



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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tereza Hodulíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Vítek, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské a ekologické inženýrství

Studentka: Bc. Tereza Hodulíková

ID: 162241

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/2016

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 realizujete algoritmus pro 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. Dražanský], 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: 8.2.2016

Termín odevzdání: 20.5.2016

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 v první části rozebírá obecně téma biometrie a hodnocení spolehlivosti biometrických systémů. Následně je popsán otisk prstu a jeho anatomické vlastnosti potřebné pro identifikaci osob. Jsou zmíněny druhy snímačů otisku prstu. Pro následnou praktickou realizaci je vysvětleno předzpracování obrazu, metody a postupy identifikace osob využívajících otisk prstu. V praktické části práce je realizován algoritmus pro identifikaci v programovém prostředí Matlab.

KLÍČOVÁ SLOVA

Biometrie, otisk prstu, identifikace, markant

ABSTRACT

This master's thesis deals with fingerprint verification. The theoretical part consist of biometry identification systems and evaluating their reliability and robustness. After that we focus on fingerprints properties needed to identification. We mention several types of fingerprint sensors, which are generally in public use. In practical part of thesis we deal with enhancement of fingerprint image and methods of identifications. At last we created software for fingerprint identification in programming environment Matlab.

KEYWORDS

Biometrics, fingerprint, identification, minutiae

HODULÍKOVÁ, T. Biometrická identifikace otisku prstu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav biomedicínského inženýrství, 2016. 62 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Vitek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Biometrická identifikace otisku prstu jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 20. 5. 2016

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 20. 5. 2016

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod	1
1 BIOMETRIE	2
1.1 Biometrické vlastnosti	2
1.2 Biometrický systém	4
2 HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI BIOMETRICKÝCH SYSTÉMŮ	7
2.1 Míra chybného přijetí (FAR – False Acceptance Rate).....	9
2.2 Míra chybného odmítnutí (FRR – False Rejection Rate)	10
2.3 Míra chybné shody (FMR – False Match Rate)	10
2.4 Míra chybné neshody (FNMR – False Non-Match Rate).....	11
2.5 Míra vyrovnaní chyb (EER – Equal Error Rate)	12
2.6 Míra neschopnosti nasnímat (FTA – Failure To Acquire)	12
2.7 Míra neschopnosti zaregistrovat (FTE – Failure to Enroll).....	13
2.8 Míra neschopnosti porovnat (FTM – Failure To Match).....	13
3 OTISK PRSTU	14
3.1 Význam daktyloskopie	14
3.2 Charakteristika otisku prstu	15
3.3 Klasifikace	16
3.4 Třídy otisků prstů.....	16
3.5 Daktyloskopické markanty	17
3.6 Snímače otisků prstu.....	19
3.6.1 Snímací senzory.....	20
3.6.2 Požadavky na snímací senzory	23

4	PŘEDZPRACOVÁNÍ OBRAZU	25
4.1	Segmentace	26
4.2	Normalizace	27
4.3	Lokální orientace papilárních linií	27
4.4	Lokální frekvence papilárních linií	29
4.5	Gaborova filtrace	30
5	PŘEHLED SOUČASNÝCH METOD	33
5.1	Metoda založená na korelaci	35
5.2	Metoda založená na markantech	36
5.3	Metoda založená na vlastnostech papilárních linií	37
6	VEŘEJNĚ DOSTUPNÉ DATABÁZE OTISKU PRSTU	40
7	PRAKTICKÁ ČÁST	45
7.1	Popis softwaru pro identifikaci	45
7.1.1	Předzpracování obrazu	45
7.1.2	Detekce jádra	46
7.1.3	Extrakce vlastností a srovnání otisků	48
7.2	Grafické uživatelské rozhraní	49
7.3	Vyhodnocení chybovosti	55
8	ZÁVĚR	57
	Literatura	58
	Seznam zkratk	60
	Seznam příloh	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2: Identifikace jedince. Přepřacováno z [8].....	5
Obrázek 3: Verifikace jedince. Přepřacováno z [8].....	5
Obrázek 1: Zápis dat do databáze. Přepřacováno z [8].....	5
Obrázek 4: Oblast přijetí a odmítnutí tvrzení v závislosti na prahu T. Přepřacováno z [1]	8
Obrázek 5: Obecný biometrický systém [1]	8
Obrázek 6: Chyby FMR a FNMR. Přepřacováno z [6]	11
Obrázek 7: Závislost EER, ZeroFMR, ZeroFNMR. [1]	12
Obrázek 8. Řez kůží. [11]	15
Obrázek 9: Daktyloskopické vzory. Přepřacováno z [16]	17
Obrázek 10: Daktyloskopické markanty. [4].....	18
Obrázek 11: Snímek z optického senzoru. [8].....	21
Obrázek 12: Schéma elektronického senzoru [2]	21
Obrázek 13: Schéma kapacitního senzoru [2]	22
Obrázek 14: Snímek z kapacitního senzoru. [8]	22
Obrázek 15: a) normální otisk prstu b) suchý otisk prstu c) mokrý otisk prstu [8] ...	25
Obrázek 16: a) originální obraz b) obraz po segmentaci [8].....	26
Obrázek 17: Tečna papilární linie a úhel, který svírá. [10].	27
Obrázek 18: Obrázek otisku s vyznačeným směrovým polem. [6].	28
Obrázek 19: Směrový obraz papilárních linií [6]	29
Obrázek 20: Orientované okno a znázornění vzdáleností jednotlivých hran. [6].....	29
Obrázek 21: Grafické vyobrazení Gaborova filtru, definován parametry $\theta=135^\circ$, $f=1/5$, $\sigma_x=\sigma_y=3$ [6]	30
Obrázek 22: Snímek otisku po úpravě Gaborovým filtrem. [6]	31
Obrázek 23: Vyobrazení banky Gaborových filtrů pro $n_\theta=8$ a $n_f=3$. [6]	32
Obrázek 24: Diagram metody FingerCode. Přepřacováno z [6]	39
Obrázek 25: Vzorové otisky z databázi DB1-DB4. [14]	42

Obrázek 26: Výsledky FVC2004. [14]	43
Obrázek 27: Procesní diagram předzpracování obrazu	45
Obrázek 28: Zvýrazněný obrázek pomocí modifikované FFT	46
Obrázek 29: Obrázek je segmentován, binárně uzavřen a erodován	47
Obrázek 30: Jedna z nalezených hranic logické matice v oblasti zájmu a vyznačená poloha jádra.....	47
Obrázek 31: Procesní diagram pro získání FingerCode	48
Obrázek 32: Vizuální zobrazení Gaborova filtru.....	49
Obrázek 33: Výchozí vzhled GUI	50
Obrázek 34: Načtený obrázek, zobrazení v novém okně.....	51
Obrázek 35: Vykreslení kroků v GUI – načtení, zvýraznění, detekce jádra.....	52
Obrázek 36: Nalezení shodného otisku prstu v databázi	53
Obrázek 37: Nenalezení shodného otisku prstu v databázi	53
Obrázek 38: Výsledek porovnání dvou různých otisků - správně vyhodnoceno - otisk nesouhlasí.....	54
Obrázek 39: Normálové rozdělení ztotožnění oprávněných a neoprávněných uživatelů.	55
Obrázek 40: Zobrazení závislosti FAR a FRR na nastavení EER	56

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled Fingerprint Verification Competition FVC. [12]	40
Tabulka 2: Přehled databází. [14]	42

ÚVOD

Biometrická identifikace osob na základě otisku prstu je čím dál více používána v každodenním životě. Otisk prstu je vysoce individuální a z časového hlediska dlouhodobě stálý což je velkou výhodou. Jedinečným znakem pro každou osobu jsou papilární linie, které jsou i přes působení mechanických i klimatických jevů téměř nezničitelné. Jeho užitečnost v praxi je známá už mnoho let, avšak práce s otisky, jejich archivace a případně i porovnání byla bez použití výpočetní techniky velmi zdlouhavá a neefektivní. S rozvojem techniky bylo cílem zvýšení produktivity a kvality výsledné práce. Smyslem bylo zautomatizovat celý proces a urychlit tak identifikaci na základě otisku prstu. Identifikace je využívána v oblasti kriminalistiky, daktyloskopie, bezpečnosti, ale i také pro policejné soudní účely. V současné době se otisk prstu používá i pro zabezpečení osobních dat v mobilních telefonech, počítačích a u jiných přenosných zařízení.

V oblasti biometrie není otisk prstu jediný možný prostředek pro identifikaci osob. Rozpoznávat a identifikovat jedince je možno také na základě duhovky a sítnice, podle písma a podpisu, podle pohybu, hlasu či obličeje a také podle dalších anatomických nebo behaviorálních znaků.

Tato diplomová práce rozebírá teoretické poznatky potřebné pro praktické realizování práce. Je popsán otisk prstu, jeho charakteristiky, klasifikace, třídy, jednotlivé daktyloskopické markanty a jejich identifikační hodnoty. Jsou zmíněny snímací senzory a požadavky na ně. Jsou vysvětleny a popsány metody pro porovnávání otisků prstu. Je realizováno předzpracování obrazu a vlastní algoritmus pro porovnání otisků. Vše implementováno v prostředí Matlab.

1 BIOMETRIE

Jedná se o obor, který má původ ve dvou řeckých slovech: „bios“, což znamená život a „metron“ což znamená měřítko. Jde tedy o tzv. „měření života“. V oblasti IT tento pojem charakterizuje automatizované rozpoznávání lidských jedinců na základě rysů anatomických (např. rozpoznávání obličeje, otisků prstů, duhovky, sítnice) a rysů behaviorálních, vycházejících z chování (např. chůze). V biomedicínském oboru se vyznačuje statistickými výpočty v biologii nebo medicíně.

Mezi výhody biometrie patří zvyšování bezpečnosti, odrazování útočníků od podvodů, postupně vylučuje pokusy o popření identity aj.

K nevýhodám řadíme, že nezachovává soukromí, nemůže být anulována v případě prozrazení a že samotný biometrický systém je napadnutelný. [1]

1.1 Biometrické vlastnosti

Biometrické vlastnosti je možno rozdělit na dvě základní skupiny.

Pokud jde o pevný rys, který je dán anatomickými neboli fyzickými vlastnostmi, jedná se o konkrétní biometrickou vlastnost. Tato vlastnost je statická, vždy stejná a není jednoduše ovlivnitelná stavem člověka.

Druhou skupinou jsou vlastnosti dynamické, které vyjadřují různou akci uživatele. V tomto případě je biometrická informace hodně ovlivnitelná. Každé sejmутí biometrické vlastnosti vede většinou k úplně jiné skupině biometrických vzorků. [1]

Kategorizace biometrických vlastností:

- Statické (anatomické vlastnosti) [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
- Dynamické (behaviorální vlastnosti) [1]
 - Hlas / řeč
 - Mimika obličeje a pohyby rtů
 - Podpis (dynamická forma)
 - Dynamika stisku kláves
 - Chůze

Charakteristiky biometrických vlastností patří ke stěžejním kritériím v případě rozhodování o nasazení konkrétního biometrického systému. Mezi ně řadíme: [1]

- Univerzalita – každá osoba by měla mít tuto biometrickou vlastnost
- Jedinečnost – žádné dvě osoby nevlastní stejnou biometrickou vlastnost
- Konstantnost – daná biometrická vlastnost se nemění v čase
- Získatelnost – jde kvantitativně měřit
- Výkonnost – biometrická vlastnost se nesmí změnit a ani zestárnout, což má vliv na výkonnost systému
- Akceptace – ochota lidí nechat si nasnímat biometrickou vlastnost
- Odolnost proti falšování – snadnost vytvoření falsifikátu biometrické vlastnosti
- Finanční náklady na pořízení – náklady na pořízení systému

1.2 Biometrický systém

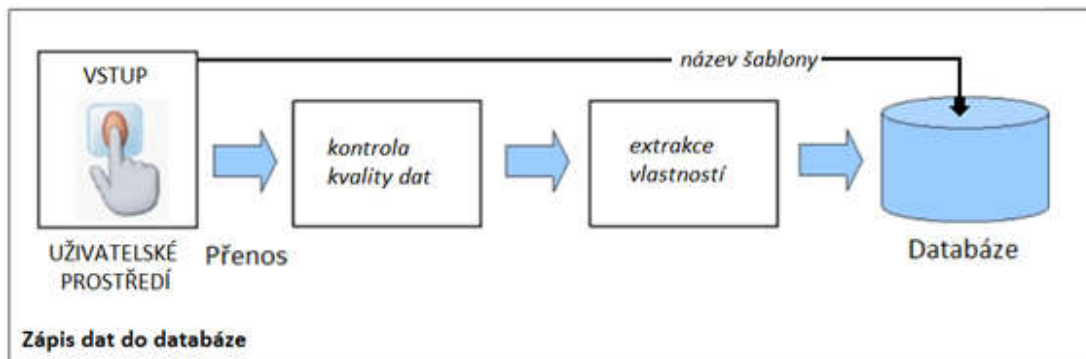
Rozlišujeme dva základní biometrické systémy – unimodální a multimodální.

- Unimodální biometrický systém využívá jenom jednu vlastnost. V praxi jsou nejvíce využívány. Jejich výhodou jsou nižší náklady na pořízení, ale zároveň mají nižší spolehlivost.
- Multimodální biometrický systém používá buď více biometrických vlastností, nebo větší množství příznaků jediné biometrické vlastnosti. Zde jsou naopak větší náklady na pořízení, ale výhodou je větší spolehlivost rozpoznání. [1]

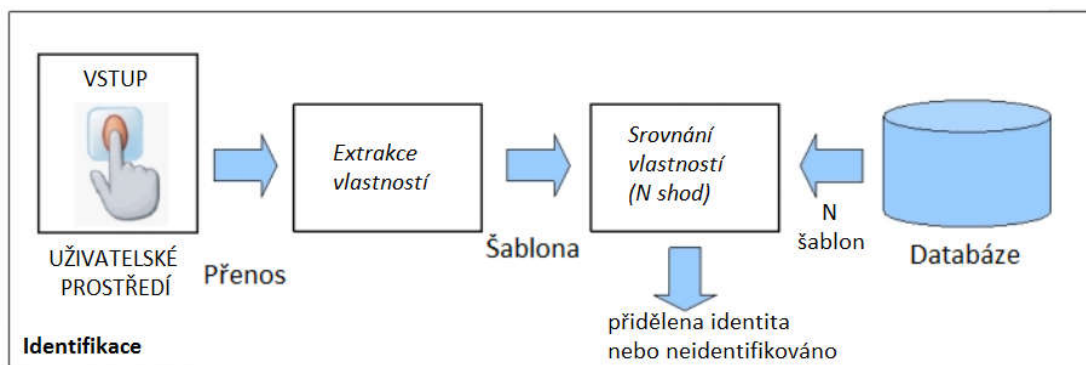
V závislosti na kontextu použití biometrického systému rozlišujeme systém *verifikační* a *identifikační*.

- Verifikační systém ověřuje totožnost osoby srovnáním nasnímaných dat s jejími vlastními biometrickými charakteristikami, které má již uloženy v systému (porovnávání metodou 1:1) Jedná se o explicitní tvrzení o identitě, kdy uživatel předkládá svoji identitu (otisk prstu, čipová karta, atd.), a ta je buď potvrzena (přijata) nebo nepotvrzena (odmítnuta). Toto tvrzení o identitě právoplatným uživatelem může být jak pozitivní, tak i negativní. (viz obrázek 3)
- Identifikační systém hledá pro zadané vstupní hodnoty shodu s hodnotami uloženými v databázi (porovnání metodou 1:N). Na rozdíl od verifikačního systému nemusí uživatel předkládat své tvrzení o identitě. Jedná se tedy o implicitní tvrzení o identitě, kdy je identita uživatele vyhledána a následně mu přiřazena (existuje-li). (viz obrázek 2)

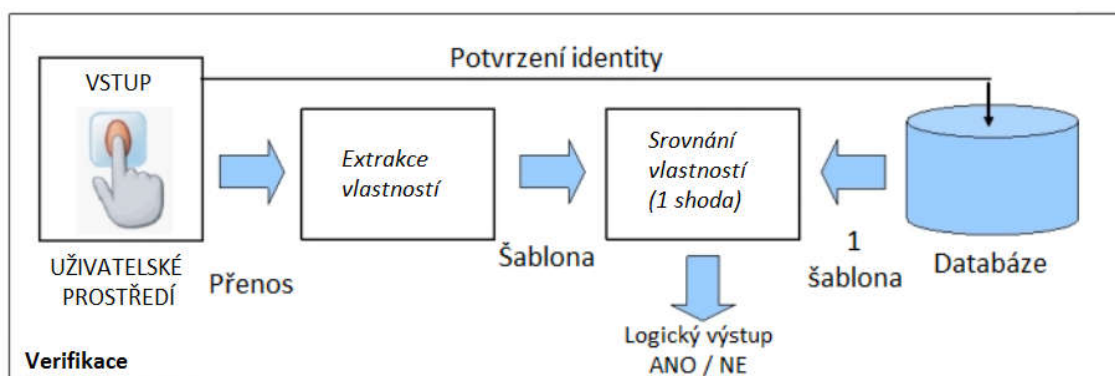
Ve fázi zápisu dat se nejdříve biometrické charakteristiky jedince nasnímají a uloží se ve formě digitálních dat do databáze.



Obrázek 1: Zápis dat do databáze. Přepřacováno z [8]



Obrázek 2: Identifikace jedince. Přepřacováno z [8]



Obrázek 3: Verifikace jedince. Přepřacováno z [8]

Aplikace může pracovat v pozitivním nebo negativním rozpoznávacím režimu

- Pozitivní požadavek identity (positive recognition application [6])
 - systém stanoví, zdali identita osoby je právě ta, kterou o sobě tvrdí (explicitně i implicitně). Účelem pozitivního režimu je zamezit vícero lidem od použití stejné identity. Tento režim se používá například v přístupových systémech, kdy je buď přístup povolen či odmítnut.
- Negativní požadavek identity (negative recognition application [6])
 - systém stanoví, zdali identita osoby není ta, kterou o sobě tvrdí (explicitně i implicitně). Účelem negativního režimu je zamezit použití vícero identit pouze jednou osobou. Například systém při použití vyplácení sociální podpory, kdy si osoba A již o svoji podporu zažádala a chce si opět zažádat, ale nyní o sobě tvrdí, že je osoba B. Systém rozpozná, že osoba B není ta, za kterou se vydává, protože již má v systému zahrnuté biometrické charakteristiky osoby A, a systém tudíž rozpoznal, že osoba B je ve skutečnosti osoba A. Shrnutí, pokud se vstupní charakteristiky žádající osoby neshodují s žádnými uloženými biometrickými daty v systému, potom bude požadavek přijat, v případě shody bude odmítnut.

Z výše uvedeného vyplývá, že standardní metody pro uživatelské ověření, jako jsou hesla, PIN, klíče a tokeny se mohou používat v případě pozitivního požadavku identity, avšak negativní požadavek identity může být používán pouze s biometrickými vlastnostmi jedince. Kromě toho pozitivní požadavek může pracovat jak v procesu identifikace, tak i verifikace, ale negativní požadavek pracuje pouze v procesu identifikace – systém musí prohledat celou databázi a porovnat, jestli se vstupní údaje neshodují s nějakým již uloženým záznamem.

