

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

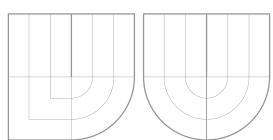
KLASIFIKACE OTISKŮ PRSTŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

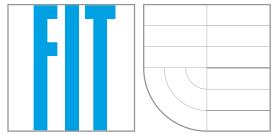
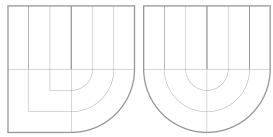
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KOSTIHA

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

KLASIFIKACE OTISKŮ PRSTŮ

FINGERPRINT CLASSIFICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KOSTIHA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing.,Dipl.-Ing. MARTIN DRAHANSKÝ, Ph.D.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2007/2008

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Kostiha Martin**

Obor: Informační technologie

Téma: **Klasifikace otisků prstů**

Kategorie: Umělá inteligence

Pokyny:

1. Nastudujte literaturu týkající se rozpoznávání otisků prstů, se zaměřením na jejich klasifikaci.
2. Navrhněte metodu pro spolehlivou klasifikaci otisků prstů.
3. Implementujte tuto metodu a otestujte její spolehlivost.
4. Diskutujte dosažené výsledky.

Literatura:

- Dass, S.C., Jain, A.K.: *Fingerprint Classification Using Orientation Field Flow Curves*, Michigan State University, 2004
- Prabhakar, S.: *Fingerprint Classification and Matching Using a Filterbank*, Michigan State University, Dissertation Thesis, 2001

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Předložte klasifikační třídy otisků prstů.
- Předložte návrh metody pro klasifikaci otisků prstů

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese
<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Drahanský Martin, Ing., Dipl.-Ing., Ph.D.,** UITS FIT VUT

Konzultant: Orság Filip, Ing., Ph.D., UITS FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2007

Datum odevzdání: 14. května 2008

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav inteligentních systémů
612 66 Brno, Božetěchova 2

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček
vedoucí ústavu

Licenční smlouva

Licenční smlouva je uvedena v archivním výtisku uloženém v knihovně FIT VUT v Brně.

Abstrakt

Automatická identifikace založená na otiscích prstů vyžaduje porovnání otisku prstu s velkým množstvím otisků prstů uložených v databázi. Klasifikace otisků prstů poskytuje důležitý mechanizmus indexování v databázích otisků prstů, který snižuje čas vyhledávání a výpočetní nároky. Tato práce se zabývá Galton-Henryho klasifikačním systémem. Klasifikační metoda je založena na poli orientací a detekci singularit pomocí Poincaréova indexu.

Klíčová slova

klasifikace, otisk prstu, oblouk, klenutý oblouk, levá smyčka, pravá smyčka, spirála, pole orientací, singularita, Poincaréův index, segmentace

Abstract

Automatic identification based on fingerprints requires the input fingerprint to be matched with a large number of fingerprints stored in a database. Fingerprint classification provides an important indexing mechanism in fingerprint databases that reduces the search time and computational complexity. This thesis is dealing with Galton-Henry's classification system. The classification method is based on orientation field and detection singularities using Poinaceré index.

Keywords

classification, fingerprint, arch, tented arch, left loop, right loop, whorl, orientation field, singularity, Poincaré index, segmentation

Citace

Martin Kostiha: Klasifikace otisků prstů, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2008

Klasifikace otisků prstů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Drahanského. Uvedl jsem všechny literální prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Martin Kostiha
13. května 2008

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Martinu Drahanskému za dobrou spolupráci a vstřícný přístup.

© Martin Kostiha, 2008.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod	2
2	Otisky prstů	3
2.1	Stručná historie otisků prstů	3
2.2	Vývoj otisků	3
2.3	Proč klasifikovat otisky?	4
2.4	Charakteristiky otisků	4
2.4.1	Globálně význačné body	4
2.4.2	Lokálně význačné body	5
3	Metody klasifikace otisků prstů	7
3.1	Přesnost metod pro klasifikaci otisků prstů	9
3.2	Jiné metody klasifikace	10
4	Návrh metody pro klasifikaci otisků prstů	11
4.1	Nutné kroky k úspěšné klasifikaci otisků prstů	11
4.1.1	Segmentace obrazu	11
4.1.2	Předzpracování - filtrace obrazu	13
4.2	Výběr vhodné metody klasifikace otisků prstů	14
4.3	Možné přístupy ke zvolené metodě	14
5	Implementace navržené metody	16
5.1	Segmentace obrazu	16
5.2	Pole orientací papilárních linií	17
5.2.1	Výpočet orientace bloku	18
5.2.2	Výpočet gradientu v bodě	19
5.3	Detekce singulárních bodů	20
5.4	Klasifikace	21
6	Dosažené výsledky a možnosti dalšího vývoje	23
6.1	Experimentální testy	23
6.2	Zhodnocení dosažených výsledků	25
7	Závěr	27
A	Ukázka aplikace	30

Kapitola 1

Úvod

Otisky prstů jsou důležitým a zároveň spolehlivým prostředkem k identifikaci osob. Jelikož existují obrovské databáze otisků prstů (např. FBI) je neúnosné porovnávat otisky prstů se všemi otisky v databázi. Z tohoto důvodu je zavedena klasifikace otisků prstů, která umožnuje indexaci otisků v databázi. To vede k redukování počtu porovnávaných otisků a také k úspoře výpočetního výkonu.

Při klasifikaci se vyskytují problémy s nekvalitními otisky prstů, které vlastní asi 4% obyvatel. Jsou způsobeny např. manuální prací, kdy dochází k oděrkám na pokožce. Nekvalitní otisky mohou být také způsobeny vlhkostí nebo suchotí pokožky a dalšími okolnostmi, což závisí také na snímačích otisků prstů, jako je nepravidelné rozmístění tlaku prstu nebo prokluz u snímání otisku prstu.

Tato bakalářská práce si klade za cíl navržení spolehlivé metody pro klasifikaci otisků prstů. Aplikace by měla mít příjemné uživatelské rozhraní pro načítání otisků prstů a taktéž grafický výstup, kde se na načteném otisku prstu zobrazí značky identifikující jednotlivé singulární body, jako jsou jádra a delty.

Práce je členěna do sedmi kapitol a úvod tvoří první kapitolu.

Druhá kapitola pojednává celkově o otiscích prstů. Je tvořena stručnou historií a vývojem otisků prstů. Jsou zde uvedeny charakteristické rysy otisku prstu, podle kterých se provádí klasifikace a identifikace. Také je zde představeno klasifikační schéma, na kterém bude navržena metoda klasifikace.

Třetí kapitola je souhrnem jednotlivých přístupů ke klasifikaci otisků prstů s jejich zhodnocením. Dále obsahuje podkapitolu, jež se zabývá analýzou spolehlivosti klasifikačních metod, která bude využita v šesté kapitole.

Nutným předpokladům a návrhu metody klasifikace je věnována čtvrtá kapitola.

