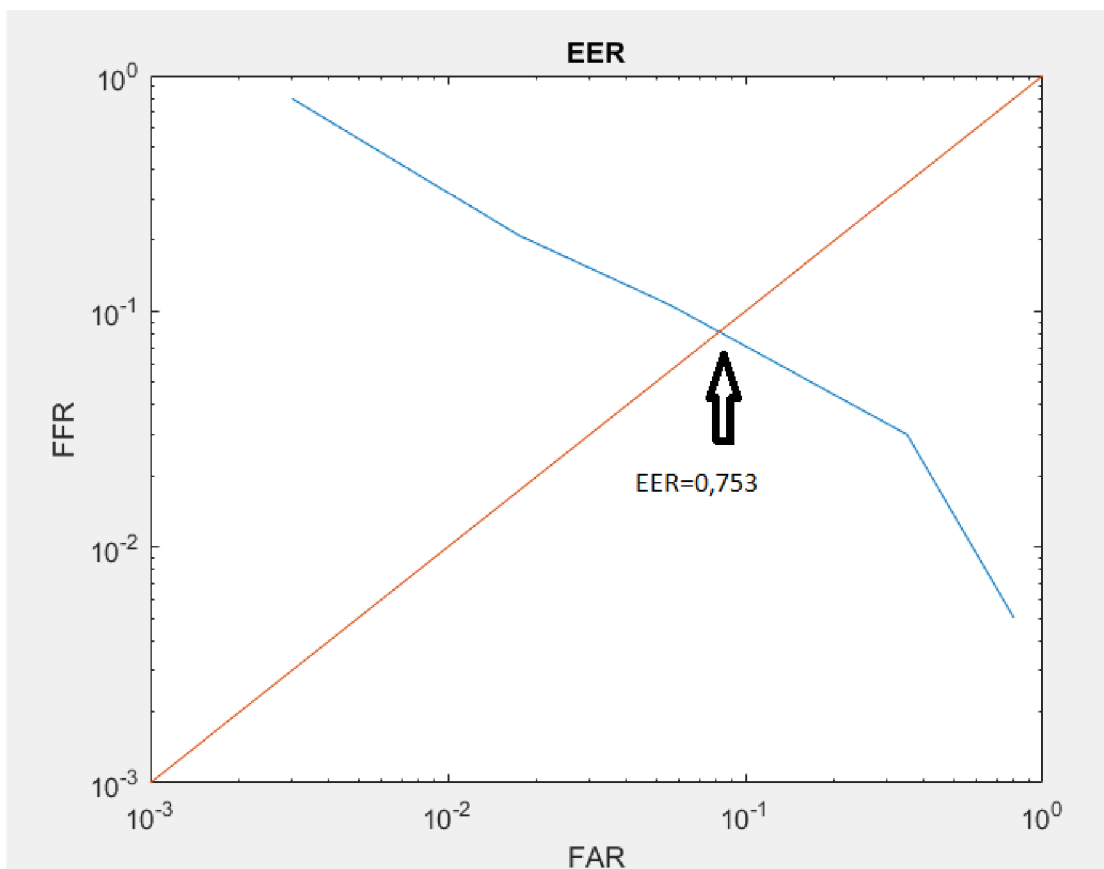
Hodnota FAR je relativně vysoká dnešním standardům. Hodnota GAR je pro dnešní algoritmy poměrně nízká. Hodnoty FAR a FFR se v praxi aproximují na stejnou hodnotu. V případě, kdy jsou prahy nastaveny příliš přísně je hodnota FAR nízká a tím se při verifikaci osoby zaručí

zamítnutí přístupu cizí osobě, která není v databázi. Přísné prahy však zároveň zvyšují hodnotu FFR, jenž může způsobit zamítnutí přístupu oprávněné osoby.

### 3.4.1 Porovnání s dalšími algoritmy

Pro porovnání byla využita data z FVC (Fingerprint Verification Competition) open category z roku 2006. Všechny testované algoritmy byly testovány na 4 databázích obsahující 150 otisků, každý o 12 vzorcích. Naměřená data z FVC neobsahují pouze FAR (také označován jako FMR), ale i dobu porovnávání, využití paměti, velikost obrázků otisků a další. S algoritmem popsaným v této práci budeme porovnávat pouze hodnotu EER - equal error rate. EER značí hodnotu ve které se FAR a FFR rovnají. Tato hodnota je široce využívána pro hodnocení přesnosti biometrických identifikačních systémů. Čím více se EER blíží k nule tím lepší je účinnost testovaného systému. EER naše algoritmu bylo odhadnuto z ROC (Receiver Operating Characteristic) křivky ukázaná na grafu 1.