2 HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI BIOMETRICKÝCH SYSTÉMŮ

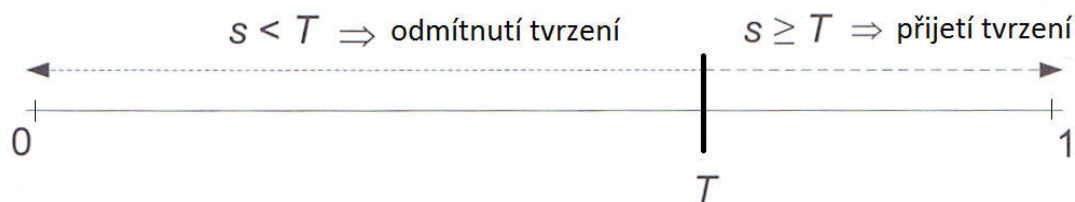
Každý biometrický systém je zatížen chybou, která vzniká při porovnání jednotlivých systémů nebo vzorků. Následující popis je více zaměřen na otisk prstu, avšak postupy jsou platné i pro ostatní biometrické aplikace. V případě identifikace otisku prstu je cílem jasná identifikace osoby na základě otisku prstu. [1]

Každý biometrický systém prochází jednotlivými kroky [1]:

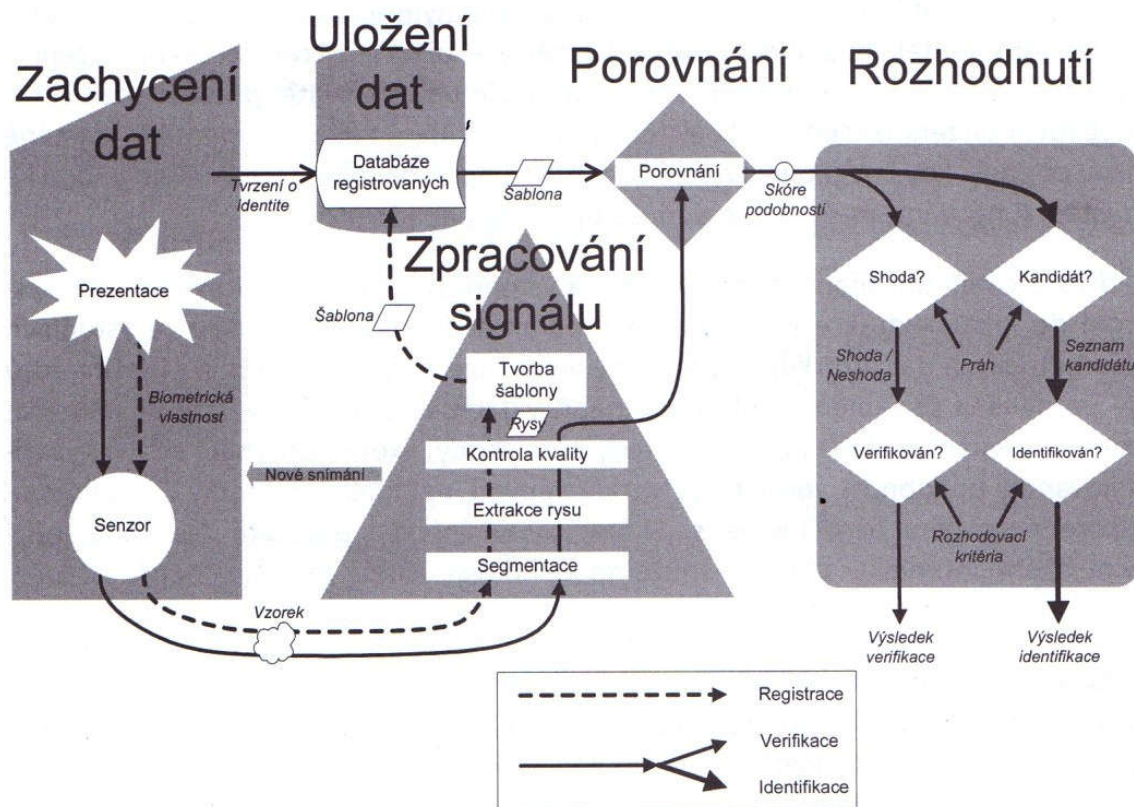
- Záznam dat – prezentuje se biometrická vlastnost senzoru a ten nasnímá biometrickou vlastnost jako vzorek, který pokračuje do dalšího kroku.
- Zpracování – do tohoto bodu vstupuje vzorek biometrické vlastnosti. Dochází k předzpracování např. obrazu, kontrola rozlišení, segmentace a extrakce jednotlivých znaků. Výchozí data se buď ukládají do šablony pro porovnání, nebo do modulu pro uložení dat uživatele.
- Uložení dat – ukládá se šablona z předchozího kroku, vytváří se databáze, ve které se dá hledat.
- Porovnání – v tomto bodu dochází k porovnání vstupního vzorku s databází. Výsledkem je skóre porovnání.
- Rozhodnutí – zde je rozdílné zda se jedná o verifikaci či identifikaci. V případě verifikace je výsledkem, jestli jsou vzorky shodné nebo ne. U identifikace je výsledkem soupis kandidátů.

Po zpracování vstupních hodnot (filtrace, úprava nasnímaných dat) přejde biometrický systém do kroku extrakce významných charakteristik (příznaků, rysů, apod.). Tato množina charakteristik je následně porovnána s uloženou šablonou (např.: databáze, čipová karta) a výsledek tohoto porovnání je uložen jako skóre porovnání (s), teda míra shody. Skóre porovnání vyjadřuje kvalifikovanou podobnost mezi vstupními rysy z extrahovaného vzorku a uloženou šablonou. Skóre porovnání vždy leží v intervalu $<0,1>$. Pokud je skóre blíže k hodnotě 1, tím je si systém více jistý, že dva nasnímané otisky jsou právě z jednoho prstu.

Citlivost systému je regulována prahem T , který leží v intervalu $<0,1>$ a určuje, kdy bude skóre porovnání (s) uznáno jako vyhovující či nevyhovující. Pokud je výsledek menší jak T , je otisk zhodnocen jako nevyhovující. Pokud je skóre větší jak T , je vyhodnocen jako vyhovující neboli shodný otisk. Závěr je přijetí nebo odmítnutí. [1]



Obrázek 4: Oblast přijetí a odmítnutí tvrzení v závislosti na prahu T. Přepracováno z [1]



Obrázek 5: Obecný biometrický systém [1]

Rozhodnutí biometrického systému může být jak správné, tak i chybné. Nastávají tyto možné varianty [1]:

- Osoba A je přijata jako A => **správné přijetí/shoda** (True Accept/Match)
- Osoba A je odmítnuta jako B => **správné odmítnutí** (True Reject)
- Osoba A je přijata jako B => **chybné přijetí/shoda** (False Accept/Match)
- Osoba A je odmítnuta jako A => **chybné odmítnutí** (False Reject)

Z těchto možností lze odvodit míry chyby, které jsou důležité pro hodnocení spolehlivosti. V klasickém biometrickém systému se kromě jiných především setkáváme s dvěma druhy chyb. První typ chyby je, když jsou dva otisky od různých

osob považovány za stejný otisk (*chybná shoda, false match*). Druhý typ chyby je, pokud jsou dva otisky nasnímané od stejné osoby (nasnímané v různém čase) vyhodnoceny jako odlišné (*chybná ne-shoda, false non-match*). Je nutno zmínit, že tyto dvě chyby jsou taky často nazývány jako chybné přijetí (*false acceptance*) a chybné odmítnutí (*false rejection*). Jedná se o rozlišení chyby v případě pozitivního či negativního požadavku na identitu. Při použití u pozitivního požadavku na identitu (např. přístupový systém) je chybná shoda (*false match*) určena jako chybné přijetí neprávoplatného uživatele (*false acceptance*), zato chybná ne-shoda (*false non-match*) je určena jako odmítnutí právoplatného uživatele (*false reject*). V případě negativního požadavku na identitu (např. registrace do systému sociální podpory) je chybná shoda (*false match*) určena jako zamítnutí právoplatného požadavku (*false reject*), zato chybná ne-shoda (*false non-match*) má za důsledek chybné přijetí falešné identity (*false acceptance*). Zápis „chybná shoda/ne-shoda“ není tedy aplikačně závislý a proto je ho v zásadě vhodnější používat než „chybné přijetí/odmítnutí“. Nicméně, v praxi se častěji můžeme setkat s vyjádřením míry chybného přijetí (FAR - *false acceptance rate*) a míry chybného odmítnutí (FRR – *false rejection rate*), jelikož v komerčním prostředí jsou tyto systémy na pozitivní požadavek na identitu více zastoupeny.

2.1 Míra chybného přijetí (FAR – False Acceptance Rate)

Jedná se o biometrickou verifikační chybu, kdy jsou dva rozdílné otisky vyhodnoceny jako stejný otisk (nazýváno chybná shoda – *false match* v případě pozitivního požadavku a chybná ne-shoda – *false non-match* v případě negativního požadavku), který má za důsledek chybné přijetí útočníka (*false acceptance*). Míra chybného přijetí, tedy vždy odkazuje přímo na tvrzení uživatele - na jeho požadavek, který je vyhodnocen (*false match* nebo *false non-match*) a na základě tohoto vyhodnocení chybně přijat. [7]

$$FAR_P = \frac{N_S}{N_C} \cdot 100 [\%]; FAR_N = \frac{N_{NS}}{N_C} \cdot 100 [\%] \quad (2.1)$$

kde:

FAR_P – míra chybného přijetí v případě pozitivního požadavku na identitu

FAR_N – míra chybného přijetí v případě negativního požadavku na identitu

N_S – počet porovnání rozdílných vzorů s výsledkem shoda

N_{NS} – počet porovnání rozdílných vzorků s výsledkem ne-shoda

N_C – celkový počet porovnání rozdílných vzorků

2.2 Míra chybného odmítnutí (FRR – False Rejection Rate)

Jedná se o biometrickou verifikační chybu, kdy jsou dva stejné otisky vyhodnoceny jako různé otisky (nazýváno chybná ne-shoda – *false non-match* v případě pozitivního požadavku a chybná shoda – *false match* v případě negativního požadavku), který má za důsledek chybné odmítnutí právoplatného uživatele (*false rejection*). Míra chybného odmítnutí tedy vždy odkazuje přímo na tvrzení uživatele - na jeho požadavek, který je vyhodnocen (*false match* nebo *false non-match*) a na základě tohoto vyhodnocení chybně zamítnut. [7]

$$FRR_p = \frac{N_S}{N_C} \cdot 100 [\%] ; FRR_N = \frac{N_{NS}}{N_C} \cdot 100 [\%] \quad (2.2)$$

kde:

FRR_p – míra chybného přijetí v případě pozitivního požadavku na identitu

FRR_N – míra chybného přijetí v případě negativního požadavku na identitu

N_S – počet porovnání stejných vzorků osoby A s výsledkem ne-shoda

N_{NS} – počet porovnání stejných vzorků osoby A s výsledkem shoda

N_C – celkový počet porovnání stejných vzorků osoby A

2.3 Míra chybné shody (FMR – False Match Rate)

Míra chybné shody je pravděpodobnost, že se otisk osoby bude chybně shodovat s cizím náhodně vybraným jedním otiskem.

$$FMR(T) = \int_T^1 p(s|H_1 = \text{pravda})ds \quad (2.3)$$

kde:

T je rozhodovací práh

H_1 je výrok „rozdílné“ (vzor a šablona pocházejí od různých osob)

p je pravděpodobností hustota, že výrok v závorce je pravdivý

s je skóre porovnání

2.4 Míra chybné neshody (FNMR – False Non-Match Rate)

Míra chybné neshody je pravděpodobnost, že se otisk osoby nebude shodovat s vlastní šablonou otisku uloženou v systému.

$$FNMR(T) = \int_0^T p(s|H_0)ds \quad (2.4)$$

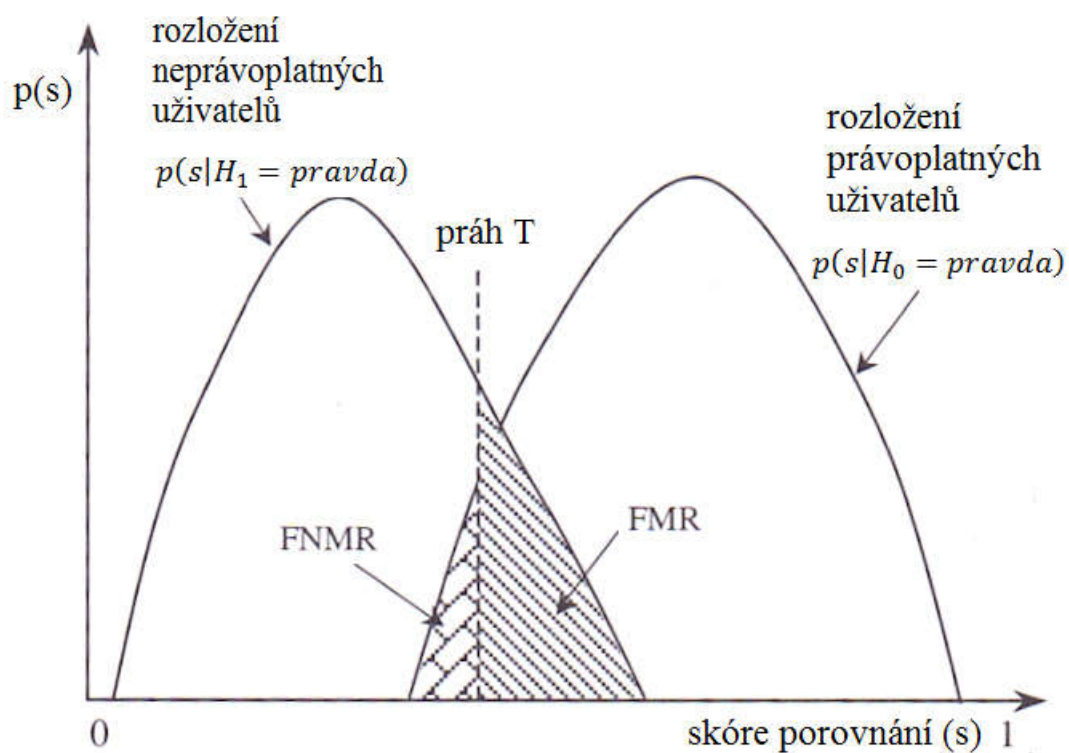
kde:

T je rozhodovací práh

H_0 je výrok „stejný“ (vzor a šablona pocházejí od stejné osoby)

p je pravděpodobnostní hustota, že výrok v závorce je pravdivý

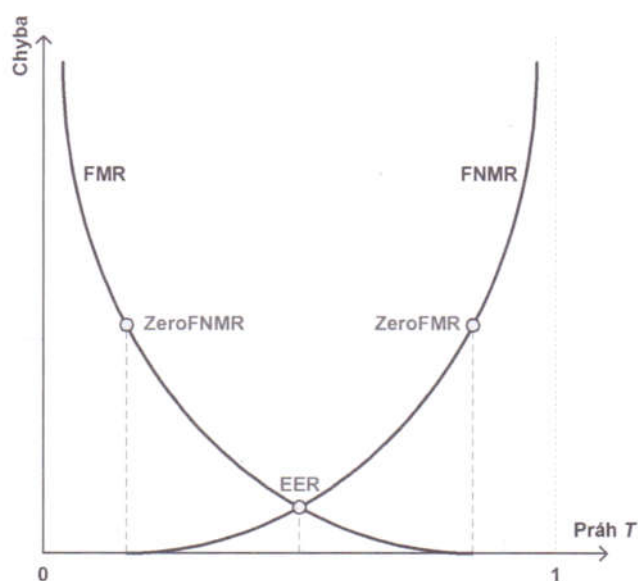
s je skóre porovnání



Obrázek 6: Chyby FMR a FNMR. Přepřacováno z [6]

2.5 Míra vyrovnaní chyb (EER – Equal Error Rate)

Míra vyrovnaní chyb vychází z podmínky $FMR(T) = FNMR(T)$. Přesné určení EER není možné, protože se v praxi u FMR a FNMR křivek jedná o diskrétní funkce. Je možné najít oblast, kde se obě chyby shodují. V případě nastavení prahu T na hodnotu EER bude stejný počet osob chybně akceptován i chybně odmítnut. V závislosti na požadavcích jednotlivých systémů tento práh nastavujeme. K míře vyrovnaní chyb se váží pojmy ZeroFMR, což je dolní hranice FNMR, tj. $FMR = 0$ a ZeroFNMR, což je dolní hranice FMR, tj. $FNMR = 0$.



Obrázek 7: Závislost EER, ZeroFMR, ZeroFNMR. [1]

2.6 Míra neschopnosti nasnímat (FTA – Failure To Acquire)

Je vyjádřena podílem chybných záznamů snímacího senzoru. Záznam biometrické charakteristiky může být odmítnut, i když je charakteristika přítomna. Míra se využívá především pro hodnocení kvality snímacích senzorů. Čím je hodnota nižší, tím je senzor vhodnější pro záznam biometrické charakteristiky. [1]

2.7 Míra neschopnosti zaregistrovat (FTE – Failure to Enroll)

Vyjadřuje procentuální podíl uživatelů, které se není systém schopen naučit. Míra neschopnosti zaregistrovat hodnotí schopnost algoritmu pracovat s nekvalitními biometrickými charakteristikami. [1]

2.8 Míra neschopnosti porovnat (FTM – Failure To Match)

Je vyjádřena jako procentuální podíl charakteristik, které nemohly být porovnány nebo jinak zpracovány. Tato míra slouží k posouzení schopnosti systému udělat rozhodnutí, tj. porovnání nedospěje k výsledku. [1]

3 OTISK PRSTU

Každý jedinec má na povrchu prstu vyvýšené reliéfy kůže neboli papilární linie. Tyto linie jsou jedinečné pro každého člověka a jsou vytvarovány tak, že podle jejich průběhu lze rozlišovat jedince od sebe. Papilární linie se formují již během embryonálního vývoje a vyjadřují jednoznačně fyzickou identitu člověka. Výjimku mohou tvořit lidé, kteří trpí poruchami kůže. Grafickou reprezentací reliéfu kůže je **otisk prstu**. Každý jedinec má unikátní a ojedinělý otisk prstu, tudíž na světě neexistují dva totožné otisky prstu. [1]

V případě kriminalistické praxe platí tzv. daktyloskopické zákony:

- Papilární linie se v průběhu života nemění, tudíž zůstávají stejné. Papilární linie se u jedince formují už v průběhu embryonálního vývoje. Tato kresba se během celého života nemění. Případy, kdy se porovnávaly otisky prstů po několika letech, dokázaly, že otisky zůstávají stejné. Pouze v pokročilém věku může docházet k degradaci otisku z důvodu zvrátnění kůže.
- Na celém světě neexistují dva jedinci, kteří by měli stejnou strukturu papilárních linií. Je známo, že je možných asi 64 miliard různých variant obrazců. Z toho vychází, že výskyt dvou shodných otisků je velice nepravděpodobný a proto můžeme považovat otisk prstu za individuální.
- Papilární linie jsou neustále obnovovány dorůstáním kůže, není možné je odstranit ani změnit. Výjimku může tvořit poškození zárodečné vrstvy kůže. Nelze je odstranit ani spálením či seříznutím. V tomto případě mohou být odstraněny jen dočasně a to do okamžiku, než dojde k úplnému zahojení kůže. [2]

3.1 Význam daktyloskopie

Tato vědní disciplína se řadí mezi nejstarší obory kriminalistické praxe, která se zaměřuje na identifikaci osob. Daktyloskopie využívá pro identifikaci osob papilárních linií, které se nachází na některých částech lidského těla. Jsou vytvořeny na obou dlaních, na vnitřní straně prstů a na prstech a chodidlech nohou. Nikde jinde na těle papilární linie nenajdeme. Z pohledu kriminalistiky je důležité, že nejsou přítomny u ostatních živočichů na zemi. Daktyloskopie tak může vycházet z toho, že objevené stopy odpovídají vysloveně člověku. [2]

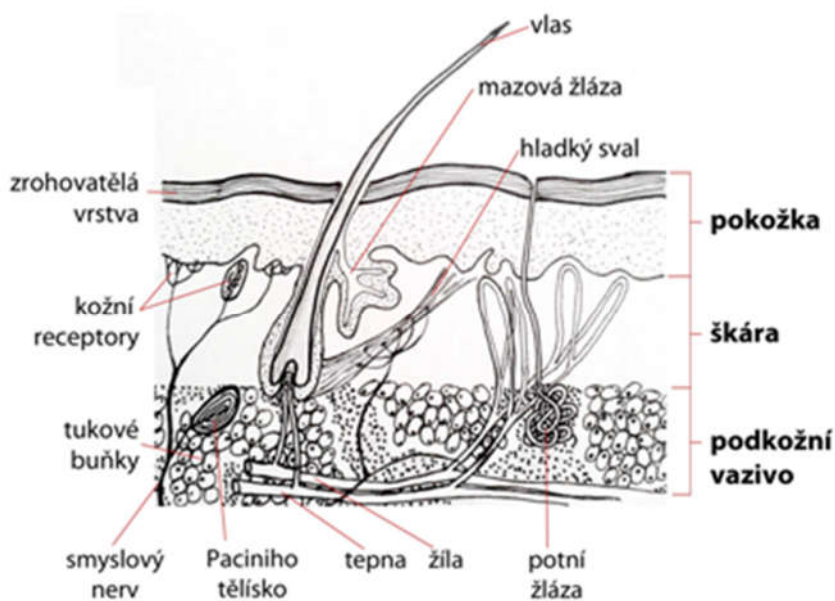
3.2 Charakteristika otisku prstu

Na dlaních rukou, prstech a chodidlech nohou jsou patrné papilární linie, které představují zvrásnění kůže. Základní vrstvy kůže tvoří pokožka, škára a podkožní vazivo.