Pátá kapitola je zaměřena na implementační detaily, o kterých je nutné se zmínit. Jedná se o vytvoření pole orientací papilárních linií, výpočet orientace z bloku v obrazu, detekce singulárních bodů a konečné určení klasifikační třídy.

Šestá kapitola zhodnocuje dosažené výsledky celého návrhu.

Závěrečná kapitola shrnuje celou problematiku práce a dává návrhy na možné pokračování v této zajímavé oblasti.

Kapitola 2

Otisky prstů

2.1 Stručná historie otisků prstů

Otisky prstů mají za sebou mnohaletou historii [1]. Již v 17. století se Marcello Malpighi proslavil odbornou studií o papilárních liniích, závitech a smyčkách v otisku prstu. Prvně se zmínil o otiscích prstů jako o nástroji pro identifikaci jednotlivých osob. Purkinje v roce 1823 prvně zavedl pravidla pro klasifikaci otisků prstů, které byly děleny do devíti tříd (*transverse curve, central longitudinal stria, oblique stripe, oblique loop, almond whorl, spiral whorl, ellipse, circle, a double whorl*) podle globálních tvarů papilárních linií.

V roce 1888 Sir Francis Galton provedl hloubkovou studii otisků prstů. Publikoval knihu „Fingerprints“, která zahrnovala klasifikační systém otisků prstů. Otisky prstů byly členěny do tří hlavních tříd (*arch, loop, a whorl*), které pak byly dále rozděleny na podtřídy. Zmínil také, že otisky prstů se po celý život nemění a dle jeho výpočtu je pravděpodobnost, že by dvě osoby měly stejné otisky prstů $1:64$ miliardám. Taktéž zavedl charakteristiky otisků prstů (markanty), podle kterých může být člověk identifikován, a ty jsou používány dodnes.

O deset let později Edward Henry navázal na klasifikační systém Francise Galtona a navrhl pět tříd (*arch, tented arch, left loop, right loop a whorl*) pro klasifikaci otisků prstů. Galton-Henryho klasifikační systém byl prvně zaveden v Anglii a Wallesu pro kriminální identifikaci. Postupem času se rozšířil do mnoha zemí, kde způsobil velký pokrok a je hojně využívaný dodnes.

V polovině 20. století evidovala FBI 100 milionů karet s otisky. Se zavedením systému AFIS (*Automated Fingerprint Identification System*), byly otisky digitalizovány. Za zmínku stojí, že v současné době eviduje FBI 54 milionů digitalizovaných otisků prstů.

2.2 Vývoj otisků

Papilární linie se vytvářejí během vývoje plodu v děloze. Embryo je v lůně matky vystaveno množství nejrůznějších tlaků a drobných nehod, které ho nijak neohrožují, ale formují mimo jiné i povrch jeho kůže. Takto vzniklé papilární linie se po šestém měsíci těhotenství už dále nevyvíjejí. Zůstanou stejné po celý další život člověka, i když během jeho růstu dochází k velikostním změnám. Nemění se i v případě, že dojde k běžnému mechanickému poškození kůže např. sedrení, popálení, neboť kůže se postupem času regeneruje. Změna může nastat jen po hlubokém poranění, které může způsobit jizvy. Tyto vlastnosti vytváří otisky prstů atraktivním biometrickým identifikátorem.

2.3 Proč klasifikovat otisky?

Identifikace osoby vyžaduje porovnání otisku prstu se všemi otisky v databázi. Databáze otisků prstů může být také velmi rozsáhlá, např. několik miliónů otisků prstů. V těchto případech vyžaduje provedení identifikace spoustu času, což je neakceptovatelné. Identifikační proces lze urychlit redukováním počtu porovnaných vzorků, které jsou vyžadovány pro provedení identifikace. Běžnou strategií je rozdělení databáze otisků prstů do určitých tříd. Identifikace otisku prstu pak vyžaduje porovnání otisků z databáze téže třídy.

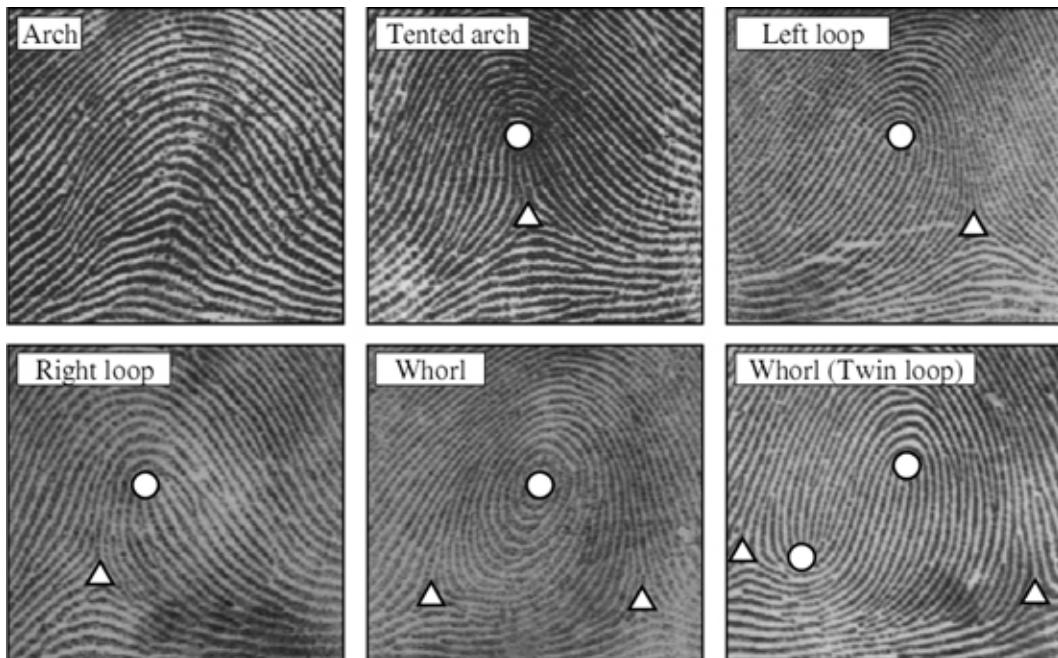
2.4 Charakteristiky otisků

Otisk prstu tvoří vyvýšeniny, které se nazývají papilární linie a prohlubeniny, což jsou mezery mezi papilárními liniemi. Právě papilární linie tvoří charakteristické znaky otisku prstu. Mohou to být globálně význačné body, které jsou významné zejména pro klasifikaci a také lokálně význačné body, které slouží k identifikaci či verifikaci otisku.