**Graf 1:** ROC křivka s hodnotou EER



**Tabulka 3: Hodnoty EER jednotlivých algoritmů**

ALGORITHMUS	P066	P045	P009	P017	P015	P074	P058	P131	P067	P101	XXX
EER	2.155%	2.227%	2.345%	2.481%	2.504%	2.529%	2.549%	2.687%	2.751%	2.940%	7,53%

Algoritmy jsou označeny stejně jako ve FVC, algoritmus XXX značí algoritmus popsany v této práci

Z Tabulky 3 lze vyčíst, že náš algoritmus dosahuje podprůměrných výsledků. Tato porovnání však musíme brát s odstupem vzhledem k tomu, že algoritmy měřené na FVC byly testovány na jiných databázích než algoritmus popsany v této práci. V tabulce č 3 je pouze 10 nejlepších algoritmů, které byly na FVC testovány. Nejhorší výsledek byl naměřen 38,833% a medián všech testovaných algoritmů byl 5,641 %. Je pravděpodobné, že naměřené výsledky by byly výrazně odlišné, kdyby byly měřeny na databázích využitých na FVC.

## 3.5 Závěr

Práce přibližuje problematiku identifikačních metod, které využívají charakteristické znaky otisku prstu. Teoretická část se zaměřuje na znaky, které se pro identifikaci využívají. Jsou popsány základní pojmy a je přiblížena problematika metod využívající se pro hledání shody otisků. Vzhledem k rozsáhlosti používaných metod a nespočet jejich adaptací jsou v práci popsány pouze základní a nejvíce používané metody. Popsané metody pro zpracování otisku jsou poté aplikovány v praktické části.

V praktické části byl vytvořen algoritmus v aplikaci MATLAB 2017b. Funkce nacházející se v algoritmu byly naprogramovány pomocí rovnic nacházejících se v teoretické části. Pro zpracování otisku algoritmus také využívá funkce dostupné v matlabu, např. `bwmorph` pro ztenčení papilárních linií.<sup>3</sup> Součástí algoritmu je vykreslení pole orientací a algoritmus pro vytváření šablon otisků obsahujících segmentované pole orientací, množinu detekovaných markantů a zpracovaný segmentovaný otisk. Banka Gáborových filtrů je vytvořena funkcí `GaborBank`, která není součástí rozpoznávacího algoritmu.

Mezi operace, které algoritmus provádí patří normalizace obrazu, vytvoření pole orientací, segmentace otisku, odhad lokálních frekvencí, binarizace otisku, detekce markantů a hledání shody.

Z testování algoritmus vykazuje nízkou hodnotu GAR. Tento problém by se dal minimalizovat snížením prahů a empiricky zjistit novou hodnotu celkového skóre. Největší slabina algoritmu se bude nacházet v předzpracování otisku prstu, kde otisky horší kvality nejsou dostatečně upraveny a při filtraci gáborovými filtry dojde k velkému zkreslení, které zničí pravé markanty a vytvoří velké množství falešných markantů.

# Seznam Obrázků

- 1.1 řez kůží
- 1.2 princip snímání optickým senzorem[18]
- 1.3 princip snímání kapacitním senzorem [2]
- 1.4 princip snímání ultrazvukovým snímačem[2]
- 1.5 a) Oblouk (arch), b) klenutý oblouk, c) levá smyčka, d) pravá smyčka e) závit, f) dvojitá smyčka [1]
- 1.6 Jádro a Delta [19]
- 1.7 směry  $d_n$  pro závit, smyčku a deltu (zleva) [2]
- 1.8 úhel a poloha markantu a) zakončení b) rozdvojení/vidlička [2]
- 1.9 1) zakončení, 2) jednoduchá smyčka, 3 a 4) vidlička, 5) bod, 6) hák, 7) most, 8) křížení, 9) trojitá vidlička [upraveno z 20]
- 1.10 detekce markantů [2]
- 1.11 sledování papilární linie v šedotónovém obrazu[2]
- 1.12 korelace otisků prstů [upraveno z 2]
- 1.13 potní pór, druhý snímek nám ukazuje uzavřený a otevřený pór [8]
- 1.14 Počet papilárních linií mezi jádrem a deltou otisku
- 1.15 systémový diagram – Jain et al.'s (2000) FingerCode approach[2]
- 2.1 Otisk před normalizací a po normalizaci[22]
- 2.2 segmentace otisku [11]
- 2.3 Vytváření pole orientací ve čtvercové síti o velikosti 16x16 [2]
- 2.4 a) obrázek otisku prstu b) pole orientací vypočítané rovnicí (8) [2]
- 2.5 Lokální frekvence papilárních linií[2]
- 2.6 Graficky znázorněná banka 24 Gaborových filtrů ( $n_0 = 8$  a  $n_f = 3$ ) [2]
- 2.7 Získaný histogram z profilu orientovaného okna s centrem v  $[x,y]$  [2]
- 2.8 Otisk před a po binarizaci[21]
- 2.9 nejčastější artefakty způsobující detekci falešných markantů a) výběžek b) most c) krátká papilární linie d) přerušená papilární linie
- 3.1 otisk před a po normalizaci ( $m_0 = 0.55, v_0 = 0.45$ )
- 3.2 Obrázek otisku a jeho pole orientací
- 3.3 a) obrázek otisku po filtraci Gáborovými filtry, b) obrázek otisku po ztenčení papilárních linií
- 3.4 a) segmentace popředí a pozadí otisku b) segmentovaný otisk