Základem pokožky je dlaždicový epitel, který tvoří několik množství buněk. Svrchní vrstvy kůže odumírají, rohovatí a dochází k jejich odlupování.

Další vrstvou je škára, je to silná vazivová vrstva kůže. Mezi pokožkou a škárou jsou papily, které obsahují nervová zakončení a vlasečnicové sítě. Skrze papily pronikají živiny do pokožky, v důsledku toho jsou papilární linie zvlněné, aby dosáhly co největší plochy pro průchod těchto živin. Výška papilárních linií se nachází v rozsahu 0,1 – 0,4 mm a šířka v rozsahu 0,2 – 0,5 mm. Díky tomu můžeme detekovat otisk prstu.

Podkožní vazivo se nachází pod škárou a obsahuje tukové buňky, které fungují jako zásoba energie. [3]



Obrázek 8. Řez kůží. [11]

Nejčastěji se setkáváme se třemi druhy otisků prstů. Liší se hlavně způsobem snímání, ale i vzhledem otisku.

Rozlišujeme otisk [1]:

- Válený (neboli rolovaný) - v tomto případě je potřeba papír a inkoust. Prst

se namočí do inkoustu a otiskne se na papír, který tvoří přenosové medium. Tato metoda je zdlouhavá a otisky mohou mít horší kvalitu

- Píchaný (neboli živý) – pro snímání tohoto otisku se používají snímače, které umožňují on-line zpracování otisku. Výhodou je okamžitý obraz a posouzení kvality obrazu otisku a případné opětovné sejmutí.
- Latentní (neboli skrytý) – jsou to náhodné a často málo kvalitní otisky vznikající při kontaktu částí lidského těla s předměty. Vznikají v důsledku mastnoty a potu na konečcích prstů jedince. Tento typ je často využíván v kriminalistické praxi.

3.3 Klasifikace

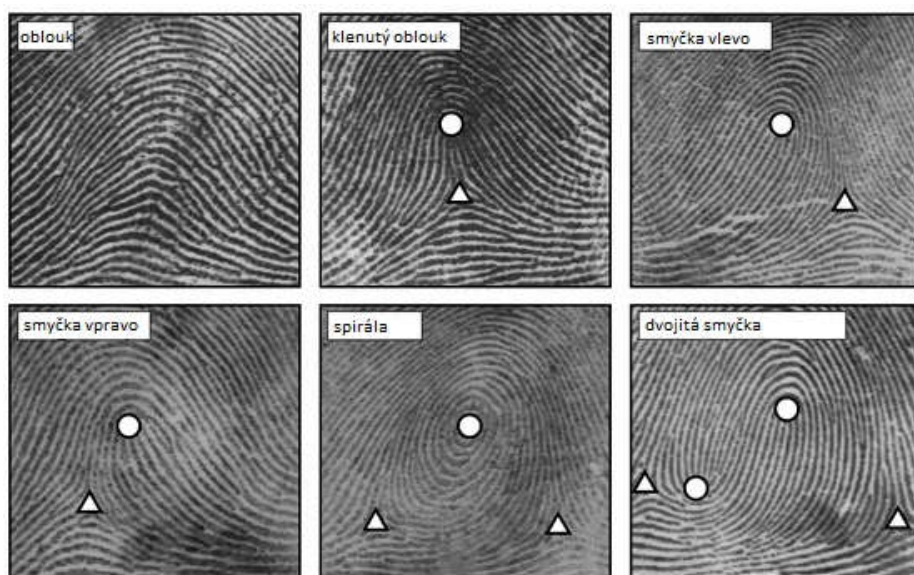
Pro klasifikaci jsou stěžejní dva pojmy – **vrchol** neboli **střed otisku (jádro)** a **bod delta**. Vrchol je místo, kolem kterého se otáčejí papilární linie. Je možno si to představit na souřadnicovém systému, kdy vrchol představuje bod s nejvyšší nadmořskou výškou, a papilární linie označují souřadnice. Bod delta je místo, ze kterého se papilární linie rozbíhají do tří stran. [2]

3.4 Třídy otisků prstů

Papilární linie vytvářejí v otisku prstu vzor, který je označován jako třída otisku prstu. Mezi tyto třídy patří:

- Oblouk – je reprezentován papilárními liniemi, které probíhají od jednoho okraje prstu k druhému. Neobsahuje deltu ani vrchol.
- Klenutý oblouk – má strmé papilární linie. Obsahuje vrchol i deltu.
- Spirála / závit / vír – je označována také jako vícedeltový vzor, papilární linie vytvářejí kruhovitě, spirálovitě a nepravidelné útvary. Obsahuje dvě a více delt i vrchol.
- Levá smyčka – je tvořena papilárními liniemi, které vychází z levé strany otisku, prochází vrcholem a vrací se zpět na levou stranu otisku. Na pravé straně otisku se nachází bod delta.

- Pravá smyčka – je tvořena papilárními liniemi, které vychází z pravé strany otisku, prochází vrcholem a vrací se zpět na pravou stranu. Na levé straně se nachází bod delta.
- Dvojitá smyčka – v obraze obsahuje dvě jádra a dvě delty. [1],[2]



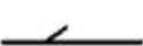
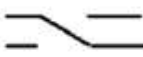
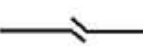
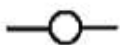
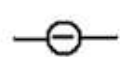
Obrázek 9: Daktyloskopické vzory. Přepřacováno z [16]

3.5 Daktyloskopické markanty

Identifikace osob se provádí podle individuálních znaků každého člověka, kterými jsou daktyloskopické markanty. Papilární linie obsahují hodně markantů, které dovolují jednoduše rozlišit obrazce od sebe.

V procesu identifikace se jedná o porovnávání a ztotožňování jednotlivých otisků. Podstatou je vyhledávání jednotlivých markantů a porovnává se, zdali se stejný znak nachází ve stejném otisku, který slouží jako porovnávací vzor. Tvar znaku můžeme považovat za kvalitativní stránku. Z kvantitativního hlediska používáme polohu znaku. Vyjadřuje vzdálenost znaků mezi sebou a je definována počtem papilárních linií, které mezi nimi jsou. Jestli jsou splněna obě hlediska kvalitativní i kvantitativní, tudíž se shodují tvarem i polohou, je proces identifikace u konce a můžeme mluvit o totožnosti otisků. [2]

Na následujícím obrázku jsou vidět nejpoužívanější markanty:

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 rozdvouje, jedna není delší než 3 mm
	můstek	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 rozdvouje 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 uzavřená do kruhového prostoru

Obrázek 10: Daktyloskopické markanty. [4]

Daktyloskopické markanty se vyskytují v otiscích prstů v různém počtu. Jednotlivé markanty mají různou identifikační hodnotu, kterou lze popsat vztahem:

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

I – vyjadřuje identifikační hodnotu markantu

N – vyjadřuje četnost výskytu na 1 mm²

Dlouhými experimenty byly stanoveny identifikační hodnoty markantů.

Pro vzájemnou shodu je důležitý minimální počet znaků. Ten je možný vyjádřit vztahem:

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

P – součet identifikačních hodnot markantů

N – počet otisků žijících osob

Z informace, že na zemi žije asi 5 miliard osob, které vytvoří až $5 \cdot 10^{10}$ otisků, plyne, že $P = 10,69897$.

Závěrem je tedy, že pro jednoznačnou shodu je potřeba shodnost 10 - ti a více markantů.

Pro identifikaci není jednoznačný minimální počet markantů, ale nýbrž součet jednotlivých identifikačních hodnot. [2]

3.6 Snímače otisků prstu

Procesem snímání otisků prstů rozumíme převod otisku do elektronické podoby. Pro následné zpracování je důležitá dobrá kvalita vstupních dat. Snímání otisků prstů lze rozdělit do dvou rozlišných skupin:

- Klasické snímání
- Bezprostřední snímání

V případě klasického snímání jde o vyhledávání daktyloskopických stop, jejich zajištění a následné přenesení do evidencí a tudíž do digitální podoby. Jedná se o otisky, které vzniknou při kontaktu kůže s předmětem či objektem. Z počátku se řešil problém převedení manuálních otisků do elektronické podoby. Tento problém byl vyřešen zavedením optických skenerů, které se využívají do dnes.

U bezprostředního snímání se jedná o přímé sejmutí otisku prstu za pomoci snímacího senzoru. Tento typ snímání nahradil princip snímání používaný v dřívějších dobách. Podstatou bylo použití tiskařské černě, otisknutí na papír a následné oskenování. Takový postup je dnes už nepřijatelný jak z hlediska hygienického a také z hlediska kvality obrazu. Neopomenutelným důvodem je taky časová náročnost této metody. Pro bezprostřední snímání je používán anglický výraz live-scanning. Tento

pojem zahrnuje technologie snímání a jejich automatizovaný převod do digitální podoby. Všechna zařízení realizující snímání otisků přiložením prstu se nazývají live-scanner.[2]

3.6.1 Snímací senzory

Senzory pro snímání lze rozdělit podle způsobu kontaktu na kontaktní a bezkontaktní.

- Senzory kontaktní – zahrnují technická zařízení, která pracují na různých fyzikálních principech. Zahrnují senzory:
 - ✓ Optické
 - ✓ Elektronické
 - ✓ Opto – elektronické
 - ✓ Kapacitní
 - ✓ Tlakové
 - ✓ Teplotní

Z charakteristiky otisku prstu víme, že povrch prstu je plastický a rozdělen na hřebeny, které tvoří papilární linie a údolí neboli brázdy. Z těchto znaků vychází principiálně řada snímacích senzorů.

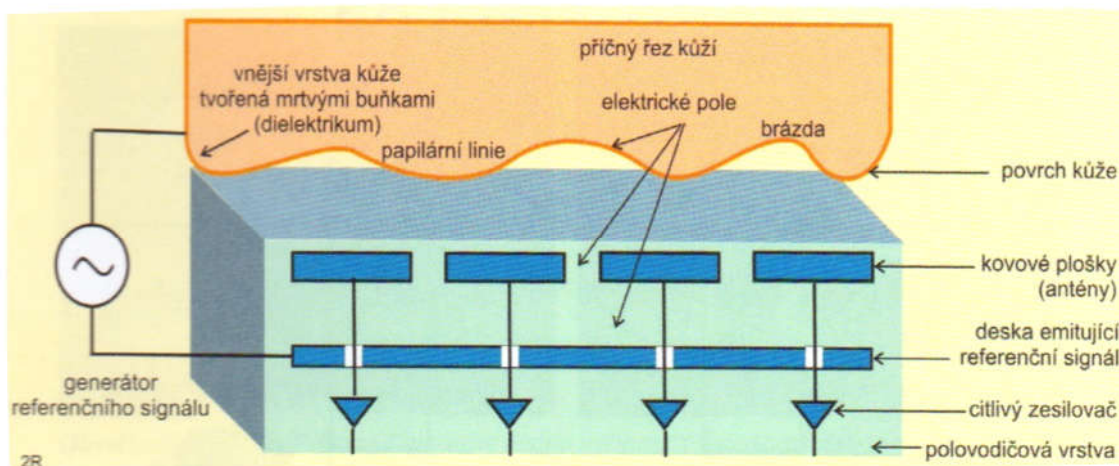
Optické senzory jsou používány už od dávné historie. Podstatou je technologie FTIR – Frustrated Total Internal Reflection. Povrch prstu, který je přiložen na průhlednou desku senzoru, je ze spodní části osvětlován laserovým paprskem. CCD prvek¹ pak snímá odražený světelný tok. Hloubka papilárních linií a brázd určuje kvantum odraženého světla. Nejvíce odráží světlo papilární linie, méně potom brázdy. Negativně ovlivňuje snímání špína či pot. Citlivost CCD prvku je nastavena pouze na registraci papilárních linií. Jiné optické senzory mohou využívat i jiných technologií.

¹ CCD prvek je elektronická součástka používající se pro snímání obrazové informace.



Obrázek 11: Snímek z optického senzoru. [8]

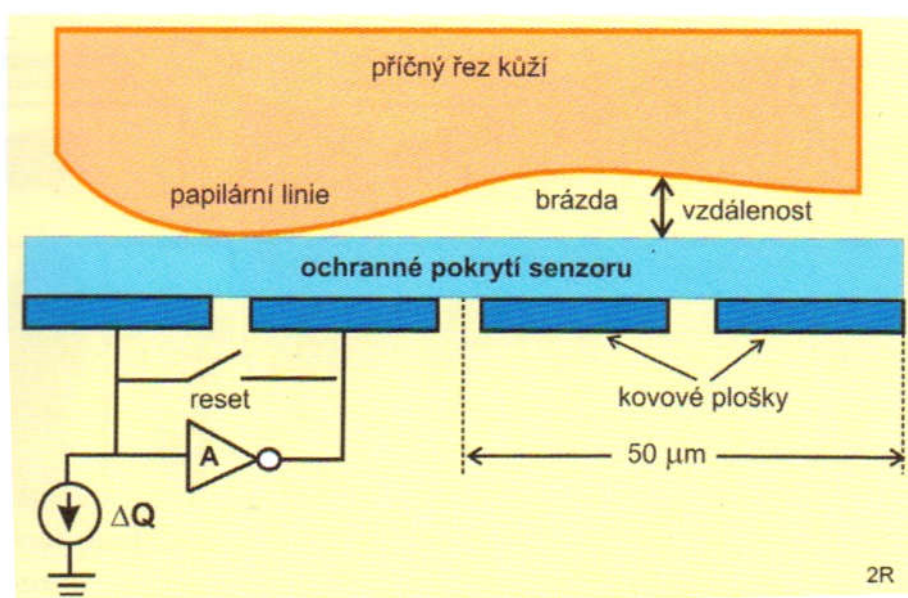
Elektronické senzory vycházejí z principu, že vzniká elektrické pole mezi dvěma vodivými, paralelními a elektricky nabitými deskami. Pokud se změní tvar horní desky na vlnitý profil v důsledku papilár a brázd tak se změní i tvar elektrického pole, který se od toho odvíjí. Povrch kůže tvoří horní desku, do které je pouštěn elektrický signál. Vrchní vrstvu pokožky tvoří odumřelé buňky, které jsou nevodivé. Pod touto vrstvou se nachází vodivá vrstva slané tekutiny, ta vzniká v důsledku růstu a odumírání povrchových buněk. Kolem senzoru se nachází vodivý prstenec, ten když přijde do styku s prstem tak dojde k uzavření elektrického obvodu. Nad základní deskou, která vysílá referenční signál, leží snímací deskové antény, které zachytávají elektrické pole deformované v důsledku linií a brázd na kůži. Výsledný signál je zesílený a převeden na obraz otisku. Tento typ senzoru proniká hlouběji do kůže a díky tomu má výhodu, že nereaguje na špínu.



Obrázek 12: Schéma elektronického senzoru [2]

Opto-elektrické senzory mají dvě základní vrstvy. Vrchní vrstvu tvoří polymer. Který emituje světlo po dotyku prstu. Další vrstvou jsou fotodiody, které světlo zachytí a převedou světlo na elektrický signál a tak vzniká obraz otisku.

Kapacitní senzory jsou založeny na měření elektrické kapacity. Senzor tvoří několik vodivých ploch, které jsou vzájemně odděleny izolací. Při dotyku kůže linie přemost'ují vodivé plochy a brázdy se chovají jako izolant. Na výstupu měříme napětí a kapacitní úbytky mezi plochami.



Obrázek 13: Schéma kapacitního senzoru [2]



Obrázek 14: Snímek z kapacitního senzoru. [8]

U *tlakových senzorů* je podstatou reakce na tlak papilárních linií na senzor. Povrch

tvoří piezoelektrický krystal, který tlak převádí na elektrický signál. Papilární linie vytváří tlak vyšší a brázdy nižší.

Teplotní senzory vycházejí z reakce na teplotu. Jsou velice citlivé a umožňují tak rozlišit velmi malé rozdíly teplot mezi brázdami a papilárními liniemi. Brázdy mají teplotu nižší, protože jsou více vzdáleny od senzoru a linie zase větší. Podle teploty lze taktéž dobře ověřit, zda se nejedná např. o napodobeninu otisku a zdali otisk patří opravdu živé osobě.

- Senzory bezkontaktní – umožňují snímání bez dotyku prstu a eliminuje se tak případné znečištění senzoru a stopy otisku prstu na senzoru. Mezi ně řadíme senzory:

✓ Optické

✓ Ultrazvukové

Senzory optické pracují v podstatě na stejném principu jako dotykové senzory s tím rozdílem, že světelný paprsek může snímat otisk až ze vzdálenosti 5 – 10 cm.

Ultrazvukové senzory umožňují kvalitnější snímání oproti ostatním způsobům. Odstraňují některé nedostatky hlavně optických metod. Výsledný obraz nasnímaný opticky má pouze dvě dimenze (2D) s často malým kontrastem. Obraz snímaný senzorem ultrazvukovým má tři dimenze (3D) a lepší kontrast. Pracuje na principu vysílání vln a vyhodnocování odražených zvukových vln. [2]

3.6.2 Požadavky na snímací senzory

Pro kvalitu výsledného obrazu je zapotřebí aby senzory odpovídaly několika požadavkům. Mezi ně řadíme [5]:

- Dostatečné rozměry a plocha snímání – v neustálém rozvoji v oblasti mikroelektroniky je snaha o miniaturizování senzorů. Plocha snímání ale nemůže být menší než plocha prstu. V oblasti elektroniky dochází k miniaturizaci, např. přístup do počítačů.
- Dobré rozlišení – je důležitý přijatelný kontrast, obraz by neměl být zkrácen a měl by disponovat co největším rozsahem škály šedé barvy.
- Dostačující ochrana proti napodobeninám – snímač sám není dostatečně odolný vůči napodobeninám. Doplňující může být ochrana kamerovým systémem, případně kontrola fyzickou osobou.

- Odolnost proti mechanickému poškození – snímače jsou často vytvořeny pro připojení k počítači. Na náročné klimatické či mechanické podmínky nejsou testovány, což je chybou.
- Spolehlivost senzoru – je realizována pomocí testů a následného statistického vyhodnocení.
- Životnost senzoru – odvíjí se od použitých materiálů, každý materiál má jinou životnost a tím je dána i životnost senzoru.
- Cena – je velmi proměnlivá, je závislá na konstrukci a použitých komponentech.