2.4.1 Globálně význačné body

Globálně význačným bodům otisku prstu se též říká singulární body. Jsou tvořeny několika paralelně jdoucími papilárními liniemi, které se formulují buď do jádra nebo delty. Tyto význačné body slouží právě ke klasifikaci otisku prstu. Nejznámějším klasifikačním schématem je Galton-Henryho klasifikace [7], která je využívána policií po celém světě. Na obrázku 2.1 jsou znázorněny otisky prstů, které zastupují jednotlivé klasifikační třídy a jejich popis je následující:

1. **Oblouk (arch)** - papilární linie vstupují z jedné strany, zvyšují se na malý hrbolek a vystupují z protější strany ze které vstoupily. Oblouk nemá jádro ani deltu.
2. **Klenutý oblouk (tented arch)** - podobný jako prostý oblouk, má nejméně jednu papilární linií vysoce zakřivenou. Má jedno jádro a jednu deltu.
3. **Levá smyčka (left loop)** - obsahuje jednu nebo více papilárních linií, které vstupují z levé části otisku prstu, stáčí se zpět a vychází stejnou stranou vstupu. Delta je zde přítomna vpravo od jádra smyčky. Levá smyčka má jedno jádro a jednu deltu.
4. **Pravá smyčka (right loop)** - má jednu nebo více papilárních linií, které vstupují z pravé části otisku prstu, stáčí se zpět a vychází stejnou stranou vstupu. Delta je zde přítomna vlevo od jádra smyčky. Pravá smyčka má jedno jádro a jednu deltu.
5. **Spirála (whorl)** - otisk prstu, který je tvořen nejméně jednou papilární linií, která celkově tvoří cestu o 360° ve středu otisku prstu. Třída spirála je docela složitá a v některých klasifikačních schématech se dělí na další dvě kategorie: dvojitá smyčka (*double/twin loop*) a prostá spirála. Spirálu tvoří dvě jádra a dvě delty.



Obrázek 2.1: Otisky prstů, které zastupují jednotlivé klasifikační třídy dle Galton-Henryho klasifikačního schématu [12].

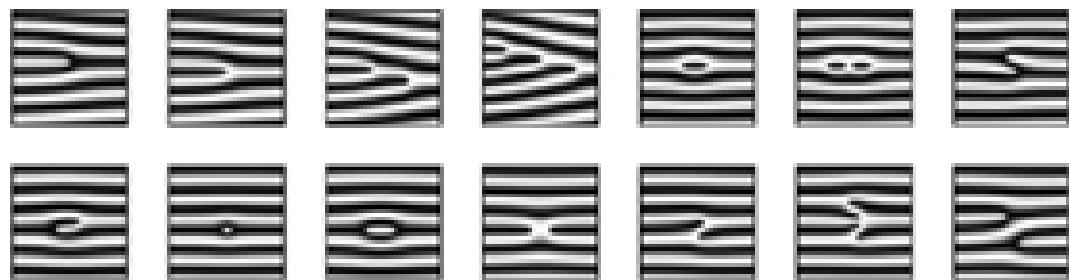
K identifikaci otisků prstů je žádoucí, aby otisky prstů byly rovnoměrně rozděleny do tříd, z toho důvodu, aby se porovnávalo pro identifikaci stejné množství otisků. Ve skutečnosti je rozložení otisků do pěti tříd následující [7]:

- Oblouk (*arch*) - 3.7%
- Klenutý oblouk (*tented arch*) - 2.9%
- Levá smyčka (*left loop*) - 33.8%
- Pravá smyčka (*right loop*) - 31.7%
- Spirála (*whorl*) - 27.9%

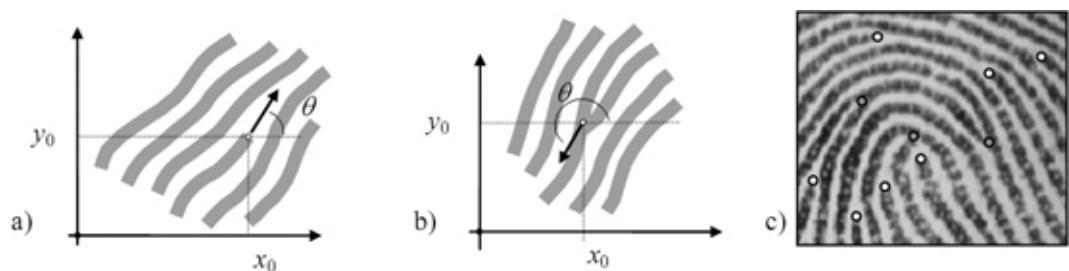
2.4.2 Lokálně význačné body

Lokálně význačným bodům se též říká markanty. Markant je jakákoli změna v průběhu papilární linie, která se odlišuje od ostatních. Na tvaru, umístění a vzdálenosti jednotlivých markantů je založena identifikace otisků prstů. Umístění pozic těchto markantů je pro každého člověka typické a nezaměnitelné. Bylo zjištěno, že papilární linie mohou tvořit něco přes sto druhů markantů. Ty nejzákladnější markanty jsou znázorněny na obrázku 2.2.

Algoritmické rozpoznání všech markantů by bylo náročné, proto se používají jen dva druhy markantů dle obrázku 2.3. Jedná se o typ vidlice a začátek nebo ukončení, u nichž se určuje poloha a směr. Algoritmické rozpoznání těchto dvou markantů je jednoduché a jednoznačné.



Obrázek 2.2: Základní druhy markantů: *Ridge ending, simple ridge bifurcation, twofold ridge bifurcation, threefold ridge bifurcation, simple whorl, twofold whorl, and side contact; Hook point, interval, X-line, simple bridge, twofold bridge, a continuous line* [9].



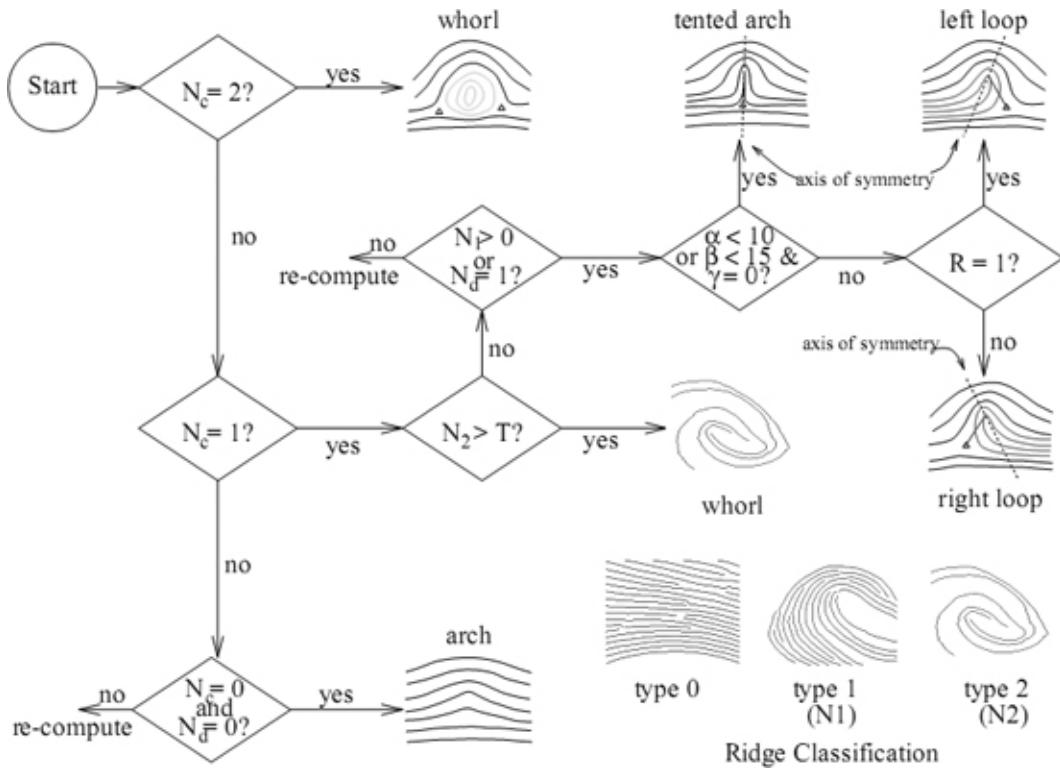
Obrázek 2.3: Markanty, které se používají pro algoritmické rozpoznání: a) ukončení nebo začátek, b) vidlice, c) identifikace těchto markantů v otisku [11].