## Literatura

- [1] Alonso-Fernandez F., Bigun J., Fierrez J., Fronthaler H., Kollreider K., Ortega-Garcia J. (2009) Fingerprint Recognition. In: Petrovska-Delacrétaz D., Dorizzi B., Chollet G. (eds) Guide to Biometric Reference Systems and Performance Evaluation. Springer, London
- [2] MALTONI, Davide, et al. Handbook of Fingerprint Recognition. Second Edition. London : Springer, 2009. 496s. ISBN 978-1-84882-253-5.
- [3] Janduy, Jono & Gualberto de Andrade e Silva, Arnaldo & Silva, Paulo & Batista, Leonardo & Gomes, Herman. (2017). A Novel Approach for Fingerprint Singularities Detection. 102-107. 10.1109/WVC.2017.00025.
- [4] The Henry Classification System. New York: International Biometric Group.2003
- [5] Martin Dražanský, Filip Orság a kolektiv, Biometrie. 1. vydání. Brno 2011. ISBN 978-80-254-8979-6
- [6] Maio and Maltoni (1997). Maio D. and Maltoni D., "Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints," IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, vol. 19, no. 1, 1997.
- [7] Bazen, Asker & Verwaaijen, Gerben & Gerez, Sabih & Veelenturf, Leo & van der Zwaag, Berend Jan. (2000). A correlation-based fingerprint verification system.
- [8] Marcialis, Gian & Roli, Fabio & Tidu, Alessandra. (2010). Analysis of Fingerprint Pores for Vitality Detection. 1289-1292. 10.1109/ICPR.2010.321.
- [9] Mngenge, Ntethelelo & Nelufule, Norman & Nelwamondo, Fulufhelo & Msimang, Ntsika. (2012). Fingerprint pores extractor. 2012 National Conference on Computing and Communication Systems, NCCCS 2012 - Proceeding. 1-5. 10.1109/NCCCS.2012.6412980.
- [10] AUTOR NEUVEDEN. *Teselace* [online]. [cit. 22.5.2020]. Dostupný na WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Teselace>
- [11] Anil Jain, Arun Ross, Salil Prabhakar. Fingerprint Matching Using Minutiae and Texture Features .Oct 2001. Greece
- [12] Bazen, Asker & Gerez, Sabih. (2001). Segmentation of Fingerprint Images. 12.
- [13] B.M. Mehtre, N.N. Murthy, S. Kapoor, and B. Chatterjee, "Segmentation of fingerprint images using the direction alimage," Pattern Recognition, vol. 20, no. 4, pp. 429–435, 1987.
- [14] B.M. Mehtre and B. Chatterjee, Segmentation of finger-print images - a composite method, Pattern Recognition, vol. 22, no. 4, pp. 381–385, 1989.
- [15] Gonzales and Woods (2007). Gonzales R.C. and Woods R.E., Digital Image Processing, 3rd edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2007.
- [16] Ratha, Chen and Jain (1995). Ratha N.K., Chen S.Y. and Jain A.K., "Adaptive flow orientation-based feature extraction in fingerprint images," Pattern Recognition, vol. 28, no. 11, pp. 1657–1672, 1995.
- [16] Hong, Wan and Jain (1998). Hong L., Wan Y. and Jain A.K., "Fingerprint image enhancement: Algorithms and performance evaluation," IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, vol. 20, no. 8, pp. 777–789, 1998

- [17] *Gabor filter* [online]. [cit. 22.5.2020]. Dostupný na WWW:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Gabor\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Gabor_filter)
- [18] KÁKONA, Martin. *Krize daktyloskopie* [online]. [cit. 5.6.2020]. Dostupný na WWW :  
<http://www.akademon.cz/source/biom.htm>
- [19] *Otisk prstu* [online]. [cit. 5.6.2020]. Dostupný na WWW:  
<http://noel.feld.cvut.cz/vyu/a2b31hpm/index.php/U%C5%BEivatel:Sioratan>
- [20] *Obrazce a znaky kůže* [online]. [cit. 5.6.2020]. Dostupný na WWW: [http://krimi-spk.sweb.cz/02\\_exper/expertiz/02a\\_dakt/02a\\_kuze.htm](http://krimi-spk.sweb.cz/02_exper/expertiz/02a_dakt/02a_kuze.htm)
- [21] Alkhathami, Mohammed & Fengling, Han & van Schyndel, Ron. (2013). Fingerprint image protection using two watermarks without corrupting minutiae. Proceedings of the 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2013. 1151-1155. 10.1109/ICIEA.2013.6566540.
- [22] Chavan, Satishkumar & Mundada, Parth & Pal, Devendra. (2015). Fingerprint Authentication using Gabor Filter based Matching Algorithm. Proceedings - International Conference on Technologies for Sustainable Development, ICTSD 2015. 10.1109/ICTSD.2015.7095910.
- [23] Harvey, Roger. "Fingerprints", 2016 dostupný na WWW:  
<https://slideplayer.com/slide/10500066/>