4 PŘEDZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Pro systémy, které rozpoznávají otisky prstu je důležitá kvalita obrazu. Hodně faktorů ovlivňuje kvalitu obrazu otisků, mezi tyto faktory patří například typ senzoru (optický, kapacitní), drsnost konečků prstu (u lidí manuálně pracujících), stav prstu (suchý, mokrý), rozlišení obrazu, špatný kontakt prstu s čidlem, přítomnost šumu a případné stopy z předchozího uživatele.

S rozvojem technologií se zlepšuje kvalita senzorů, avšak optické skenery pracují lépe než ostatní, hlavně v případě špatné kvality prstu.

Velmi běžný je problém mokrého nebo suchého otisku prstu. Je ovlivněn hodně životním prostředím (teplota, vlhkost). Suché otisky prstu mohou být v důsledku nízkých teplot nebo po otření právě umytých rukou. Takto nasnímaný otisk prstu se vyznačuje přerušnými hřebeny, jako je na obrázku 15 b). V případě mokrého otisku dochází k propojování hřebenů (obrázek 15 c). Doporučuje se otřít prsty. [8]



Obrázek 15: a) normální otisk prstu b) suchý otisk prstu c) mokrý otisk prstu [8]

Nízká kvalita otisku prstu může být způsobena taktéž absencí nebo slabě definovanými papilárními liniemi. Věk je důležitým faktorem vzhledem ke kvalitě otisku prstu, starší lidé mají horší otisky oproti mladším lidem. Lidé pracující ve stavebnictví, zemědělství a v chemickém průmyslu se vyznačují poškozenými detaily v otisku prstu.

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje kvalitu výsledného obrazu, je tlak prstu na snímací zařízení. Pokud je tlak prstu malý, může vznikat světelný kontrast

podobně jako u suchého otisku. Na druhé straně při velkém tlaku mohou vznikat snímky rozmazané. Při snímání je cílem záznam obrazu s nejvyšší kvalitou, pokud je kvalita příliš nízká je snímek vyřazen a je realizován záznam dalšího vzorku. [8]

4.1 Segmentace

Před extrakcí vlastností otisku prstu je důležité oddělit oblast otisku prstu od pozadí, cílem je odstranění zbytečné informace z obrazu. Tím se vymezuje oblast, která má být zpracována a zkracuje se doba zpracování. Taktéž se zabrání falešné extrakci vlastností. Správná segmentace může být někdy hodně obtížná, zejména v případě nízké kvality obrazů nebo obrazů zatížených šumem. Popředí pak odpovídá území s hřebeny a údolími a pozadí neobsahuje žádné potřebné informace.

Segmentaci je možné realizovat prahováním. V obrazu otisku má popředí vysokou šedotónovou varianci, pozadí naopak velmi nízkou. Obraz je rozdělen na bloky. Je stanoven práh, který se porovnává s variancí každého bloku, podle výsledku se obraz rozdělí na popředí nebo pozadí jako je znázorněno na obrázku 16. [8], [10]

Varianci vypočítáme podle rovnice:

$$V(k) = \frac{1}{W^2} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{W-1} (I(i, j) - M(k))^2 \quad (4.1)$$

kde $V(k)$ je variance bloku k , $I(i, j)$ je intenzita pixelu (i, j) , W velikost bloků ($W \times W$) a $M(k)$ je střední hodnota intenzity pixelů v bloku k .



Obrázek 16: a) originální obraz

b) obraz po segmentaci [8]

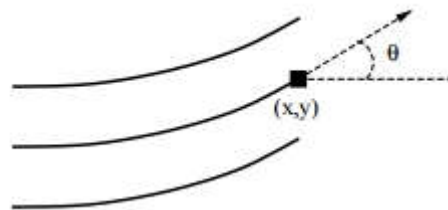
4.2 Normalizace

Dalším krokem k vylepšení kvality otisku prstu je proces normalizace obrazu. Normalizací se rozumí úprava stupňů šedi v určitém rozsahu, tak aby výsledný obraz dosahoval zvýšeného kontrastu. Prvotním úkonem v procesu normalizace je rozdělení segmentovaného obrazu do bloků o rozměrech $W \times W$. Dále je porovnávána hodnota stupně šedi každého pixelu se střední hodnotou stupně šedi daného bloku. Pro pixel $I(i, j)$, který náleží do bloku se střední hodnotou stupně šedi M a variací V , je výsledkem porovnání normalizovaná šedotónová hodnota pixelu $N(i, j)$ definovaná vztahem:

$$N(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{V_0(I(i, j) - M)^2}{V}} & \text{jestliže } I(i, j) > M, \\ M_0 - \sqrt{\frac{V_0(I(i, j) - M)^2}{V}} & \text{jinak,} \end{cases} \quad (4.2)$$

kde M_0 je požadovaná střední hodnota a V_0 je požadovaná střední hodnota a variace z $I(i, j)$. Normalizace nemění strukturu hran v otisku. Její účel je standardizovat úroveň stupně šedi obrazu tak, aby mohl být použit v dalších procesech. [10]

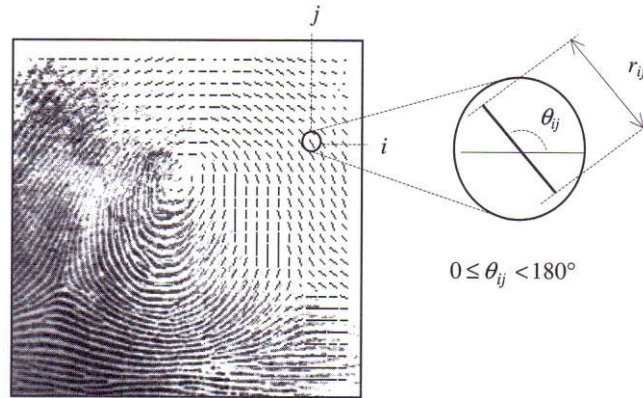
4.3 Lokální orientace papilárních linií



Obrázek 17: Tečna papilární linie a úhel, který svírá. [10].

Lokální orientace papilárních linií, dále jen LOPL, je úhel θ_{xy} , který svírá tečna papilární linie v bodě $[x, y]$ s vodorovnou linií. Protože hrany v otisku nemají svůj směr určen, úhel θ_{xy} nabývá hodnot 0° až 180° . Směrový obraz otisku prstu se skládá z matice D , jejíž prvky jsou jednotlivé lokální orientace papilárních linií. Obraz otisku je tedy rozdělen na čtvercovou síť, kde každý element sítě θ_{ij} odpovídá souřadnicím prvku v matici $[i, j]$. Jednotlivý prvek matice je potom průměrná velikost úhlu hran, které se v dané síti nacházejí. Hodnota θ_{ij} také bývá často spojována s hodnotou r_{ij} , která vyjadřuje spolehlivost dané orientace. Hodnota r_{ij} je malá pro oblasti s vysokým šumem

a velká pro obrazy s dobrou kvalitou obrazu. [6]



Obrázek 18: Obrázek otisku s vyznačeným směrovým polem. [6].

Nejjednodušší přístup k získání LOPL je založen na výpočtu gradientů v obrazu otisku prstu. Gradient $\nabla(x_i, y_j)$ v bodě $[x_i, y_j]$ obrazu $\mathbf{I}$ je dvourozměrný vektor $[\nabla_x(x_i, y_j), \nabla_y(x_i, y_j)]$, kde složky ∇_x a ∇_y jsou derivace z $\mathbf{I}$ v $[x_i, y_j]$ podle směru x a y . Toto vektorové pole potom vyjadřuje, ve kterém směru je růst intenzity pixelů největší (změna ve stupních šedi). Proto potom směr lokální orientace hrany θ_{ij} je kolmý ke gradientu úhlu v bodě $[x_i, y_i]$ a prochází stejným bodem.

Nejprve se pro výpočet obrazů gradientů ∇_x a ∇_y použije Prewittova nebo Sobelova maska. Dále jsou jednotlivé gradienty použity pro výpočet dominantního úhlu θ_{ij} v oblastech, které jsou charakterizované svou velikostí $m \times n$ pixelů. [6]

$$h = \frac{m-1}{2}, k = \frac{n-1}{2} \quad (4.3)$$

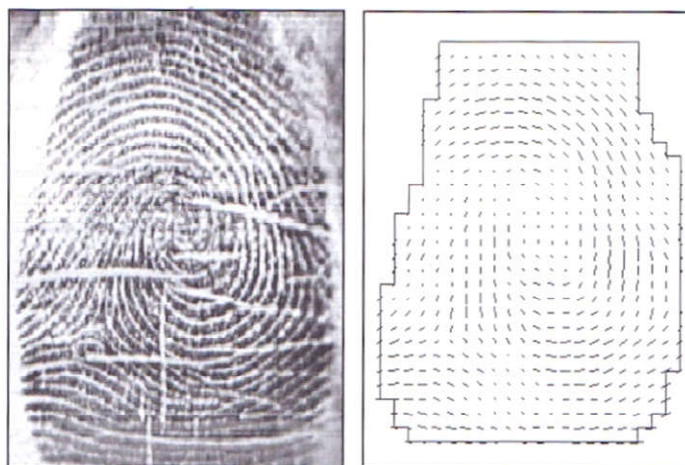
$$G_{xx} = \sum_{o=-h}^h \sum_{p=-k}^k \nabla_x(x_i + o, y_j + p)^2 \quad (4.4)$$

$$G_{yy} = \sum_{o=-h}^h \sum_{p=-k}^k \nabla_y(x_i + o, y_j + p)^2 \quad (4.5)$$

$$G_{xy} = \sum_{o=-h}^h \sum_{p=-k}^k \nabla_x(x_i + o, y_j + p) * \nabla_y(x_i + o, y_j + p) \quad (4.6)$$

$$\theta_{ij} = 90^\circ + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2 \cdot G_{xy}}{G_{xx} - G_{yy}}\right) \quad (4.7)$$

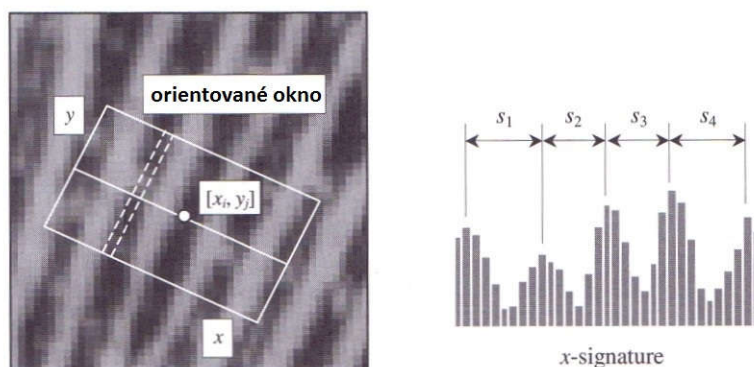
Použitím výše uvedených rovnic získáme směrový obraz, který znázorňuje orientaci papilárních linií.



Obrázek 19: Směrový obraz papilárních linií [6]

4.4 Lokální frekvence papilárních linií

Lokální frekvence hran f_{xy} v bodě $[x,y]$ je vyjádření četnosti hran v určitém segmentu, o dané velikosti, který je kolmý na směr hrany θ_{xy} a je orientován ve středu bodu $[x,y]$. Lokální frekvence se liší u různých prstů a může se taky významně lišit na různých místech stejného otisku prstu. Lokální frekvenci je možné spočítat pomocí průměrného počtu pixelů mezi dvěma po sobě jdoucími vrcholy hran, které jsou zaznamenány ve stupních šedi. Pro tento účel je snímek otisku rozdělen do jednotlivých segmentů (orientované okno) o velikosti x a y , který je vystředěn v bodě $[x_i, y_i]$ a orientován stranou y ve směru papilárních linií. Na straně segmentu ve směru x jsou potom rozlišeny jednotlivé vrcholy hran a zjištěn počet pixelů mezi nimi (viz obrázek 20). [6]



Obrázek 20: Orientované okno a znázornění vzdáleností jednotlivých hran. [6]

Frekvence f_{ij} je potom zjištěna jako převrácená hodnota k průměrné vzdálenosti

mezi dvěma sousedícími vrcholy hrany otisku prstu:

$$f_{ij} = \frac{4}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \quad (4.8)$$

Metoda je rychlá a jednoduchá. Není ovšem příliš vhodná v obrazech, které jsou příliš zatíženy lokálním šumem, kdy jednotlivé vrcholky hran nejsou příliš čitelné. V těchto případech je doporučeno provést interpolaci a nízko úroňovou filtraci obrazu, pro zvýraznění detailů. [6]

4.5 Gaborova filtrace

Jedná se o pásmovou filtraci, která se používá pro odstranění šumu v otisku prstu při zachování zobrazení hran a údolí. Při použití dochází k selekci na základě lokální orientace a frekvence hran. Symetrický 2D Gaborův filtr má tvar:

$$g(x, y; \theta, f) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \cdot \cos(2\pi f \cdot x_\theta) \quad (4.9)$$

kde θ je orientace filtru, f je frekvence sinusové vlny, σ_x a σ_y jsou standardní odchylky Gaussovy roviny podél os x a y a x_θ a y_θ jsou souřadnice bodů $[x, y]$ po rotaci kartézských os obrazu po směru hodinových ručiček o úhel $(90^\circ - \theta)$:

$$\begin{bmatrix} x_\theta \\ y_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - \theta) & \sin(90^\circ - \theta) \\ -\sin(90^\circ - \theta) & \cos(90^\circ - \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ -\cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4.10)$$



Obrázek 21: Grafické vyobrazení Gaborova filtru, definován parametry $\theta=135^\circ$, $f=1/5$, $\sigma_x=\sigma_y=3$ [6]

Pro aplikaci filtru jsou tedy nezbytné čtyři parametry ($\theta, f, \sigma_x, \sigma_y$). Směr filtru a frekvence je určena lokální frekvencí a orientací papilárních linií. Velikost hodnot σ_x a σ_y je ovšem založena na určitém kompromisu. Čím větší jsou hodnoty, tím je filtr více

robustní proti šumu v otisku, ale nastává větší riziko vzniku falešných papilárních linií. V případě malých hodnot je riziko detekce falešných papilárních linií menší, ale klesá i účinnost odstranění šumu v obraze. [6], [15]

Aplikace Gaborova filtru (G) je na obraz otisku pomocí 2D konvoluce a získáme vylepšený obraz $E(i,j)$:

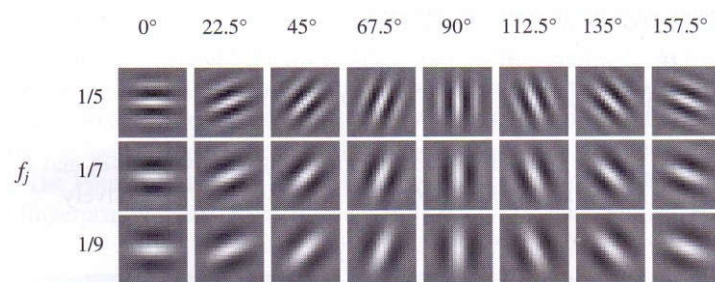
$$E(i,j) = \sum_{u=-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} \sum_{v=-\frac{W_y}{2}}^{\frac{W_y}{2}} G(u,v; O(i,j), F(i,j)) \cdot N(i-u, j-v) \quad (4.11)$$

kde N je normalizovaný obraz, $O(i,j)$ je hodnota orientace a $F(i,j)$ je frekvence pro daný pixel, w_x a w_y je šířka a výška masky Gaborova filtru. [15]



Obrázek 22: Snímek otisku po úpravě Gaborovým filtrem. [6]

Pro zefektivnění procesu vylepšování lze namísto výpočtu filtru pro každý pixel použít tzv. banku filtrů. Tato banka obsahuje sadu filtrů $\{g_{ij}(i,j) | i=1 \dots n_\theta, j=1 \dots n_f\}$, které jsou předem vytvořeny a uloženy. Filtry jsou předdefinovány počtem n_θ diskretních orientací $\{\theta_i | i=1 \dots n_\theta\}$ a počtem n_f diskretních frekvencí $\{f_j | j=1 \dots n_f\}$. Poté je každý pixel obrazu konvulován s filtrem $g_{ij}(x,y)$, který má diskretní orientaci θ_i nejbližší k lokální orientaci θ_{xy} a diskretní frekvenci f_j co nejbližší k lokální frekvenci f_{xy} .



Obrázek 23: Vyobrazení banky Gaborových filtrů pro $n_\theta=8$ a $n_f=3$. [6]

5 PŘEHLED SOUČASNÝCH METOD

Problém identifikace otisků prstu je ve velké míře studován a byly navrženy mnohé algoritmy. Úkolem je zjistit, zda dva otisky pocházejí ze stejného prstu. Algoritmy vypočítávají stupeň podobnosti, využitím charakteristických rysů obou otisků prstu a vracejí skóre podobnosti, které reprezentuje pravděpodobnost, že dva otisky jsou ze stejného prstu. Systém pro rozpoznání otisků rozhodne, zda je otisk odpovídající nebo neodpovídající. Automatické rozpoznání je náročný problém vzhledem k velkému počtu faktorů. [8]

Mezi tyto faktory řadíme [6]:

- Posunutí – není možno docílit, aby se prst při každém snímání pokládal na čtečku v naprosto stejné poloze. Snímaný prst je tedy vždy v jiné poloze než předloha (šablona). Například umístění prstu s rozdílem dvou milimetrů má za následek digitální posunutí o 40 pixelů v obraze o rozlišení 500dpi.
- Rotace – to samé platí, když umístíme prst vždy pod jiným úhlem k povrchu senzoru. V praxi se akceptovaná hranice pochybuje v rozmezí $\pm 20^\circ$ od vertikální osy snímače.
- Částečný přesah – posunutí prstu, včetně rotace, často způsobí, že část otisku prstu se ocitne mimo čtecí prostor senzoru. To má za následek, že se šablona nemusí shodovat s vloženým otiskem. Tento problém je hlavně u senzorů s malou snímací plochou.
- Nelineární zkreslení – při snímání se převádí trojrozměrný tvar prstu na dvourozměrnou čtecí plochu senzoru. Je nutné počítat s elastickými vlastnostmi prstu při snímání, kdy může dojít ke zkreslení tvaru právě při převodu do 2D obrazu. Například ke zkreslení dochází, když máme přitisknutý prst na senzoru a mírně s ním pohneme – díky elasticitě pokožky prst zůstane na místě, ale dojde k deformaci pokožky a tím i zkreslení papilárních linií.
- Stav pokožky – Hrany otisku prstu budu přesně zaznamenány, právě pokud budou v rovnoměrném kontaktu se čtecí plochou senzoru. Nicméně v reálném případě je dotyk ovlivněn faktory jako tlak prstu, suchost pokožky, kožní poruchy, pot, nečistoty a vzdušná vlhkost. To má za následek, že hrany otisku nejsou vždy v ideálním rovnoměrném kontaktu a navíc jsou zaneseny šumem.

- Šum – obrazové znečištění nasnímaného otisku. Vyskytuje se především na straně senzoru (například znečištění čtecí plochy po předchozím snímání), ale i na prstu samotném ve formě různých nečistot.