Kapitola 3

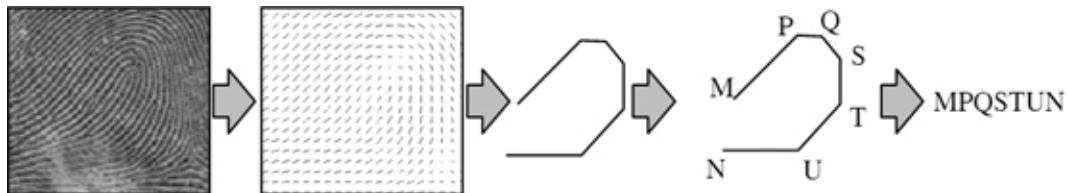
Metody klasifikace otisků prstů

Metody klasifikace otisků prstů většinou využívají pole orientací papilárních linií, o němž je podrobněji diskutováno v podkapitole 5.2. Klasifikační metody mohou být hrubě rozděleny do jedné z následujících kategorií [12]:

- **Rule-based** - Otisk prstu je jednoduše klasifikován podle počtu a pozic singulárních bodů. Tuto techniku běžně používají lidé pro manuální klasifikaci otisků prstů. Nicméně tato metoda je navržena i pro automatickou klasifikaci. Ačkoliv tato metoda je atraktivní pro její jednoduchost, mohou se u ní též vyskytovat problémy s přítomností šumu v otisku prstu, kde může být detekce extrémně obtížná. Při automatické klasifikaci lze zvýšit přesnost vyhlazením (např. průměrováním orientací maskou o velikosti 3×3) pole orientací papilárních linií. Obrázek 3.1 představuje jednoduché schéma algoritmu pro klasifikaci otisků prstů metodou *rule-based*.
- **Syntaktické** - Metoda je založena na analýze toku papilárních linií, které jsou reprezentovány množinou spojených čar. Jednotlivé změny směru papilárních linií jsou označeny znaky. Takto získaná množina řetězců je zpracována gramatikou nebo porovnáváním řetězců k získání konečné klasifikace. Syntaktická metoda vyžaduje velmi složitou gramatiku, jejíž odvození vyžaduje komplikované a nestabilní metody. Z tohoto důvodu byla syntaktická metoda klasifikace otisků prstů téměř opuštěna. Obrázek 3.2 je ukázkou vytvoření řetězce z jedné papilární linie pro levou smyčku.
- **Strukturální** - Metoda spočívá v rozčlenění pole orientací papilárních linií na oblasti s homogenními orientacemi. Počet a tvary těchto oblastí zahrnují informaci pro klasifikaci otisku prstu. Rozdělení na homogenní oblasti není tak snadné, zvláště u otisků nízké kvality. Tato metoda dosahuje dobrých výsledků, ale na druhou stranu je výpočetně náročná. Rozdělení otisku prstu na bloky s homogenními orientacemi představuje obrázek 3.3.
- **Statistické** - Na základě rozdělení počtu podobných rysů jako jsou orientace papilárních linií, je statisticky odvozena klasifikační třída otisku prstu. Tento přístup ke klasifikaci otisku prstů nedosahuje však dobrých výsledků.
- **Neuronové síťě** - Metoda je založena na víceúrovňových perceptronech a použití jednotlivých orientací papilárních linií. Každý perceptron je pak trénován pro otisk prstu patřící do jiné třídy.
- **Hybridní** - Kombinují dvě nebo více metod klasifikace. U těchto metod se dosahuje vyšší přesnosti.



Obrázek 3.1: Schéma algoritmu metody *rule-based* [10].



Obrázek 3.2: Klasifikační postup syntaktickou metodou [12].



Obrázek 3.3: Ukázka použití strukturální metody na otisk prstu třídy spirála. Vlevo je graf určující typ třídy a vpravo je znázorněno rozčlenění pole orientací na homogenní oblasti [12].

3.1 Přesnost metod pro klasifikaci otisků prstů

Přesnost klasifikačních metod je často měřen poměrem chyby nebo správností. Poměr chyby je počítán jako poměr mezi počtem neklasifikovaných otisků prstů a celkovým počtem otisků prstů z testované množiny; správnost je procentuální vyjádření správně klasifikovaných otisků.

Detailní analýza chování klasifikačních metod může být např. vyjádřena tabulkou 3.1, kde řádky určují správnou klasifikační třídu (A - oblouk, L - levá smyčka, R - pravá smyčka, W - spirála a T - klenutý oblouk) a sloupce hypotetickou třídu; každá buňka v řádku a sloupci tabulky pak vyjadřuje kolik otisků prstů patřících do třídy na řádku je (ne)správně zařazeno do třídy ve sloupci.

Tabulka 3.1: Ukázka tabulky počtu správně a nesprávně klasifikovaných otisků [4].

správná třída	hypotetická třída				
	A	L	R	W	T
A	387	7	10	1	15
L	3	373	2	4	14
R	4	1	381	9	3
W	0	4	7	391	0
T	6	3	7	5	373

Nekvalitní obrázky otisků prstů je často obtížné klasifikovat, dokonce i pro člověka. V mnoha aplikacích je žádoucí, aby algoritmus pro klasifikaci otisků prstů takové obrázky odmítl, což je z hlediska identifikace otisku vhodnější než nesprávné zařazení. Z tohoto důvodu několik klasifikačních metod zahrnuje mechanizmus odmítnutí, který zlepšuje správnost za cenu vyřazení některých otisků. Jednoduše se odmítají ty otisky, jejíž spolehlivost leží pod určitým prahem kvality obrázku.

Naopak u některých implementací pomocí neuronových sítí je nekvalitní otisk prstu zařazen do klasifikační třídy na základě pravděpodobnosti přirozeného rozložení otisků, o němž je zmíněno v podkapitole 2.4.1.