Podle přístupu k řešení otázky rozpoznávání rozlišujeme tři základní kategorie [6]:

- Metoda založená na markantech
 - jedná se o nejvíce používanou metodu. Markanty jsou extrahovány z dvou otisků prstů a jsou uloženy v množině vektorů ve 2D prostoru. Metoda potom spočívá v hledání stejného zarovnání jednotlivých markantů mezi šablonou a nasnímaným prstem.
- Metoda založená na korelaci
 - podobnost je určena dle korelace (vzájemného vztahu) překrývajících se pixelů dvou obrazů stejného otisku prstu. Hodnota korelace se počítá pro různé zarovnání nasnímaného obrazu (posunutí a rotace, tak aby se nejvíce shodoval se šablonou). Tato metoda není příliš přesná.
- Metoda založená na vlastnostech papilárních linií
 - extrakce markantů je složitá v obrazech, které disponují nízkou kvalitou obrazu, nicméně i při této nízké kvalitě je možné z těchto obrázků lépe extrahovat charakteristické vlastnosti otisků prstu (hrany, lokální orientace a frekvence, tvar hran, informace o textuře atd.).

Kromě těchto základních kategorií existují ještě další přístupy identifikace otisku prstu. V článku [17] autor postupoval tak, že jsou otisky nasnímány a uloženy do databáze. Obrazy jsou zpracovány zvýrazněním stupňů šedi, filtrací, ostřením, detekcí hran, segmentací a následným ztenčením papilárních linií. Poté co byl obraz předzpracován, se přivádí do neuronové sítě, kde slouží pro její natrénování. Po natrénování je neuronová síť připravena k provedení identifikace a rozpoznání otisků prstů. Autor použil neuronovou síť typu *Backpropagation*, hlavně díky její schopnosti učit se multidimenzionálnímu mapování. Podle [18] je použita pro identifikaci také neuronová síť avšak typu *Hopfield*.

Dalším přístupem k řešení je využití vlnkové transformace na extrakci příznaků. Metoda je méně výpočetně náročná než většina ostatních metod ale na druhé straně, má omezenou schopnost sledovat změny v poloze, měřítko a úhel natočení. [19].

5.1 Metoda založená na korelaci

Nechť jsou T a I obrazy otisku prstů odpovídající šabloně a nasnímanému otisku. Potom intuitivní míra jejich rozmanitosti je rovna součtu druhých mocnin rozdílů mezi intenzitami odpovídajících si pixelů (SSD):

$$SSD(T, I) = \|T - I\|^2 = (T - I)^T (T - I) = \|T\|^2 + \|I\|^2 - 2T^T I \quad (5.1)$$

kde horní index „ T “ označuje transpozici vektoru, T a I jsou obrazy otisku. Rozmanitost dvou obrazů je minimalizována (obrazy jsou si podobné), pokud je jejich vzájemná korelace (CC) maximalizována:

$$CC(T, I) = T^T I \quad (5.2)$$

Vzájemná korelace (nebo jednodušeji korelace) je tedy měřítko podobnosti obrazu. V závislosti na poloze nasnímaného otisku (poloha a rotace obrazu oproti uložené šabloně) nelze jeho podobnost počítat pouze superpozicí T a I a použitím vzorce (5.2). Proto je nutné obraz posunout a otáčet tak, aby bylo dosaženo maximální hodnoty korelace. Nechť $I^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}$ představuje obraz I otočený o úhel θ (nejčastěji okolo jeho středu), posunutý o vzdálenost Δx , respektive Δy , ve směru osy X , respektive osy Y . Potom můžeme podobnost dvou otisků prstů vyjádřit jako:

$$S(T, I) = \max_{\Delta x, \Delta y, \theta} CC(T, I^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}) \quad (5.3)$$

Přímé použití tohoto vyjádření vede ovšem k přesným výsledkům velmi zřídka, hlavně z těchto příčin:

- Nelineární zkreslení může způsobit velmi odlišný tvar stejného prstu ve smyslu celkové struktury – tedy pokud neuvažujeme pouze lokální místa na otisku, ale otisk jako celkový obraz
- Stav pokožky a velikost přtlaku prstu na čtečku může způsobit velmi rozdílné obrazy stejného prstu, zejména v jeho kontrastu, jasu a tloušťce papilárních linií
- Přímé použití výše uvedeného vyjádření je výpočetně velmi náročné. Například uvažujme dva obrazy o rozměrech 400x400px, potom je pro výpočet vzájemné korelace jedné hodnoty transpozice $(\Delta x, \Delta y, \theta)$ zapotřebí

16,000 násobků a 16,000 součtů. Pro posun Δx , Δy s krokem jeden pixel v rozmezí od [-200,200] a rotaci θ s krokem 1° v rozmezí $[-30^\circ, 30^\circ]$, by bylo zapotřebí spočítat $401 \times 401 \times 61$ vzájemných korelací, což celkově představuje 1569 miliard výpočetních operací. [6]

5.2 Metoda založená na markantech

Necht' T , respektive I , představuje obraz šablony, respektive nasnímaného otisku prstu. Daný markant je potom vyjádřen jako vektor, který je v 2D prostoru daného obrazu popsán místem počátku (x ; y), orientací (úhel θ) a jeho typem. Daný markant je tedy zapsán ve tvaru $m = \{x, y, \theta\}$. Potom pro celý soubor markantů obrazu T a I použijeme vektorový zápis:

$$T = \{\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \dots, \mathbf{m}_m\}, \quad \mathbf{m}_i = \{x_i, y_i, \theta_i\}, \quad i = 1 \dots m$$

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

kde m a n představuje počet markantů v obraze T a obraze I .

Markant $\mathbf{m}'_j$ obrazu I a markant $\mathbf{m}_i$ bude považován za shodný, právě když prostorová vzdálenost (sd) mezi nimi bude menší než daná tolerance r_0 , a úhlový rozdíl (dd) jejich vektorů bude menší než úhlová tolerance θ_0 :

$$sd(\mathbf{m}'_j, \mathbf{m}_i) = \sqrt{(x'_j - x_i)^2 + (y'_j - y_i)^2} \leq r_0, \quad (5.4)$$

$$dd(\mathbf{m}'_j, \mathbf{m}_i) = \min(|\theta'_j - \theta_i|, 360^\circ - |\theta'_j - \theta_i|) \leq \theta_0 \quad (5.5)$$

V případě úhlového rozdílu je nutné vždy počítat s menším úhlem, který dané vektory svírají. Například vektory s jednotlivými úhly $\theta'_j = 340^\circ$ a $\theta_i = 20^\circ$ svírají úhel 40° , nikoliv 320° .

Použití tolerančních polí (r_0 a θ_0) je nutné zejména pro kompenzaci nevyhnutelných chyb, které vznikají při extrakci charakteristických rysů otisku prstu (např. v důsledku elastické deformace prstu, která způsobuje změnu polohy zkoumaných markantů). Zarovnání dvou otisků je tedy povinný krok k maximalizaci počtu shodných markantů. Přesné zarovnání vyžaduje, kromě ostatních geometrických transformací, alespoň vždy translaci (posun v ose X a Y) a rotaci (o úhel θ). Uvažujme funkci $tf(.)$, která převede

vektorové pole m'_j (z obrazu I) do vektorového pole m''_j dle daných geometrických transformací; v našem případě budeme uvažovat posun $[\Delta x, \Delta y]$ a rotaci proti směru hodinových ručiček $[\theta]$ kolem počátku (jako počátek se většinou uvažuje střed markantu):

$$tf_{\Delta x, \Delta y, \theta}(m'_j = \{x'_j, y'_j, \theta'_j\}) = \{x''_j, y''_j, \theta'_j + \theta\} \quad (5.6)$$

Dále zavedeme funkci $mm(\cdot)$, která bude vracet hodnotu 1, v případě, že markanty m''_j a m_i jsou shodné, v opačném případě bude vracet hodnotu 0:

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

Potom můžeme problém shody vyjádřit jako:

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

Kde $P(i)$ vyjadřuje neznámou funkci, která určuje párování mezi markanty v obrazech **I** a **T**. Řešení problému shody je jednoduché v případě, že známe správnou hodnotu transformace $(\Delta x, \Delta y, \theta)$, tak potom můžeme určit i párování (funkce P). V praxi ovšem danými informacemi předem nedisponujeme a nemůžeme ani tedy určit správné uspořádání včetně párování, a tudíž je řešení daného problému velmi problematické. Pro zjednodušení se potom používá podobných principů jako u PPM (point pattern matching), s přístupy jako relaxace, prořezávání stromů, energetické minimum, apod. [6]

5.3 Metoda založená na vlastnostech papírárních linií

Existují tři hlavní důvody, které nutí vývojáře rozpoznávacích technik otisku prstu, hledat jiné distingovanější metody než je metoda založená na markantech:

- Schopnost extrahovat markanty z málokvalitních obrazů otisku prstu je ve většině případů velmi obtížná. Přestože markanty v sobě obsahují nejvíce diskriminovaných informací o otisku, tak ne vždy přinášejí nejlepší poměr mezi přesností a spolehlivostí.
- Extrakce markantů je časově náročný proces. Na to bylo nutné brát ohled v minulosti, když byl více limitovaný výpočetní výkon stolních počítačů.

Přestože v dnešní době jsou počítače mnohem rychlejší, je nutné i tak myslet na optimalizaci procesu, ve kterém je otisk porovnán a vyhodnocen, jelikož se tyto algoritmy implementují do levných, samostatných systémů (systém, u kterého se výpočetní výkon používá pouze na proces snímání a vyhodnocení otisku prstu).

- Při spojení metody založené na markantech s dalšími vlastnostmi otisku se může vylepšit vyhodnocovací proces, jak po stránce přesnosti tak i spolehlivosti.

Mezi další používané charakteristické vlastnosti otisku patří:

1. velikost otisku a jeho tvar vnějšího obrysu
2. počet, typ a umístění singulárních bodů
3. prostorové vztahy a geometrické vlastnosti hran papilárních linií (Xiao a Bian, 1986; Kaymaz a Mitra, (1992)
4. vlastnosti tvaru (Takeda, 1990; Ceguarra a Koprinska, 2002)
5. lokální a globální vlastnosti struktury
6. potní póry (Stosz a Alyea, 1994)
7. fraktální díly (Polikarpova, 1996)

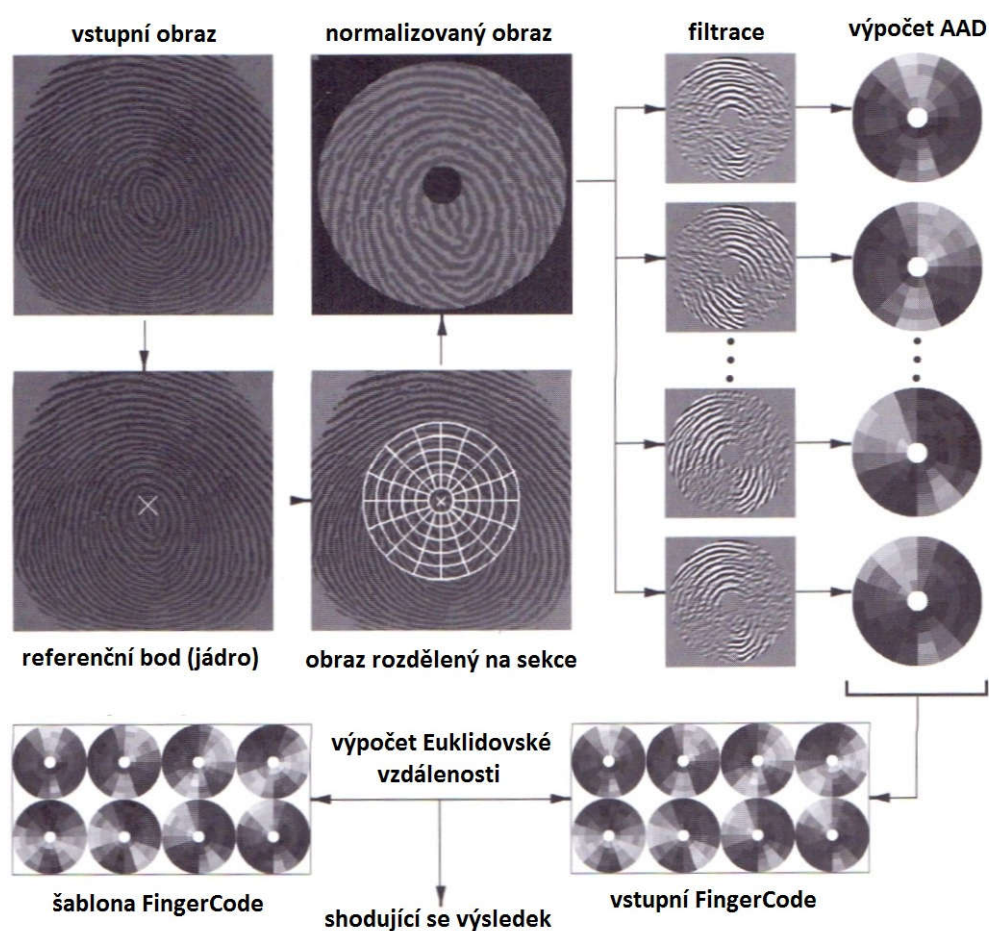
Použití vlastností 1) a 2) je obecně velmi nestabilní a vždy závisí na konkrétním prstu, který se dotýká senzoru. Potní póry představují velmi přesnou metodu, ovšem jejich detekce vyžaduje použití drahých skenerů s vysokým rozlišením.

Experimentováním bylo zjištěno, že dobré výsledky podávalo rozdělení oblasti zájmu na 80 buněk (5 pásem a 16 výsečí) a následné použití banky osmi Gaborových filtrů (osm směrů). Proto je každý otisk prstu reprezentován $80 \times 8 = 640$ – ti vektory s pevně danou velikostí, nazývajících se FingerCode. Obecný prvek V_{ij} vektoru ($i = 1..8$ počet buněk, $j = 1..8$ počet filtrů) označuje energii odhalenou filtrem j v buňce i a je vypočítán jako průměrná absolutní odchylka od střední hodnoty odezvy filtru j na všechny pixely buňky i :

$$V_{ij} = \frac{1}{n_i} \left(\sum_{C_i} |g(x, y: \theta_j, 1/10) - \bar{g}_i| \right) \quad (5.7)$$

kde C_i je i – tá buňka mozaiky, n_i označuje počet pixelů v buňce C_i , Gaborův filtr vyjadřuje $g(.)$ a $\bar{g}_i$ je střední hodnota g pro všechny pixely v buňce C_i . Srovnání dvou

otisků je potom realizováno jako výpočet euklidovské vzdálenosti mezi dvěma FingerCode.



Obrázek 24: Diagram metody FingerCode. Přepřacováno z [6]

6 VEŘEJNĚ DOSTUPNÉ DATABÁZE OTISKU PRSTU

Přestože přesnost biometrických systémů založených na otiscích prstu může být velmi vysoká, tak žádný algoritmus rozpoznávající otisk prstu není dokonalý. Výkonové vyhodnocení je důležité pro všechny biometrické systémy, zvláště pro rozpoznání otisku prstu, kterému se dostává široké mezinárodní pozornosti pro identifikaci a verifikaci občanů. [12]

Ve zkoumání výkonnosti a schopnosti systému pro rozpoznání otisku prstu se konají mnohé soutěže a konference. Jedna z největších mezinárodních soutěží byla Fingerprint Verification Competition (FVC) a Fingerprint Vendor Technology Evaluation (FpVTE). První FVC soutěž se konala v roce 2000, za účasti týmů z laboratoří Univerzity v Boloni, Univerzity v San Jose a Univerzity v Michiganu. Cílem bylo ustanovit standardizovaný vyhodnocovací proces (bench mark) pro porovnávání algoritmů rozpoznávání prstů. Toto umožňovalo jednotlivcům jak z průmyslové tak akademické sféry poměřit a vylepšit výkon svých algoritmů. FVC2000 se dostalo významné pozornosti jak z řad akademiků, tak z řad komerčních organizací, tak že v následujících letech byly uskutečněny další ročníky této soutěže – FVC 2002, FVC 2004, FVC 2006. Zájem o vyhodnocení výkonnosti algoritmů včetně počtu účastníků a hodnocených algoritmů je uveden v tabulce. [12]

Tabulka 1: Přehled Fingerprint Verification Competition FVC. [12]

	hodnotící období	registrovaní účastníci	vyhodnocené algoritmy
FVC 2000	Červenec – Srpen 2000	25 (15 odstoupilo)	11
FVC 2002	Duben – Červenec 2002	48 (19 odstoupilo)	31
FVC 2004	Leden – Únor 2004	110 (64 odstoupilo)	open kategorie 41 light kategorie 26
FVC 2006	Listopad – Prosinec 2006	150 (97 odstoupilo)	open kategorie 44 light kategorie 26

Od roku 2004 probíhaly dvě rozdílné pod - soutěže (open kategorie a light kategorie), které používaly stejné databáze otisků. Každý účastník mohl přispět právě

jedním algoritmem do každé kategorie. Light kategorie byla určena pro algoritmy nenáročné na výpočetní výkon, limitované velikostí paměti a malou velikostí šablony.

V současné době tyto soutěže nahradil projekt FVC – onGoing. Tento projekt je online automatizovaný vyhodnocovací systém založený na webové platformě. Testy jsou prováděny na sadě různých databází a výsledky jsou vyhodnoceny online pomocí známých ukazatelů výkonnosti. V rámci tohoto projektu ovšem nejsou volně dostupné databáze otisků prstů, které se používají pro vyhodnocování algoritmů. [13]

Poslední volně dostupné databáze pocházejí ze soutěže FVC z ročníku 2004. V této soutěži byly použity čtyři rozdílné databáze, které byly shromážděny pomocí různých senzorů/technik (2 optické senzory, 1 teplotní senzor a synteticky vygenerované otisky).

Snímání dat do databází probíhalo následujícím způsobem:

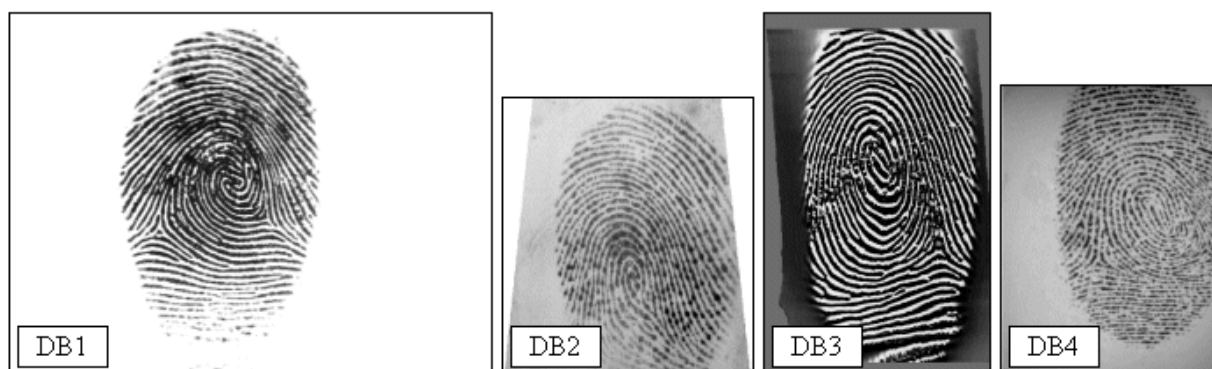
- Dobrovolníci (průměr 24 let, studenti) byli náhodně rozděleni do třech skupin po cca 30 - ti lidech. Každé skupině byla přiřazena právě jedna databáze a tedy daná snímací metoda.
- Každý dobrovolník poskytl otisky ukazováčku a prostředníčku na obou rukách ve třech sezeních, které od sebe byly odděleny minimálně dvěma týdny.
- Na každém sezení byly získány uvedené čtyři otisky prstů při čtyřech různých stavech.
- První sezení - různá poloha prstu na snímači (ve vertikálním směru, stav 1 a 2) a různý tlak na povrch snímače (stav 3 a 4). Druhé sezení - zkřivení prstu na snímači (stav 1 a 2) a různá poloha prstu na snímači (rotace, stav 3 a 4). Třetí sezení – snímání při suchých prstech (stav 1 a 2) a při zvlhčených prstech (stav 3 a 4).