Tabulka 3.2: Klasifikační metody a jejich přesnost [14].

autoři	rysy	metoda	přesnost (RR)
Kawagoe a Tojo 1984	singulární body	<i>rule-based</i>	91.5% (0%)
Blue 1994	pole orientací	neuronová síť	92.8% (0%)
Wilson 1994	pole orientací	neuronová síť	90.2% (0%)
Candela 1995	pole orientací	neuronová síť	92.2% (0%)
Pal a Mitra 1996	pole orientací	neuronová síť	82.0% (0%)
Fitz a Green 1996	FFT	<i>k-nearest neighbor</i>	85.0% (0%)
Karu a Jain 1996	singulární body	<i>rule-based</i>	85.0% (0%)
Senior 1997	papilární linie	<i>Hidden Markov Model</i>	90.0% (0%)
Chong 1997	papilární linie	<i>rule-based</i>	96.5% (0%)
Hong a Jain 1999	singulární body	<i>rule-based</i>	87.5% (0%)
Proposed 1999	<i>Gabor response</i>	hybridní	90.0% (1.8%)
Cappelli 2000	pole orientací	hybridní	99.0% (20%)

3.2 Jiné metody klasifikace

Hlavním problémem klasifikačních schémat, o nichž je diskutováno v podkapitole 2.4.1 má za následek, že počet klasifikačních tříd je malý a otisky prstů nejsou rovnoměrně rozděleny do klasifikačních tříd. Více než 90% otisků patří do tří klasifikačních tříd tj. spirála, levá smyčka a pravá smyčka.

Tuto nevýhodu se snažila omezit metoda, při níž byly osobě sejmuty otisky ze všech prstů. U každého otisku prstu se poté provedla klasifikace a byl tak vytvořen desetimístný kód, který vedl k redukování počtu porovnání otisků prstů v databázi.

S tímto problémem nerovnoměrného rozdělení otisků prstů do tříd se také vypořádaly další dvě metody, a to subklasifikace a postupná klasifikace [12].

Cílem **subklasifikace** je další dělení klasifikačních tříd do speciálnějších kategorií. Tuto metodu typicky využívají lidé k provedení manuálního vyhledání otisku. Například FBI definovala manuální subklasifikační proceduru pro smyčky a spirálu otisku prstu založenou na počtu papilárních linií mezi jádrem a delhou pro pravou a levou smyčku a pro spirálu počtem papilárních linií mezi dvěma deltami.

Implementace a spolehlivost automatické subklasifikace je mnohem více náročná, než standardní klasifikace do pěti tříd. Z tohoto důvodu je navrženo velmi omezené množství algoritmů.

Obtížnost v automatické klasifikaci vede ke zkoumání systémů, které nejsou založeny na definovaných třídách dle otisků prstů. Ve skutečnosti není pro aplikace potřeba Henryho klasifikační schéma. Cílem je výhradně minimalizovat počet porovnávání otisků prstů během vyhledávání. Zajímavou metodou je **postupná klasifikace**, kde otisky nejsou rozděleny do skupin, ale spojovány s numerickými vektory shrnující jejich hlavní rysy. Charakteristické vektory jsou vytvořeny transformací tak, že podobné otisky jsou mapovány blízko sebe v multidimensionálním prostoru. Vyhledávání je vykonáváno shodou vstupního otisku, jehož vektory jsou blízko hledaného otisku. Tato metoda může být využita pro indexování velkých databází otisků prstů.

Kapitola 4

Návrh metody pro klasifikaci otisků prstů

4.1 Nutné kroky k úspěšné klasifikaci otisků prstů

Otisk prstu není možné přímo klasifikovat. Je zapotřebí zpracovat obraz otisku prstu do takové podoby, jež zvyšuje přesnost určení klasifikační třídy. Toho lze dosáhnout segmentací a filtrací obrazu.

4.1.1 Segmentace obrazu

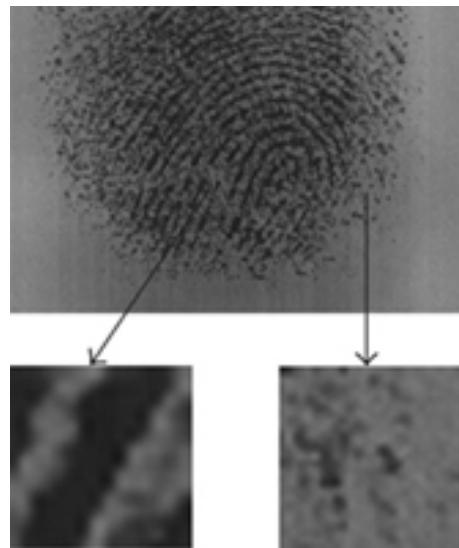
Otisk prstu se běžně skládá ze dvou složek, a to popředí a pozadí. Popředí je složka, která vznikla spojením otisku prstu se senzorem. Okolí šumu na hranicích obrazu otisku prstu se nazývá pozadí.

Hlavním cílem segmentace je rozhodnout, která část obrazu patří popředí zahrnující rysy pro spolehlivé rozpoznání a identifikaci, a která část obrazu je pozadím s oblastmi šumu. Kvalitní segmentace obrazu zajišťuje nejenom správnou extrakci rysů z otisku prstu jako jsou markanty nebo singularity, ale také redukuje systémové nároky pro další zpracování.

Segmentaci obrazu je možné provádět po blocích nebo po obrazových bodech (pixelech). K určení zda pixel nebo blok náleží pozadí nebo popředí, je zapotřebí vycházet z charakteristických vlastností zkoumaného obrazu. Standardní databáze otisků prstů mají otisky v 256 odstínech šedi. V obrazu otisku prstu jsou papilární linie reprezentovány tmavými pixely, zatímco prohlubeniny jsou reprezentovány světlými pixely. Ideální tmavý pixel má hodnotu 0 a ideální světlý pixel má hodnotu 255. V pracích [2, 17, 5], jež se zabývají segmentací otisků prstů jsou využity tyto statistické vlastnosti obrazu:

- **Střední hodnota** - Pro většinu senzorů může být struktura otisku prstu (vyvýšeniny a prohlubně) approximována černými a bílými liniemi. Popředí je tedy tvořeno černými a bílými liniemi, zatímco pozadí, kde se otisk nedotýkal snímače je spíše bílé. To znamená, že střední hodnota černé složky je vyšší v popředí, než v pozadí. V některých případech jsou otisky prstů příliš vlhké nebo příliš suché. Na těchto otiscích prstů nelze použít střední hodnotu.
- **Rozptyl** měří odchylku v lokálním okolí. Jelikož papilární linie jsou tvořeny většinou tmavými pixely a naopak prohlubně mezi těmito papilárními liniemi jsou tvořeny světlými pixely, tak v oblasti popředí je tato odchylka jasových intenzit pixelů výrazně vyšší, než je tomu v pozadí. Rozptylem lze převážně identifikovat rozmazené oblasti.

- **Kontrast** je definován jako poměr mezi střední hodnotou a rozptylem.
- **Koherence** dává míru, jak jsou gradienty vázány ve stejném směru. Struktura otisku prstu je složena hlavně ze souběžných papilárních linií. Koherence je výrazně vyšší v popředí než v pozadí a je v intervalu $< 0,1 >$. Koherence v popředí se blíží k 1, zatímco v pozadí se blíží k 0, protože směry gradientů jsou v oblastech šumu chaotické.
- **Clusters degree (CluD)** měří jak jsou podobné jasové intenzity pixelů v otisku prstu shlukovány. Ukázkou je obrázek 4.1, znázorňující dva bloky s rozdílnými shluky jasových intenzit pixelů.



Obrázek 4.1: *CluD* je výrazně vyšší v levém bloku otisku prstu než v pravém bloku [5].

Otisky prstů nasnímané z různých druhů senzorů mají různé charakteristiky. V některých databázích otisků prstů dosahuje lepších výsledků segmentace pomocí *CluD* a v jiných rozptyl atd. Pro lepší segmentaci je vhodné použít více statistických vlastností obrazu uvedených výše. Kombinaci některých uvedených statistických vlastností obrazu v závislosti na chybě segmentace představuje tabulka 4.1.

Tabulka 4.1: Vztah použitých statistických vlastností obrazu k chybě segmentace (modifikováno z [2]).

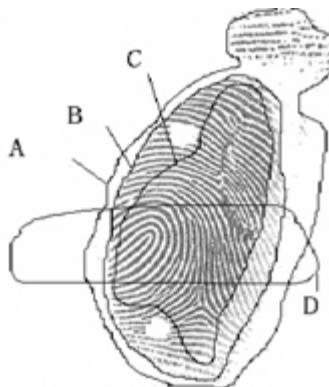
statistické vlastnosti obrazu	chyba
koherence	19.5%
střední hodnota	14.4%
rozptyl	9.9%
koherence, střední hodnota	11.1%
koherence, rozptyl	8.9%
střední hodnota, rozptyl	7.2%
koherence, střední hodnota, rozptyl	6.8%

Segmentace použitím více statistických vlastností se provádí pomocí lineárního klasifikátoru tj. funkce, která rozhoduje sekvenčně, zda daný pixel nebo blok patří popředí či ne.

Lineární klasifikátor musí mít vhodně nastaveny své koeficienty, dle kterých se rozhoduje. Nastavení koeficientů se provádí pomocí neuronové sítě na trénovací množině otisků prstů.

Zajímavým přístupem k segmentaci otisků prstů s využitím Markových řetězců a metody Monte Carlo lze nalézt v [18]. Pomocí Markových řetězců se generuje prvně náhodná sekvence uzavřených křivek, které jsou považovány za hranici mezi popředím (otiskem prstu) a pozadím obrazu. Ukázkou takto generovaných křivek je obrázek 4.2.

Poté je na každou takovou křivku simulována metoda Monte Carlo, na základě níž se provede vyhodnocení. Křivka, která byla ohodnocena nejvíce, je považována za pomyslnou hranici mezi popředím a pozadím. Tato metoda je vhodná i pro méně kvalitní otisky prstů.



Obrázek 4.2: Generované křivky na otisku prstu pomocí Markových řetězců [18].

4.1.2 Předzpracování - filtrace obrazu

Předzpracování obrazu slouží ke zlepšení obrazu z hlediska dalšího zpracování. Jedná se o operaci na nízké úrovni abstrakce. Cílem filtrace je potlačit šum vzniklý při digitalizaci obrazu, odstranit zkreslení dané vlastnostmi snímacího zařízení, nebo také zvýraznit či potlačit jiné rysy obrazu důležité z hlediska dalšího zpracování. Filtraci lze rozdělit do dvou skupin [15]:

- **Vyhlezování obrazu** vede k potlačení vysších frekvencí jasových intenzit pixelů. Žádaným výsledkem vyhlazování je potlačení náhodného šumu. Současně také dochází při této operaci k rozmaďávání hran v obrazu.

Příkladem vyhlazování obrazu může být obyčejné průměrování. Každému bodu se přiřazuje nová intenzita jasu, jež vznikne aritmetickým průměrem původních intenzit jasů ve svém okolí.

- **Gradientní operace** naopak vedou ke zdůraznění vysších frekvencí a používají se k ostření obrazu. Žádaným výsledkem je zvýraznění hran v obrazu. Při gradientních operacích jsou také zvýrazněny šumové body. Některé algoritmy tedy kombinují dva postupy, při kterých je obraz vyhlazován a ostřen současně.

V digitalizovaném otisku prstu se často vyskytují anomálie (rozdíl jasových intenzit sousedních pixelů je příliš vysoký). Vlivem těchto anomalií gradienty jednotlivých pixelů mohou nabývat širokou škálu směrů, což znepřesňuje výslednou orientaci bloku papilární linie. Obraz otisku prstu je tedy vhodné vyhladit.

4.2 Výběr vhodné metody klasifikace otisků prstů

Nejvyšší přesnosti zařazení do správné klasifikační třídy patrné z tabulky 3.2 dosahují metody hybridní a metody založené na neuronových sítích, ale na druhou stranu jsou poněkud složitějšího charakteru a implementačně náročné.

Metody syntaktické a statistické se v současné době téměř nevyskytují, neboť vykazují nedostačující výsledky.

Nejhodnější metodou se tedy jeví metoda *rule-based*, která je založena na vyhledávání singulárních bodů v poli orientací papilárních linií. V budoucnu může být tato metoda rozšířena právě o již zmíněnou metodu založenou na neuronových sítích a vytvořit tak hybridní klasifikátor, jenž by vykazoval vyšší spolehlivost zařazení otisku prstu do správné klasifikační třídy.

U této metody jsou výše zmíněné problémy se šumem v obrazu. Způsobuje to její nepřesnost a proto bude kladen důraz na co nejvyšší redukci šumu, což bude mít za následek dosažení vyšší spolehlivosti zařazení otisku do správné klasifikační třídy.

4.3 Možné přístupy ke zvolené metodě

Zvolená metoda klasifikace využívá pole orientací papilárních linií, na němž je poté provedena detekce singulárních bodů. Detektace závisí právě na velikosti tohoto pole.

První myšlenka vycházela z faktu, že v otisku prstu se nachází oblasti s variabilní hustotou papilárních linií. Ukázkou je obrázek 4.3. Nejmenší hustota papilárních linií se nachází převážně na špičce otisku prstu. Bylo by tedy vhodné vytvářet pro každou oblast pole orientací o takové velikosti, která by se odvíjela na základě hustoty papilárních linií dané oblasti. Tímto postupem by byla zajištěna vyšší citlivost na následnou detekci singulárních bodů.