Celkem tedy bylo pro každou databázi shromážděno informací ze 120 prstů, od každého prstu bylo získáno 12 stavů otisku prstu (1440 otisků). Pro soutěž se použila databáze o 110 prstech po 8 stavech (880 otisků). Tato byla následně rozdělena na sadu A (prsty 1-100 – použity pro hodnocení algoritmů účastníků) a sadu B (prsty 101-110 – poskytnuty účastníkům pro naladění jejich algoritmů před vlastním hodnocením). Synteticky vygenerované otisky byly získány pomocí sofistikovaných softwarových nástrojů. Následující tabulka znázorňuje informace o získaných datech:

Tabulka 2: Přehled databází. [14]

Dat.	Druh senzoru	Velikost obrazu	Sada A (prst x otisk)	Sada B (prst x otisk)	Rozlišení
DB1	Optický senzor ("V300" od CrossMatch)	640x480 (307 Kpixels)	100 x 8	10 x 8	500 dpi
DB2	Optický senzor ("U.are.U 4000" od Digital Persona)	328x364 (119 Kpixels)	100 x 8	10 x 8	500 dpi
DB3	Tepelný senzor ("FingerChip FCD4B14CB" od Atmel)	300x480 (144 Kpixels)	100 x 8	10 x 8	512 dpi
DB4	Syntetický gener. (SFinGe v3.0)	288x384 (108 Kpixels)	100 x 8	10 x 8	cca 500 dpi

Následující obrázky ukazují vzorky z každé databáze:



Obrázek 25: Vzorové otisky z databází DB1-DB4. [14]

Výsledky ze soutěže FVC2004 jsou následující:

Algorithm	Avg EER	Avg FMR 100	Avg FMR 1000	Avg Zero FMR	Avg REJ _{ENROLL}	Avg REJ _{MATCH}	Avg Enroll Time	Avg Match Time
P101	2.07%	2.54%	4.70%	6.21%	0.00%	0.00%	0.08 sec	1.48 sec
P047	2.10%	2.96%	4.61%	6.59%	0.00%	0.00%	2.07 sec	2.07 sec
P071	2.30%	2.73%	5.10%	10.01%	0.00%	0.01%	0.35 sec	0.67 sec
P004	2.45%	3.27%	5.63%	7.34%	0.00%	0.00%	0.69 sec	0.71 sec
P039	2.90%	4.57%	7.44%	32.13%	0.00%	0.00%	1.01 sec	1.19 sec
P097	3.13%	4.49%	7.30%	11.85%	0.04%	0.02%	0.47 sec	0.51 sec
P049	3.24%	5.56%	9.25%	12.62%	0.00%	0.00%	0.34 sec	0.38 sec
P009	3.31%	4.93%	8.32%	11.63%	0.00%	0.00%	0.25 sec	0.24 sec
P113	3.71%	6.07%	8.76%	11.29%	0.00%	0.00%	0.45 sec	0.48 sec
P068	4.03%	6.87%	11.08%	15.68%	0.00%	0.00%	0.43 sec	0.47 sec
P108	4.04%	6.22%	9.62%	11.25%	0.00%	0.01%	0.31 sec	0.32 sec
P016	4.27%	6.23%	9.16%	11.32%	0.00%	0.00%	0.15 sec	0.34 sec
P103	4.33%	6.66%	9.97%	13.64%	0.00%	0.00%	0.13 sec	0.14 sec
P048	4.41%	7.38%	11.71%	17.58%	0.00%	0.00%	0.40 sec	0.39 sec
P075	4.79%	47.85%	61.47%	72.60%	0.00%	0.00%	0.31 sec	0.43 sec
P041	4.89%	7.72%	10.87%	12.31%	0.00%	0.00%	0.14 sec	0.17 sec
P111	5.66%	10.59%	21.31%	40.62%	0.00%	0.00%	0.42 sec	0.43 sec
P052	6.12%	9.46%	13.75%	18.72%	0.18%	0.76%	0.25 sec	0.24 sec
P050	6.23%	10.45%	15.71%	18.69%	0.00%	0.00%	0.59 sec	0.61 sec
P027	6.42%	12.71%	21.16%	42.81%	0.00%	0.01%	0.87 sec	2.63 sec
P120	6.56%	11.54%	17.81%	23.65%	0.00%	0.05%	1.16 sec	1.30 sec
P083	6.80%	13.01%	16.73%	20.33%	0.00%	67.59%	0.40 sec	0.42 sec
P067	7.17%	12.84%	18.45%	31.33%	0.04%	0.07%	0.05 sec	0.05 sec
P026	7.27%	12.32%	19.65%	42.20%	0.00%	8.77%	2.52 sec	3.78 sec
P011	7.48%	10.87%	14.05%	19.61%	0.00%	0.00%	0.46 sec	0.47 sec
P072	7.64%	14.33%	24.53%	28.80%	0.04%	0.05%	0.09 sec	0.10 sec
P099	8.24%	14.46%	21.54%	25.57%	0.36%	0.86%	0.45 sec	0.45 sec
P002	8.29%	17.12%	27.19%	32.93%	0.00%	0.00%	1.29 sec	1.93 sec
P112	8.30%	17.15%	33.55%	65.40%	0.14%	0.43%	0.29 sec	0.31 sec
P105	8.38%	16.46%	24.15%	30.59%	0.04%	0.02%	0.37 sec	0.37 sec
P080	9.57%	18.91%	20.71%	25.14%	0.00%	70.56%	0.41 sec	0.41 sec
P087	9.62%	19.62%	29.33%	40.85%	0.04%	0.02%	0.25 sec	0.27 sec
P051	10.03%	25.42%	58.16%	70.77%	0.11%	0.16%	0.13 sec	0.18 sec
P118	11.37%	25.74%	39.73%	56.31%	0.00%	1.89%	2.48 sec	3.10 sec
P078	12.29%	29.66%	35.30%	39.97%	0.04%	0.02%	0.15 sec	0.15 sec
P093	12.68%	25.43%	30.28%	44.81%	0.00%	0.00%	0.07 sec	0.10 sec
P006	13.08%	29.26%	43.83%	55.33%	0.00%	0.36%	0.34 sec	0.33 sec
P104	16.84%	32.06%	35.68%	38.69%	0.00%	25.03%	3.72 sec	3.81 sec
P106	28.44%	70.95%	81.93%	84.67%	0.00%	0.99%	0.23 sec	0.31 sec

Obrázek 26: Výsledky FVC2004. [14]

Výsledky jsou převzaty ze soutěže FVC 2004. EER značí průměrný Equal Error Rate ze všech databází používaných na FVC 2004. FMR100, FMR1000, a ZeroFMR jsou míry chybné neshody, když míra chybné shody je 1/100, 1/1000 a 0. REJ_{enr} je odmítnutí při snímání (neschopnost přečíst prst) a REJ_{match} je odmítnutí během zpracování (algoritmus ho nebyl schopen zpracovat), vyjadřují v podstatě procento otisků, které algoritmy nejsou schopné vyhodnotit. Poslední dva sloupce vyjadřují průměrnou dobu potřebnou pro snímané otisku a průměrný čas, za který porovná systém otisk se šablonou. [6]

Pro diplomovou práci byly vybrány tyto databáze ze soutěže FVC 2004, aby bylo možné porovnání výsledků s již testovanými algoritmy.

Další možné volně dostupné databáze jsou:

- UPEK Fingerprint Database – tato databáze obsahuje otisky od 16 – ti jedinců a každý otisk je sejmuto 8 krát. Celkem tedy obsahuje 128 vzorků.
- Shivang Patel – disponuje větším počtem jedinců, otisky dalo celkem 21 respondentů, opět v 8 - mi variantách, celkem obsahuje 168 otisků.

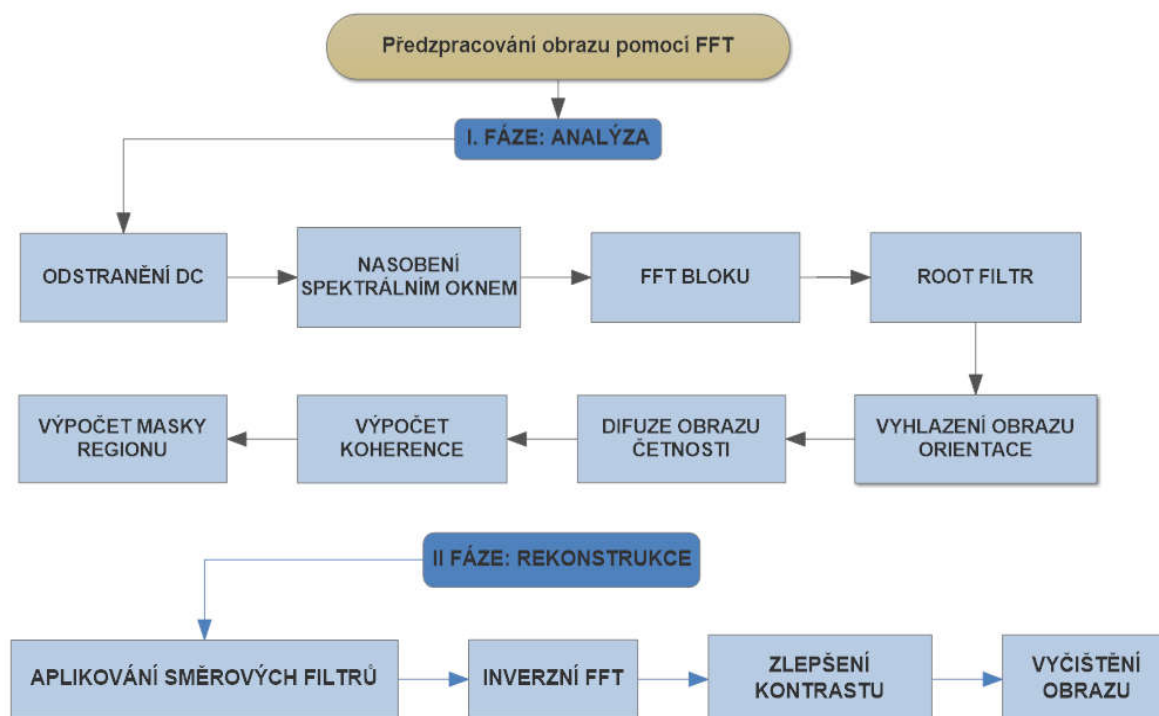
7 PRAKTICKÁ ČÁST

7.1 Popis softwaru pro identifikaci

V praktické části práce byl vytvořen software, který je schopen identifikovat a porovnávat načtené otisky prstu. Jako vstup může být použit pouze šedotónový obraz. Program obsahuje funkce umožňující načtení, předzpracování (zvýraznění) a detekci jádra otisku. Vlastnosti, které otisk charakterizují, je možné uložit do databáze společně i s názvem a jeho umístěním. Tento postup lze provést pro libovolný počet otisků a vytvořit tak plnohodnotnou databázi, která následně poslouží k identifikaci neznámého otisku. V případě, že nechceme vyhledávat v databázi, je možné použít funkci porovnání dvou načtených otisků.

7.1.1 Předzpracování obrazu

Předzpracování obrazu je uskutečněno pomocí modifikované Fast Fourierovy transformace [20]. Postup znázorňuje následující diagram.



Obrázek 27: Procesní diagram předzpracování obrazu

Algoritmus je rozdělen na dvě fáze. V každé fázi je obraz rozdělen do malých překrývajících se bloků. Pro každý tento blok je analyzováno Fourierovo spektrum a současně jsou odhadnuty i směry a frekvence hran. Analýza rovněž poskytuje energetickou mapu (energy map), která může být použita jako maska regionu (region mask) pro oddělení pozadí od otisku. Obraz orientace (orientation image) je potom použit pro výpočet koherence. Fáze rekonstrukce má na starost zpětné filtrování kontextu. Toho je docíleno aplikováním směrových filtrů a inverzní FFT. Všechna potřebná data pro tuto fázi jsou získávána během první fáze. Směrové filtry jsou předem vypočítány a uloženy v bance filtrů [21]. Tyto filtry jsou nezávislé na poloze, není je tedy potřeba pro každý otisk znovu počítat. Po dokončení všech procesů jsou bloky uspořádány zpět dohromady a po vyčištění obrazu je k dispozici zvýrazněný otisk připravený na další zpracování (obr. 28). Výhoda tohoto přístupu je, že není potřeba dalších algoritmů pro získání vnořených obrazů, tedy jako obraz orientace (orientation image), maska region (region mask), a další.



Obrázek 28: Zvýrazněný obrázek pomocí modifikované FFT

7.1.2 Detekce jádra

Po zvýraznění obrazu je potřeba lokalizovat jádro (střed) otisku. Nejdříve je nutné oddělit otisk od pozadí, z důvodu zamezení nežádoucích efektů. Toho je docíleno pomocí segmentace. Ta může být uskutečněna na základě variance bloku, protože pozadí je většinou charakterizováno nízkou variancí. K tomu použijeme binární uzavření a binární erozi. Následně jsou pomocí komplexní filtrace zjištěny hodnoty (maximální a relativní) v nepřekrývajících se blocích, které se nachází v aktuální oblasti

zájmu. Pomocí získaných hodnot a nastaveného prahu můžeme rozhodnout, zda je segmentace u konce nebo se bude celý proces opakovat (obr. 29).



Obrázek 29: Obrázek je segmentován, binárně uzavřen a erodován

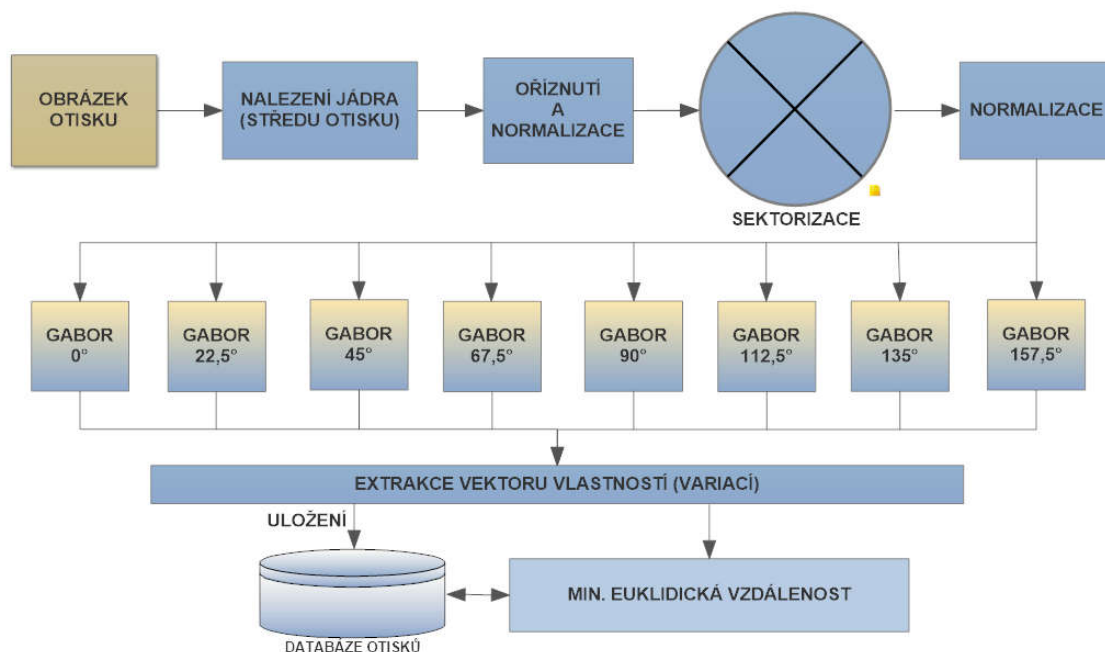
Po segmentaci je proveden odhad orientace směrového pole v oblasti zájmu [22]. Pomocí tohoto pole vytvoříme matici s logickými hodnotami 0/1, kde pixel (I, J) má hodnotu 1, právě pokud je úhel orientace pole v nastavených mezích. Po tomto výpočtu nalezneme hranici této matice (obr. 30). Hranice je omezena na oblast zájmu. Z předchozích bodů použijeme komplexně filtrovaný obraz a nalezneme jeho maxima v místech, kde je hodnota logické matice rovna 1. Toto opakujeme s různými hodnotami úhlu α . V konečné fázi dostáváme seznam bodů (souřadnic) potenciálních jader, z kterého vytvoříme podmnožiny těch, které mají souřadnice blízko sebe a obsahují více než 3 body. Z těchto podmnožin vybereme aproximaci právě tu, která dosahuje nejvyšší střední hodnoty X-souřadnic.



Obrázek 30: Jedna z nalezených hranic logické matice v oblasti zájmu a vyznačená poloha jádra

7.1.3 Extrakce vlastností a srovnání otisků

Srovnání otisků je provedeno na základě snímání textury a extrahování užitečných vlastností. Tyto vlastnosti jsou uloženy ve formě vektoru, tzv. FingerCodu (kód otisku).

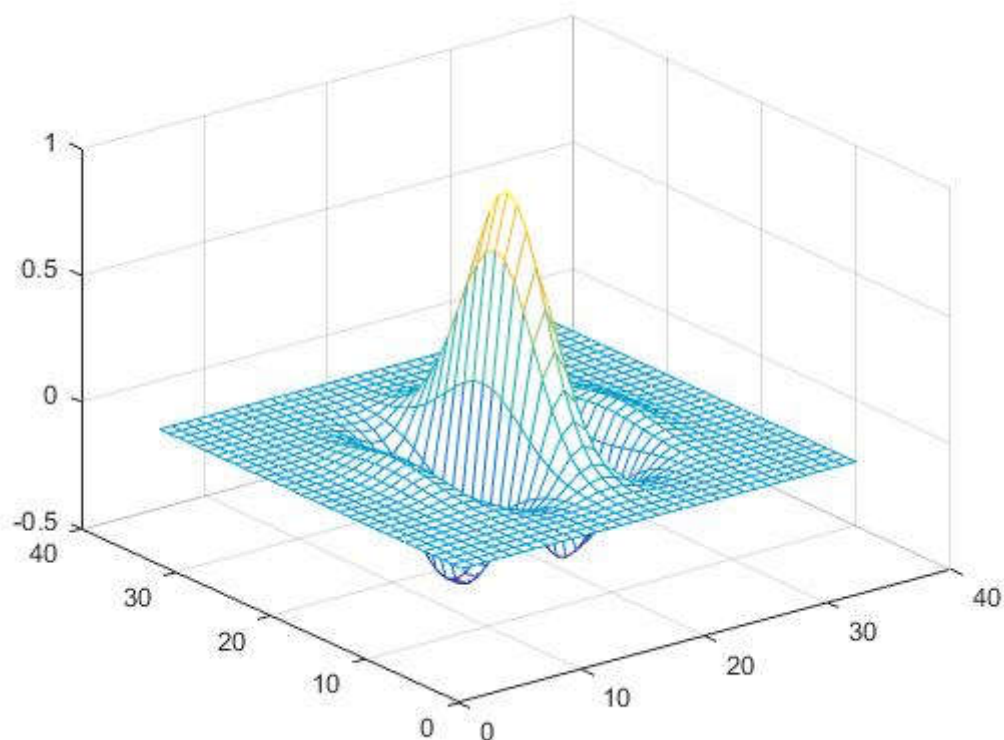


Obrázek 31: Procesní diagram pro získání FingerCode

Prvním krokem k získání tohoto kódu je úspěšná lokalizace jádra otisku. Následně je kolem jádra ořezána oblast o předem nastavené velikosti. Tato oblast je podrobena normalizaci, aby došlo k upravení hodnot intenzit pixelů. Kontrast a světlost by se měla blížit stejné hodnotě v celém rozsahu oříznuté oblasti. Otisk je dále rozdělen na 4 soustředné kružnice, kde se každá skládá z 16 segmentů. Každá kružnice má šířku 20px a střední kružnice má poloměr 12px. Celkový průměr kružnice je tedy 184px a celkový počet segmentů je 60. Střední část se zanedbává, jelikož její velikost je relativně malá vůči ostatním částem kruhu. V každém segmentu kružnice je lokální vlastnost textury rozdělena na samotné kanály užitím banky osmi Gaborových filtrů. (osm směrů od 0° do 157,5° po úhlovém kroku 22,5°). Takto je od každého otisku získána reprezentace informací ve formě 480ti vektorů o pevně dané velikosti. Tento vektor vlastností (feature vector) je označován jako KódOtisku (FingerCode). Složka vektoru V_{ij} ($i=1..60$, $j=1..8$, kde i značí počet sektorů a j číslo Gaborova filtru) představuje energii v daném segmentu získanou Gaborovým filtrem, a je vypočítána jako průměrná absolutní odchylka (AAD) od střední odezvy filtru na všechny pixely buňky.