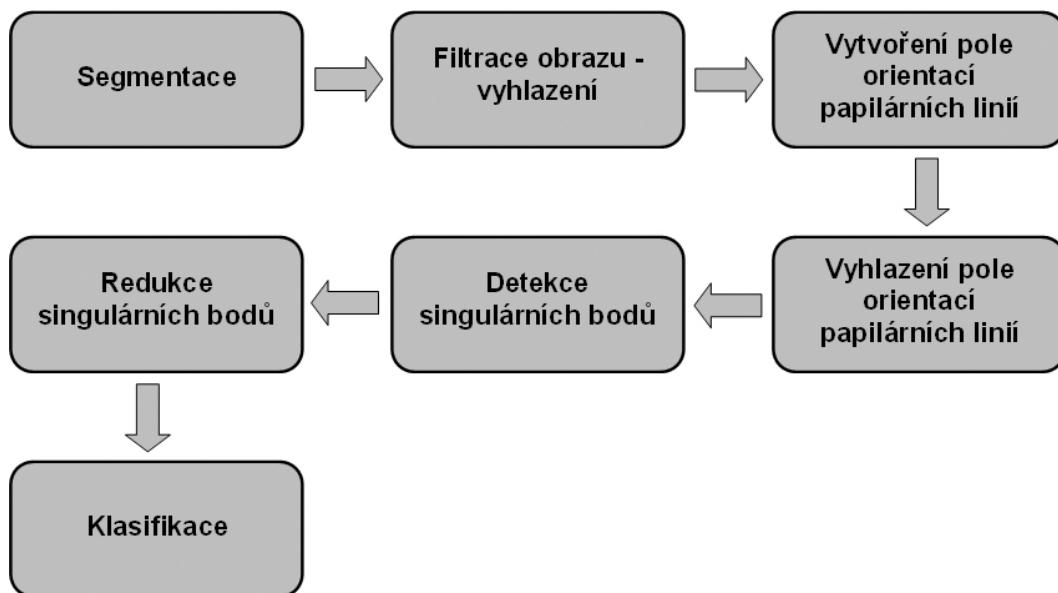
Bohužel tento přístup má svá úskalí právě v určení velikosti bloku (pro pole orientací), ze kterého je odvozena orientace. Velikost malého bloku znemožňuje určení správné orientace vlivem šumu nebo např. zakončení papilární linie. Naopak větší velikost bloku umožňuje přesnější odhad orientace, ale následná detekce singulárních bodů bude méně citlivá. Vhodná velikost bloku by se musela statisticky odvodit, dle hustoty papilárních linií a velikosti plochy, jež zabírájí oblasti se šumem. Takový odhad je výpočetně náročný, ne-li nemožný. Proto je tedy vhodné volit optimální a konstantní velikost bloku pro celou databázi otisků prstů.



Obrázek 4.3: Hustota papilárních linií otisku prstu. Světlé oblasti vykazují vyšší hustotu papilárních linií a tmavé oblasti naopak nižší hustotu [11].

Konečný návrh klasifikace otisků prstů vystihuje blokové schéma 4.4, jež tvorí posloupnost kroků k zařazení otisku do správné klasifikační třídy:

1. **Segmentace obrazu** - Odstranění pozadí z obrazu otisku prstu. Z hlediska klasifikace nás zajímá pouze otisk prstu. Na pozadí se mohou vyskytovat šumy, které vedou k falešné detekci singulárních bodů. V tomto případě se neprovádí žádné manipulace s původním obrazem. Segmentace se bude provádět po blocích. Vytvoří se matice, podle které se identifikuje zda ten, či onen blok patří pozadí, resp. popředí.
2. **Filtrace obrazu - vyhlazení** - Před vytvořením pole orientací je vhodné obraz vyhladit. Tímto úkonom lze zvýšit přesnost určení orientací. Pro snížení výpočetních nároků bude filtrace použita jen na bloky, které patří otisku prstu. Filtrace bude provedena obyčejným průměrováním jasových intenzit pixelů v okně o velikosti 3×3 .
3. **Vytvoření pole orientací papilárních liní** - Zkoumaná část otisku prstu bude rozdělena na bloky o velikosti $n \times n$. Pro každý blok se vypočte orientace pomocí gradientů ze všech pixelů náležících danému bloku.
4. **Vyhlanění pole orientací papilárních liní** - Pro bloky, u nichž se nachází šumy je orientace papilární linie nepřesná. Tuhle nepřesnost lze minimalizovat průměrováním orientací přes masku o velikosti 3×3 nebo 5×5 .
5. **Detekce singulárních bodů** - Z vytvořeného pole orientací je možné detektovat singulární body dle Poincaréova indexu, který je blíže vysvětlen v podkapitole 5.3.
6. **Redukce singulárních bodů** - Vlivem šumů, které se nepodařilo odstranit ani vyhlazením pole orientací, mohou být detektovány falešné singulární body. Je zapotřebí omezit počet singulárních bodů jen na ty nejpravděpodobnější.
7. **Klasifikace** - Je prováděna na základě počtu a polohy singulárních bodů.



Obrázek 4.4: Posloupnost kroků vedoucí k zařazení otisku do klasifikační třídy.

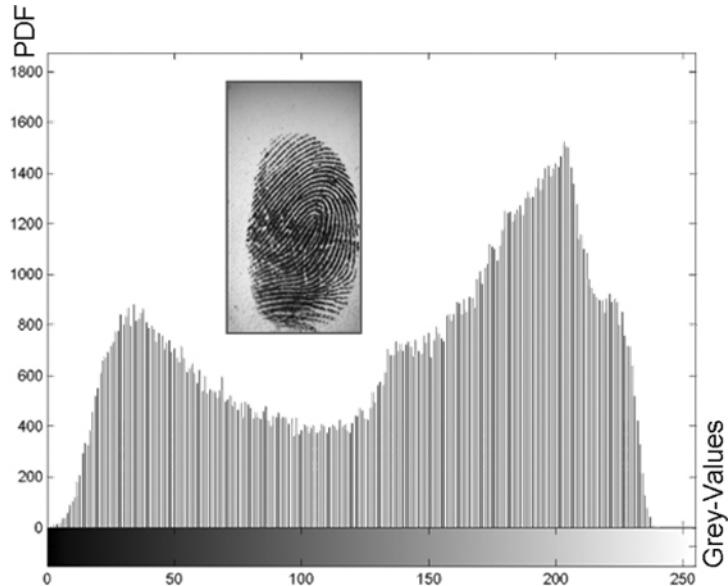
Kapitola 5

Implementace navržené metody

5.1 Segmentace obrazu

Segmentace otisků prstů je založena na prahování po blocích. Jelikož otisky prstů mají různou světlost, je nutné určovat práh interaktivně.

Takovéto určování je provedeno na základě analýzy histogramu celého obrazu. Ve většině případů jsou jasové intenzity pixelů v popředí (otisku prstu) výrazná od pozadí. Tímto vzniká dvouvrcholový histogram - viz obrázek¹ 5.1, kde jeden vrchol odpovídá četnosti jasových intenzit pozadí a druhý vrchol odpovídá jasovým intenzitám popředí. Mezi těmito vrcholy se nachází jasové intenzity, které se vyskytují v obrazu nejméně. Proto je vhodné určit prahovou hodnotu jasové intenzity mezi těmito dvěma vrcholy.



Obrázek 5.1: Dvouvrcholový histogram jasových intenzit otisku prstu. Prahová hodnota se nachází mezi těmito vrcholy [9].

Segmentaci prahováním v závislosti na jasové intenzitě pixelů se v obrazu může vyskytovat více objektů, jako je tomu na obrázku 5.2. Bylo tedy nutné identifikovat pouze otisk prstu.

¹obrázek poskytl Ing., Dipl.-Ing. Martin Drahanský, Ph.D.