Získaný kód můžeme uložit do databáze a použít ho tak k pozdější identifikaci. Srovnání dvou otisků pak probíhá na základě porovnání euklidovské vzdálenosti mezi

jejich FingerCode. S rostoucí hodnotou této vzdálenosti klesá totožnost srovnávaného otisku.[26]

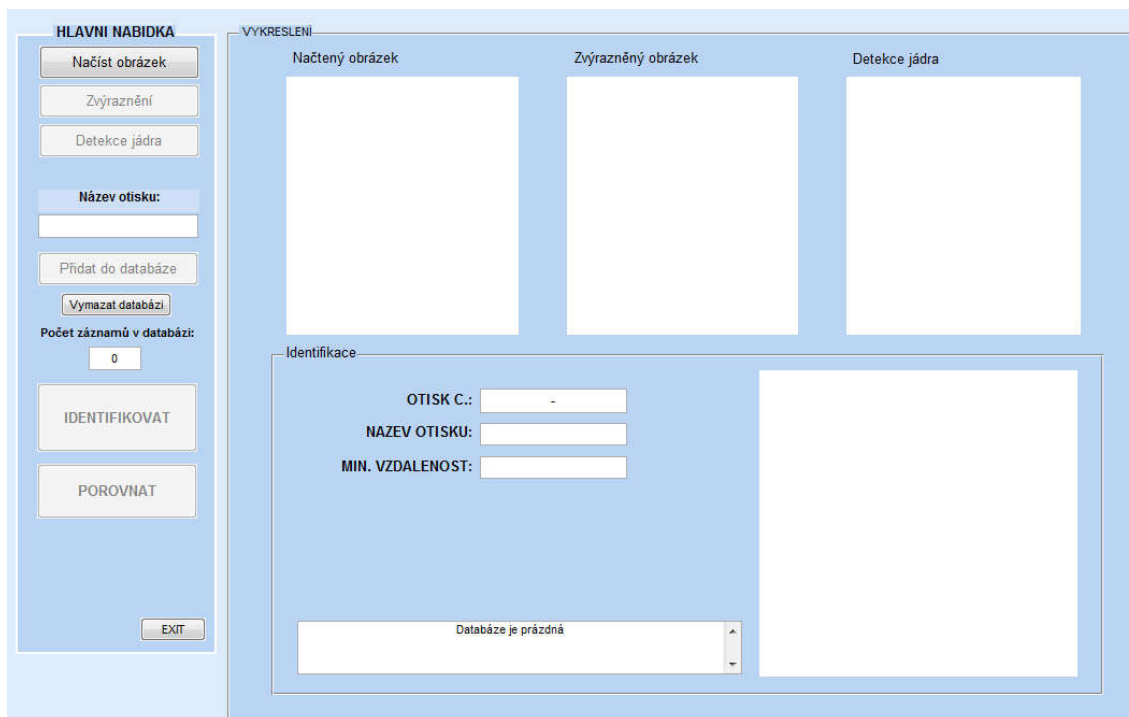


Obrázek 32: Vizualní zobrazení Gaborova filtru

7.2 Grafické uživatelské rozhraní

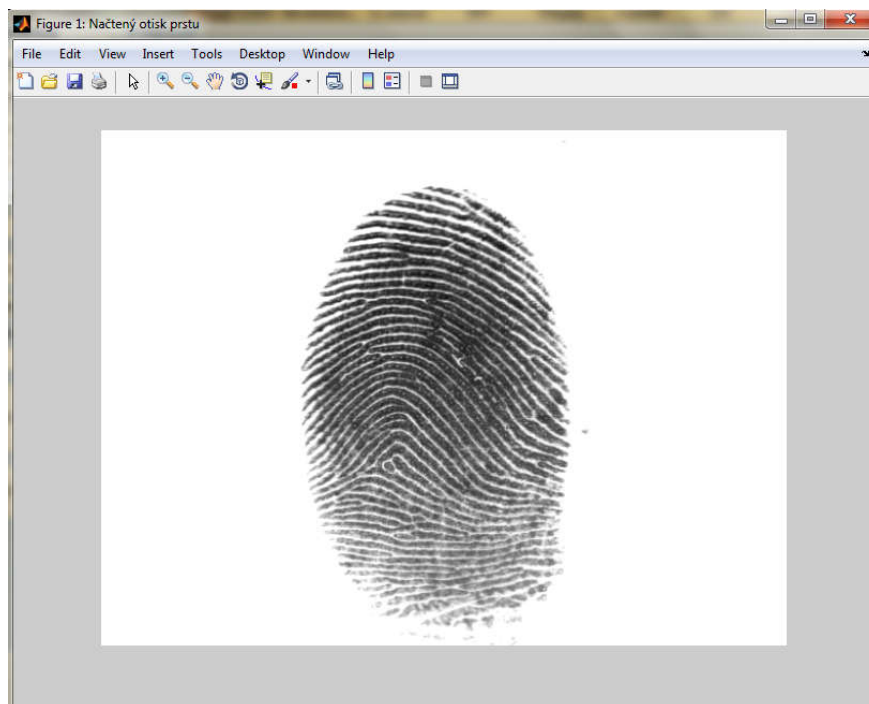
Pro ovládání algoritmu bylo vytvořeno grafické uživatelské rozhraní. Slouží pro ovládání aplikace bez znalosti jednotlivých funkcí a příkazů. Umožňuje praktické a rychlé ovládání aplikace.

GUI bylo vytvořeno v programovém prostředí Matlab, je spuštěno pomocí m-file GUI.m., který obsahuje kód pro ovládání. Při prvním spuštění aplikace se spustí výchozí okno, jako je na obrázku.



Obrázek 33: Výchozí vzhled GUI

Pro uživatele je vytvořena *Hlavní nabídka*, která ovládá celou aplikaci a *Vykreslení* kde se zobrazují výsledky jednotlivých kroků, včetně výsledků *Identifikace*. Po stisknutí tlačítka *Načíst obrázek* se zobrazí okno pro načtení obrazu k následnému zpracování. Po načtení obrazu se odblokuje tlačítko *Zvýraznění* pro zvýraznění načítaného obrazu, tento krok je nutné udělat vždy, jinak se nedá v aplikaci pokračovat. Následně se odemykají všechny tlačítka. Tlačítko *Detekce jádra* najde jádro v otisku a ukládá jeho souřadnice. Pokud toto tlačítko není využito tak se krok udělá pouze na pozadí aplikace. V aplikaci jsou obrazy zobrazovány jen v malých oknech. Pro názornější zobrazení je umožněno vykreslení v novém okně po kliknutí na obraz.

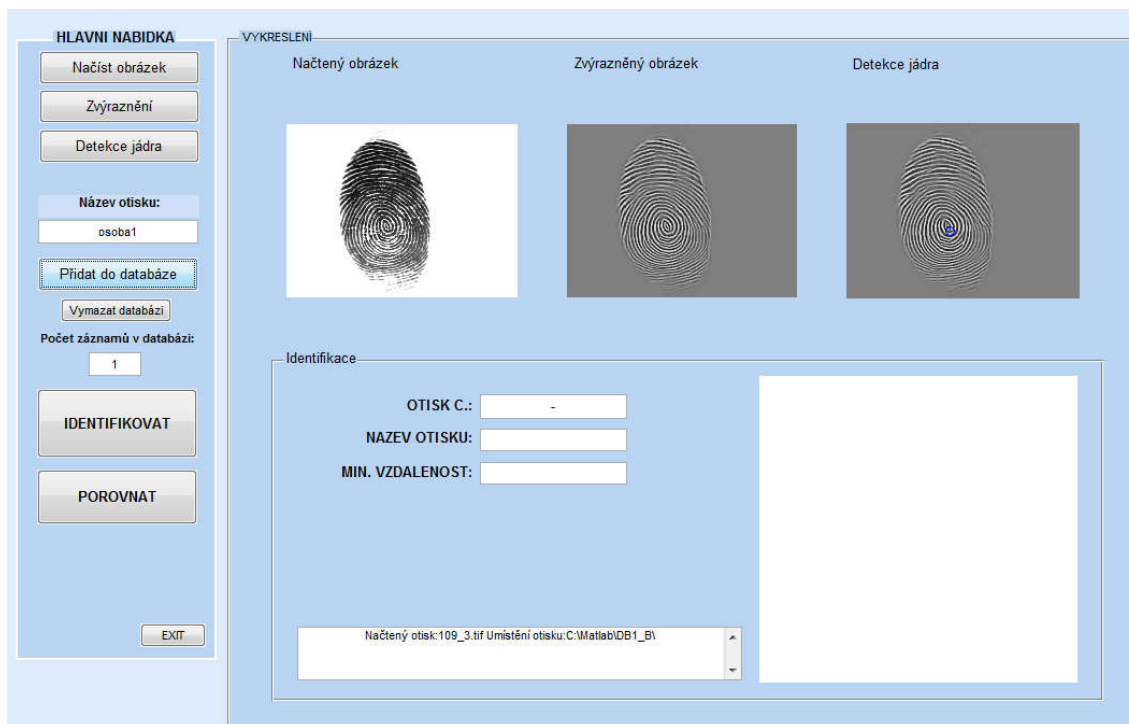


Obrázek 34: Načtený obrázek, zobrazení v novém okně

Jako databáze byly použity databáze z Fingerprint Verification Competition z roku 2004 [14]. Volně k dispozici jsou databáze, které soutěžící používají pouze pro naladění svých algoritmů před samotnou soutěží. Avšak pro otestování algoritmu jsou dostačující. Podrobný popis databází je v kapitole 6.

Aplikace je navržena tak, že uživatel si sám vytváří druhou databázi. Tudíž je k dispozici pouze jedna databáze, druhou databázi si uživatel z dostupných otisků vytvoří sám. Při prvním spuštění programu bude druhá databáze prázdná. Pokud by však byly v databázi už nahrány otisky, tak se jejich seznam a přesný název vypíše v příkazovém okně, stejně jako bude uživatel v GUI informován o počtu otisků v databázi.

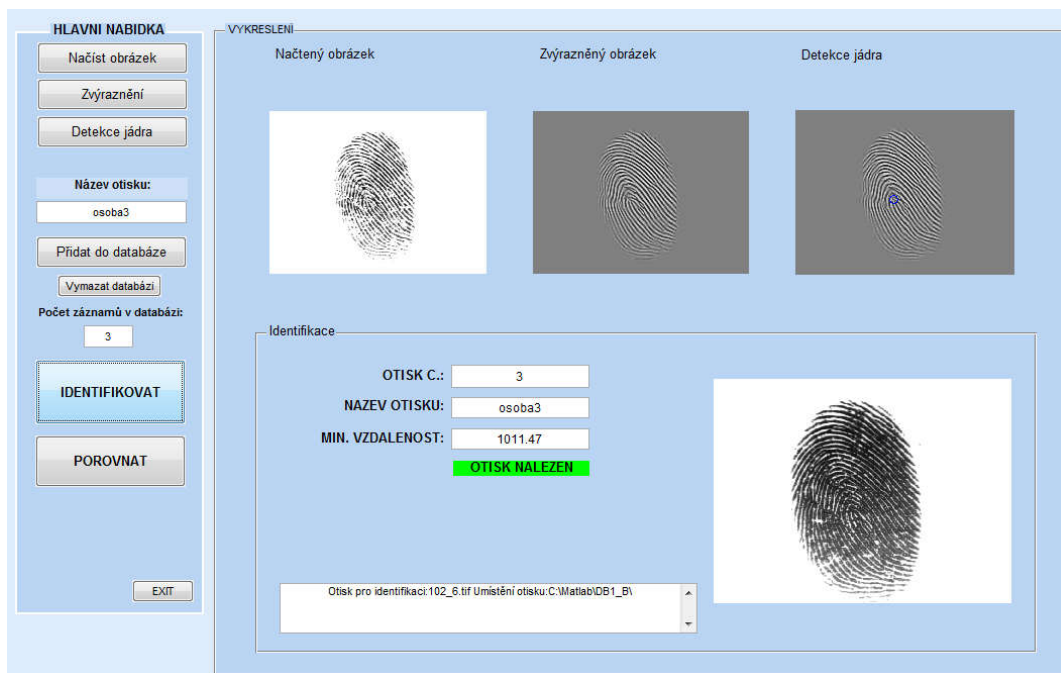
Po předzpracování obrazu a detekci jádra je otisk možné nahrát do databáze tlačítkem *Přidat do databáze* a pojmenovat si otisk pro lepší orientaci buď konkrétním jménem, nebo např. osoba 1. Otisky jsou ukládány do souboru *databaze_otisku.dat*. Položka *Počet záznamů v databázi* informuje o tom, kolik otisků je v databázi nahráno. Kdykoliv může být databáze smazána a vytvořena nová.



Obrázek 35: Vykreslení kroků v GUI – načtení, zvýraznění, detekce jádra

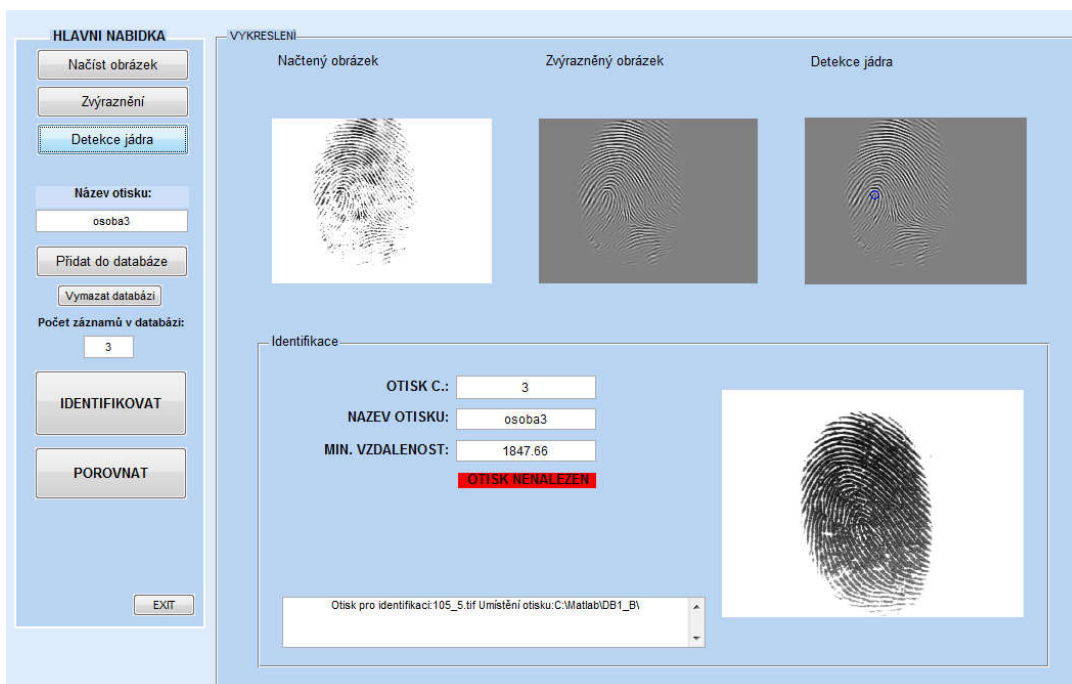
Aplikace je navržena ve dvou režimech. Umožňuje jak samotnou identifikaci (vyhledávání 1:N) tak pouze porovnání dvou otisků prstu (porovnávání 1:1). Pro identifikaci je potřeba mít vytvořenou druhou databázi otisků prstu. Potom je možné načíst otisk a tlačítko *IDENTIFIKACE* vyhodnotí otisky a vrátí číslo nalezeného otisku, název otisku a minimální euklidovskou vzdálenost. Pokud by se jednalo o naprosto shodný otisk tak bude vzdálenost rovna nule, v opačném případě bude vzdálenost záviset na poloze otisku a jeho extrahovaných vlastnostech. V závislosti na nastaveném prahu citlivosti je zobrazena zpráva, že otisk je v databázi buď *NALEZEN*, nebo *NENALEZEN*. Otisk, kterému je testovaný otisk nejvíce podobný, je zobrazen a je uvedena informace, který otisk je pro identifikaci vybrán a umístění otisku.

V případě že otisk souhlasí a tudíž nepřesahuje nastavený práh je vyhodnocena shoda.



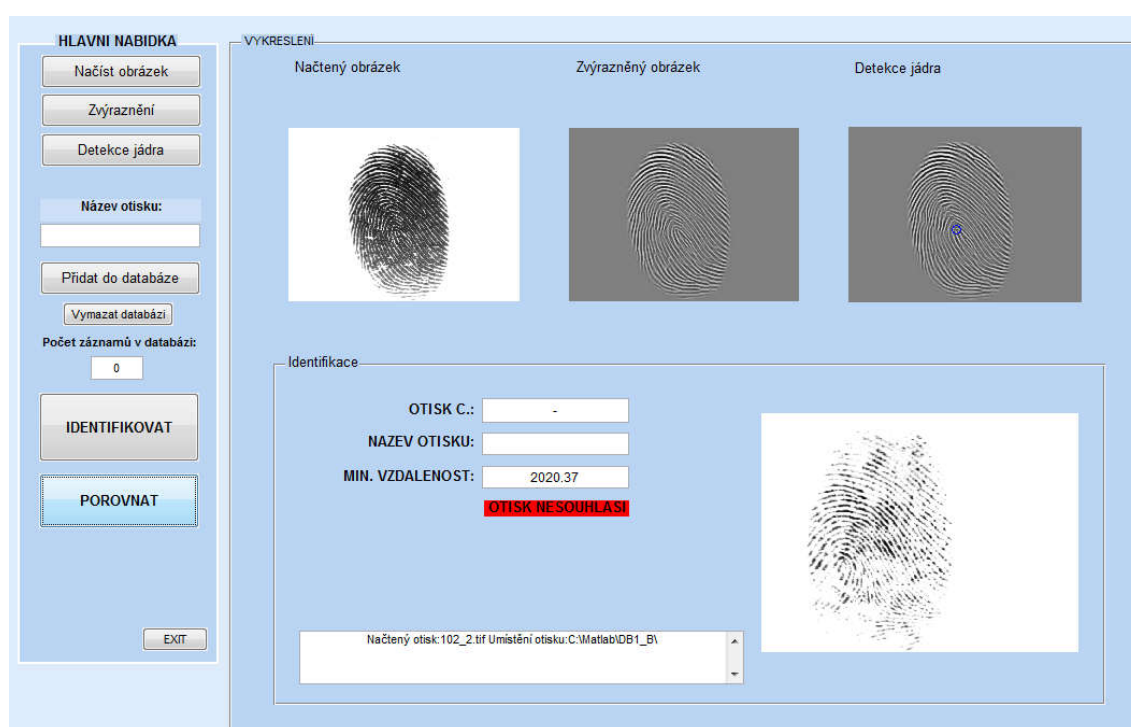
Obrázek 36: Nalezení shodného otisku prstu v databázi

V případě, že identifikace nebyla úspěšná a otisk nebyl nalezen, je uživatel odmítnut.



Obrázek 37: Nenalezení shodného otisku prstu v databázi

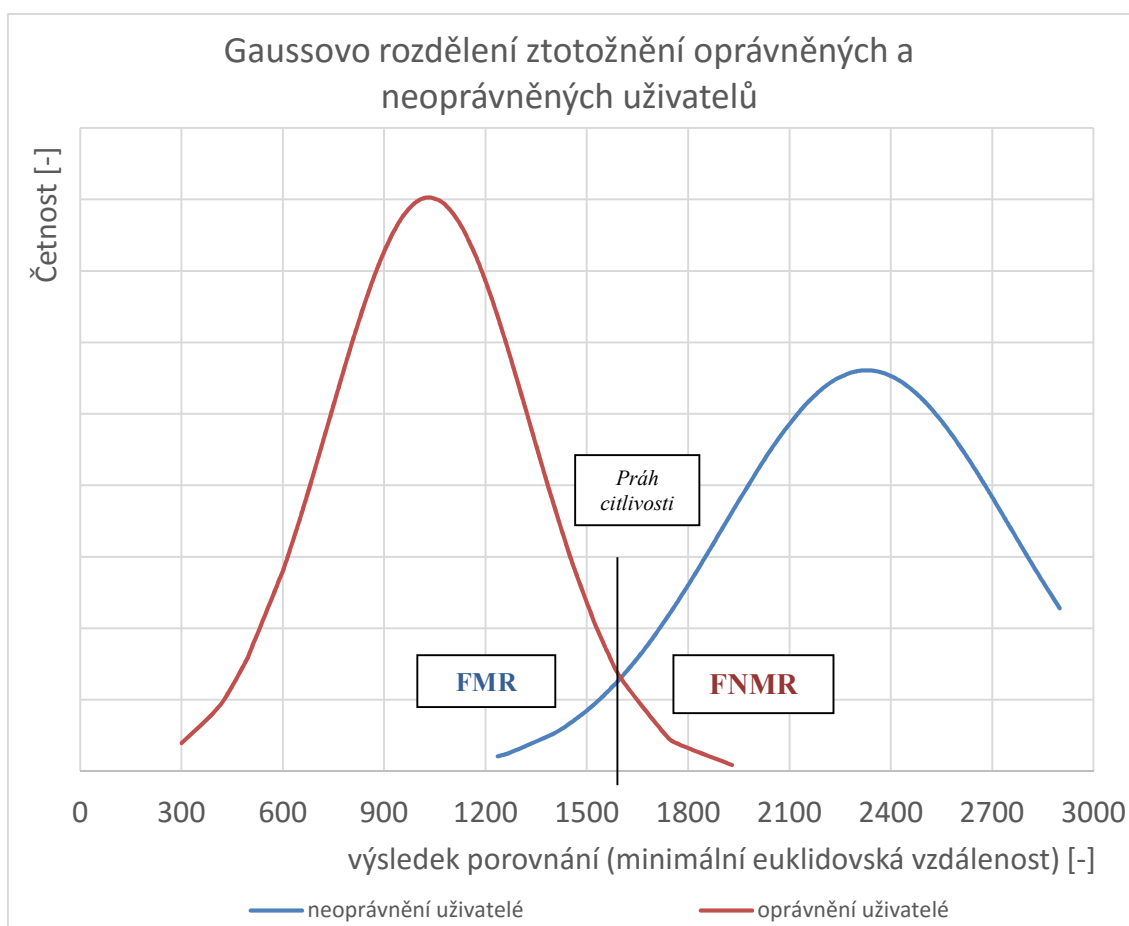
Aplikace dokáže taktéž pracovat v režimu porovnání otisků prstu. V takovém případě je pomocí tlačítka *Načíst obrázek* vybrán obrázek a je proveden krok zvýraznění obrazu. Načtený obraz se v tomto kroku ukládá do dočasné databáze *db_porovnani.dat*, která je po načtení dalšího jiného obrazu smazána. Následně při stisknutí tlačítka *POROVNAT* je umožněn výběr druhého otisku pro porovnání. Obraz otisku pro porovnání je zobrazen v okně, takže je umožněna i vizuální kontrola uživatelem. Následně funkce vrací minimální euklidovskou vzdálenost dvou otisků a opět na základě zvoleného prahu je vyhodnoceno, zdali otisk *SOUHLASÍ* nebo *NESOUHLASÍ*.



Obrázek 38: Výsledek porovnání dvou různých otisků - správně vyhodnoceno - otisk nesouhlasí

7.3 Vyhodnocení chybovosti

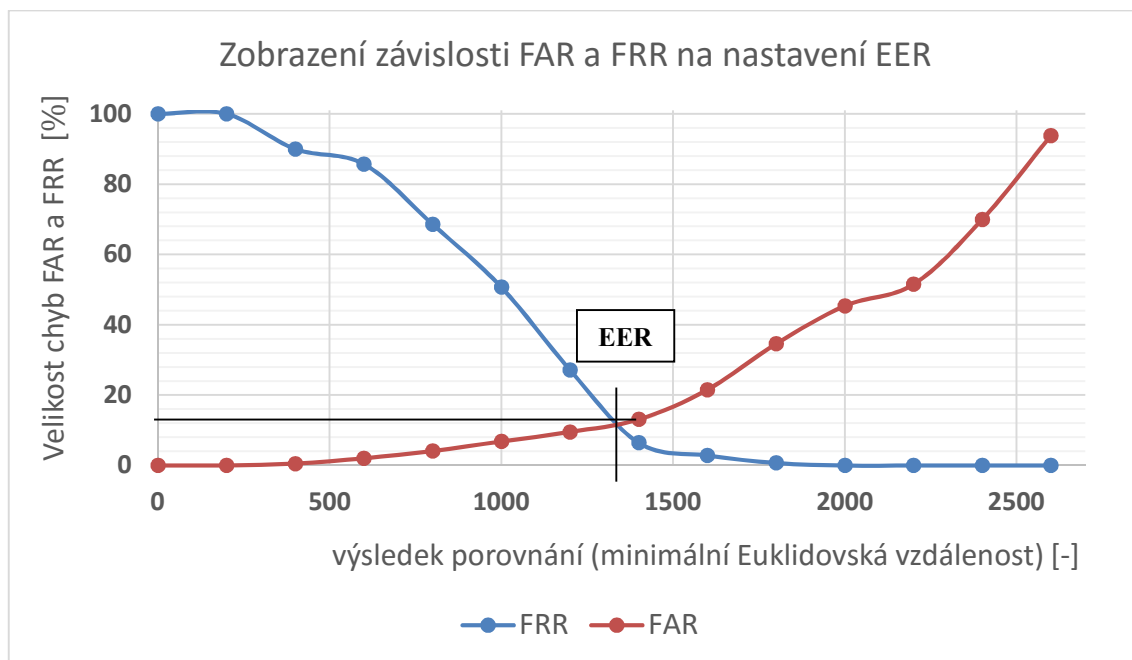
Pro vyhodnocení míry chybovosti bylo nejprve provedeno experimentální získání dat z testovací sady FVC 2004. Sada obsahovala deset otisků prstů a každý otisk byl v sadě zastoupen osmkrát. V první řadě probíhalo ztotožnění oprávněných a neoprávněných uživatelů. Oprávněné uživatele představuje srovnání stejných otisků prstů (vždy v rámci sady) a neoprávněné ztotožnění představuje srovnání různých otisků (napříč sad). Statistický soubor obsahoval cca 120 kombinací od obou případů. Při každém srovnání byla zaznamenána minimální euklidovská vzdálenost daného páru otisku. Získaná data byla vynesena do grafu pomocí Gaussova rozdělení:



Obrázek 39: Normálové rozdělení ztotožnění oprávněných a neoprávněných uživatelů

Z grafu normálového rozdělení bylo zvoleno počáteční nastavení prahu citlivosti na hodnotu minimální euklidovské vzdálenosti (MEV) 1600. Od tohoto prahu na levou stranu nastane u neoprávněných uživatelů falešná shoda (FMR), tedy útočník bude akceptován. Naopak u oprávněných uživatelů nastane na pravou stranu, od pozice

prahu, falešná ne-shoda (FNMR), tedy uživatel bude odmítnut. S tímto nastavením bylo provedeno další měření, na kterém bylo zjištěno, že práh citlivosti je nastaven příliš vysoko a byl snížen na hodnotu vzdálenosti 1300. Takto byl otestován další soubor otisků a výsledky byly vyneseny do grafu:



Obrázek 40: Zobrazení závislosti FAR a FRR na nastavení EER

Z tohoto měření byla zjištěna míra chybovosti systému (EER). Tato hodnota představuje nejmenší možné velikosti chyb FAR a FRR při současném naladění systému (prahu citlivosti – minimální euklidovské vzdálenosti). Z grafu byla odečtena hodnota $EER = 0,16$ při nastavení prahu minimální vzdálenosti 1300.

8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá biometrickou identifikací otisku prstu. V první části práce je stručně popsán obor biometrie a v návaznosti na něj i hodnocení spolehlivosti biometrických systémů. Podrobněji je následně rozebrán otisk prstu, jeho klasifikace, třídy a markanty. Jsou popsány jeho anatomické vlastnosti potřebné pro následnou identifikaci osob. V další části práce je popsána obecná teorie vztahující se k identifikaci na základě otisku prstu. Jsou rozebrány jednotlivé kroky předzpracování obrazu a popsány tři základní metody identifikace.

Tyto metody jsou však od svého vzniku často upravovány a vylepšovány, nebo se používá vzájemná kombinace různých metod. Pro metody založené na korelaci, není nutné předzpracování obrazu, avšak převažují nevýhody – nepodávají dobré výsledky při špatné kvalitě vstupního obrazu, mají vysokou citlivost na aktuální stav pokožky a jsou náročné na výpočetní výkon. Metoda založená na markantech je nejvyužívanější a vyžaduje předzpracování obrazu. Avšak tato metoda není příliš odolná proti zkreslení vlivem deformace pokožky prstu. Metoda využívající FingerCode, je vhodná pro otisky, kde nelze dobře a spolehlivě detekovat markanty. Srovnání dvou otisků je potom realizováno jako výpočet euklidovské vzdálenosti mezi dvěma FingerCode.

Při realizování praktické části byly prostudovány dostupné zdroje a již navržené algoritmy, které byly ve většině případů založeny na identifikaci na základě markantů. Prvotně bylo tedy rozhodnuto pro algoritmus založený na této metodě, ale už v počátečních fázích se ukázalo, že tato metoda nebude vhodná pro otisky se špatnou kvalitou. Pro identifikaci byla nakonec využita metoda FingerCode, která je založena na porovnávání vektorů vlastností jednotlivých otisků.

Pro testování algoritmu byla vybrána databáze otisků, která se použila pro naladění algoritmů v soutěži FVC v roce 2004. Soutěžní databáze k dispozici nejsou, tudíž byl algoritmus testován pouze na testovacích databázích. Algoritmus byl po otestování statisticky zpracován. Prvotně nastavený práh, získaný z Gaussova rozložení, byl nastaven příliš vysoko a způsoboval velkou chybu FAR. Během druhého získávání statistických dat byl práh citlivost nastaven na minimální vzdálenost 1300, což se ukázalo jako ideální hodnota, při které je míra chybovosti FAR i FRR na úrovni 16%.

Výsledek byl porovnán s výsledky autorů ze soutěže FVC. Nejlepší algoritmus dosahoval chybovosti pouze asi 2%. Ovšem srovnání s realizovaným algoritmem není zcela adekvátní, jelikož nebyl testován přímo na soutěžní databázi, u které se dají předpokládat otisky s horší kvalitou obrazu. Navržený postup selhává v situacích, kdy je otisk umístěn částečně v okraji, nebo v jeho blízkosti. Komerční systémy dosahují oproti vytvořené aplikaci lepších výsledků.

LITERATURA

- [1] DRAHANSKÝ, M., ORSÁG, F. *Biometrie*. 1. vyd., Brno: Computer Press a. s., 2011, 294 s. ISBN 978-80-254-8979-6.
- [2] RAK, R., MATYÁŠ, V., ŘÍHA, Z. *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. 1. vyd. Praha: Grada, 2008, 631 s. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [3] Kůže. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%AF%C5%BEE>
- [4] RUTTKAY, M. *Biometrická identifikace otisku prstu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 70 s.
- [5] ŠČUREK, R. *Biometrické metody identifikace osob v bezpečnostní praxi*: Studijní text. [online]. Dostupné z: https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/040/.content/sys-cs/resource/PDF/biometricke_metody.pdf
- [6] MALTONI, D., et al. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York: Springer, 2003. 348s. ISBN 0-387-95431-7.
- [7] MANSFIELD, A. WAYMAN, J. *Best Practices in Testing and Reporting Performance of Biometric Devices*. [online] Dostupné z: <http://www.idsysgroup.com/ftp/BestPractice.pdf>
- [8] Understanding Biometrics. [online] Dostupné z: <http://www.griaulebiometrics.com/en-us/book/understanding-biometrics>
- [9] SELVARANI, S., JEBAPRIYA, S., SMEETA MARY, R. *Automatic Identification and Detection of Altered Fingerprints*. [online] Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6965048>
- [10] THAI, R. *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction*., 2003. 63 s. Dizertační práce. School of Computer Science and Software Engineering, The University of Western Australia.
- [11] Řez kůží. Dostupné z: <http://www.samouk.cz/moodle/mod/presenter/view.php?open=1&id=789&chapterid=9206>
- [12] JAIN, A., FLYNN, P., ROSS, A. *Handbook of Biometrics*. New York: Springer, 2008. 556s. ISBN 978-0-387-71040-2.
- [13] FVC onGoing. [online] Dostupné z: <https://biolab.csr.unibo.it/FVCOnGoing/UI/Form/Home.aspx>
- [14] FVC2004. [online] Dostupné z: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/default.asp>
- [15] HONG, L., WAN, Y., JAIN, J. *Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1998, 20, s. 777-789. [online] Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=709565&newsearch=true&quer>

- yText=HONG,%20Lin;%20WAN,%20Yifei;%20JAIN,%20Jain.%20Fingerprint%20Image%20Enhancement:%20Algorithm%20and%20Performance%20Evaluation.
- [16] Biometric System Laboratory. Dostupné z:
<http://biolab.csr.unibo.it/research.asp?organize=Activities&select=&selObj=9&pathSubj=111%7C%7C9&Req=&>
 - [17] JIN, A. L. H. , CHEKIMA, A. , DARGHAM, J. A. , FAN, L. CH. *Fingerprint Identification and Recognition Using Backpropagation Neural Network*. [online] Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?arnumber=1033066>
 - [18] MUTTER, K. N. , JAFRI, Z. M. , AZIZ, A. A. *Automatic Fingerprint Identification Using Gray Hopfield Neural Network Improved by Run - Length Encoding*. [online] Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4627008&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4627008
 - [19] TICO, M., KUOSMANEN, P., SAARINEN, J. *Wavelet domain features for fingerprint recognition*. [online] Dostupné z:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=894340&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D894340
 - [20] CHIKKERUR, A., CARTWRIGHT, A. N., GOVINDARAJU, V. *Fingerprint enhancement using STFT analysis*. [online] Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320306002457>
 - [21] SHERLOCK, B. G., MONRO, D. M., MILLARD, K. *Fingerprint enhancement by directional fourier filtering*. [online] Dostupné z:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=285836&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D285836
 - [22] RAO, A. R. *A Taxonomy of Texture Description and Identification*. New York: Springer. e-ISBN-13:978-1-4613-9777-9
 - [23] KAAS, M., WITKIN, A. *Analyzing oriented patterns*. [online] Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0734189X87900430>
 - [24] CHIKKERUR, S., WU, C., GOVINDARAJU, V. *A Systematic approach for feature extraction in fingerprint images*. [online] Dostupné z:
<http://wings.buffalo.edu/research/cubs/pdf/finger-systematic.pdf>
 - [25] NILSSON, K., BIGUN, J. *Localization of corresponding points in fingerprints by complex filtering*. [online] Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865503000837>
 - [26] PRABHAKAR, S., HONG, L., PANKANTI, S. *FingerCode: a filterbank for fingerprint representation and matching* [online] Dostupné z:
<http://www.cse.msu.edu/biometrics/Publications/Fingerprint/MSU-CPS-98-36.pdf>

SEZNAM ZKRATEK

IT	informační technologie
FAR	míra chybného přijetí
FRR	míra chybného odmítnutí
FMR	míra chybné shody
FNMR	míra chybné neshody
EER	míra vyrovnaní chyb
FTA	míra neschopnosti nasnímat
FTE	míra neschopnosti zaregistrovat
FTM	míra neschopnosti porovnat
log	logaritmus
dpi	Dots Per Inch, počet pixelů na palec
GUI	Graphical User Interface, Grafické uživatelské rozhraní
FTIR	Frustrated Total Internal Reflection, metodika snímání
CCD	Charged Coupled Device, elektronická součástka používající se pro snímání obrazové informace
2D	dvojměrný
3D	trojměrný
LOPL	lokální orientace papírných linií
px	pixel

SEZNAM PŘÍLOH

OREZ.M

- funkce pro oříznutí oblasti s detekovaným jádrem. Tato oblast se použije pro extrakci feature vektoru (soubor vlastností daného otisku) pomocí banky Gaborových filtrů

ELIMINACE.M

- používá se pro odstranění opakujících se souřadnic možných jader (středu) otisku prstu

FFT_ZVYRAZNENI.M

- funkce pro předzpracování vloženého otisku, zvýraznění pomocí STFT (Short Time Fourier Transform)

GABOR2D_SUB.M

- funkce pro výpočet koeficientů Gabor 2D filtrů

GUI.M

- soubor pro zobrazení grafického uživatelského rozhraní

HLEDANI_JADRO.M

- funkce pro hledání jádra (středu) načteného otisku

HLEDANI_JADRO_LIST.M

- funkce je založena na algoritmu hledání jádra, ale nevrací pouze jedno jádro, ale seznam možných kandidátů na jádro (střed) otisku. Používá se u otisku, který byl načten pro identifikaci nebo porovnání.

KOHERENCE.M

- výpočet obrazu koherence, používá se při předzpracování obrazu

KOMPLEX_FILTR.M

- komplexní filtrování obrazu, používá se u hledání jádra

KONVOLUCE.M

- 2D konvoluce založená na FFT, používá se u procesu identifikace a porovnání jako konvoluce Gaborových filtrů a normalizované oblasti otisku

OREZANI.M

- ořezání obrázku po obvodu o nastavenou velikost

REGION_ZAJMU.M

- funkce, která vrací oblast zájmů při hledání jádra

ROOT_FILTER.M

- implementuje root-filter pro zvýšení SNR ratio u obrazu, používá se u FFT při

předzpracování obrazu

SEKTOR_NORM.M

- funkce se používá pro normalizaci ořezané oblasti s detekovaným jádrem

SMEROVEPOLE_VAR.M

- odhad směrového pole, používá se při lokalizaci jádra

VYHLAZENI_FO.M

- vyhlazení obrazu četnosti hran pomocí procesu difuze, použití při předzpracování obrazu

VYHLAZENI_SMER_OBRAZU.M

- vyhlazení směrového pole pomocí 2D filtrů

VOLBA_SEKTOR.M

- funkce pro zjištění odpovídajícího sektoru v soustředné kružnici/skupině. Používá se při procesu determinace feature vektoru

ZRCADLENI.M

- funkce vrací vstupní obraz s ohraničením, jako by bylo ozrcadlené – provádí se před konvolucí pro potlačení nežádoucích efektů (Gibbsův efekt)

SMEROVE_FILTRY_PI_2/4.MAT

- banka koeficientů směrových filtrů, generována pro šířku pásma $\pi/2$ a $\pi/4$

DB1_B

- databáze otisků prstu