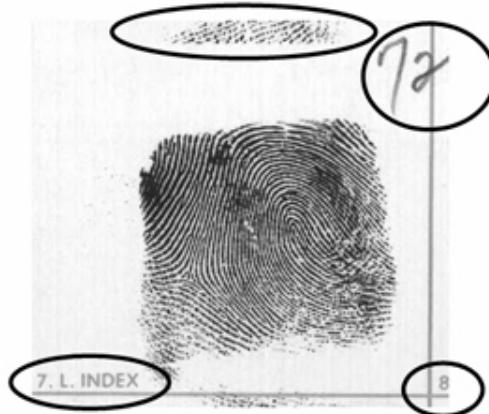
Nejprve byla implementována identifikace pomocí algoritmu barvení oblastí. Algoritmus barvení oblastí je následující [15]:

1. Obraz je procházen po řádcích a každému nenulovému elementu se přiřadí hodnota jeho sousedních elementů, pokud elementy existují. Jsou-li všechny elementy částí pozadí (mají nulovou hodnotu), přiřadí se elementu dosud nepřidělená hodnota. Má-li jeden ze sousedních elementů nenulovou hodnotu, přiřadí se tato hodnota obarvovanému elementu. Má-li více sousedních elementů nenulovou hodnotu a jejich hodnoty jsou různé, přiřadí se obarvovanému elementu jedna z hodnot a zároveň se uloží do datové struktury hodnoty sousedních elementů (ekvivalence barev).
2. Po průchodu celého obrazu jsou všechny elementy náležící oblastem obarveny. Některé oblasti jsou však obarveny více barvami (díky kolizím). Je proto nutné projít obraz znova a podle informací o ekvivalenci barev se přebarví elementy jinou hodnotou.

Jelikož otisk prstu zabírá větší část obrazu než jiné nevhodné objekty, pak otisk prstu byl identifikován nejvíce použitou barvou. Tento algoritmus byl výpočetně náročný, neboť se obraz procházel dvakrát a bylo nutné také kontrolovat kolize barev v datové struktuře.

Konečnou verzí je algoritmus narůstání oblastí. Nejprve musí být určeno „semínko“ tj. počáteční blok který patří otisku prstu. Je určeno rozdelením obrazu na 5×5 stejných bloků, z nichž se vypočítá průměrná jasová intenzita pixelů. Blok, který má nejnižší průměrnou jasovou intenzitu značí, že se jedná o oblast otisku prstu. V tomto je následně vybráno vhodné „semínko“ a na základě podobnosti jasových intenzit svých sousedních bloků je oblast rozšiřována.

Tento algoritmus je výpočetně méně náročný, než předchozí algoritmus barvení oblastí, neboť se zpracovávají pouze bloky, které sousedí s narůstající oblastí.



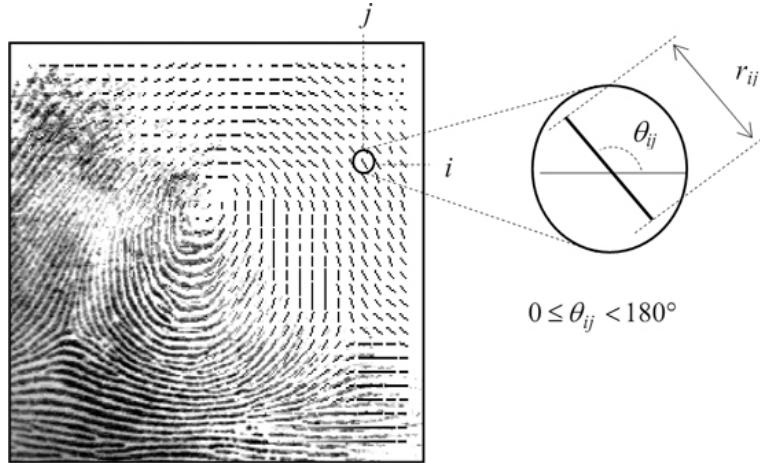
Obrázek 5.2: Objekty v obrazu otisku prstu, kterých je nutno se vyvarovat pro další zpracování.

5.2 Pole orientací papilárních linií

Pole orientací papilárních linií je důležitou součástí pro klasifikaci otisků prstů. Je využíváno takřka všemi metodami klasifikace a taktéž i metodami pro vylepšení otisku prstu, jako je

ztenčování papilárních linií.

Obraz otisku prstu je rozdělen do několika nepřekrývajících se bloků. V každém bloku je následně spočítán gradient a z toho následně odvozen úhel papilární linie. Úhel natočení papilárních linií představuje obrázek 5.3 Zde stojí za povšimnutí, že se neurčuje směr papilárních linií, takže např. úhel 90° může být také 270° . Směr papilární linie by bylo algoritmicky náročné určit a tak úhel papilární linie nabývá od 0° do 179° , což je postačující pro pozdější rozpoznání singulárních bodů.

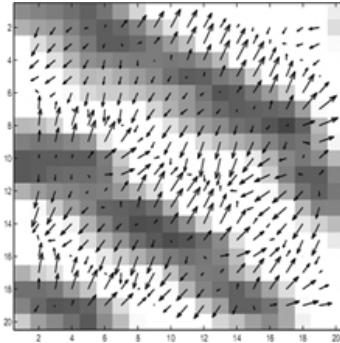


Obrázek 5.3: Část pole orientací papilárních linií v otisku prstu [11].

5.2.1 Výpočet orientace bloku

Orientace papilární linií v bloku je určena gradienty, jejichž směry jsou na ni kolmé. Tyto gradienty jsou počítány pro každý bod bloku B dle jasových intenzit. Dominantní orientace je určena průměrem těchto gradientů. Na obrázku 5.4 jsou zobrazeny gradienty jednotlivých bodů. Z toho je patrné, že nelze použít obyčejný aritmetický průměr. Gradienty na obou stranách papilární linií jsou si opačné a tak by se vzájemně vyrušily. Řešením tohoto problému je zdvojnásobení úhlů gradientů před průměrováním. V praxi je však dvojnásobný úhel roven čtverci vektoru gradientu $[g_{sx}, g_{sy}]^T$. Průměr čtvercových gradientů $[\bar{g}_{sx}, \bar{g}_{sy}]^T$ je pak počítán vztahem (5.1).

$$\begin{bmatrix} \bar{g}_{sx} \\ \bar{g}_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_B g_{sx} \\ \sum_B g_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_B (g_x^2 - g_y^2) \\ \sum_B 2g_x g_y \end{bmatrix} \quad (5.1)$$



Obrázek 5.4: Směry a velikosti gradientů pro jednotlivé pixely papilárních linií v bloku [6].

Standardně se provádí výpočet orientace bloku nezávisle na okolních blocích. Pro vyšší odolnost vůči šumu je implementována myšlenka z [16]. Je založena na váhovém průměrování gradientů. Porovnání výsledných orientací pomocí váhového průměrování gradientů a standardní metody výpočtu orientace znázorňuje obrázek 5.5.

Pro výpočet orientace bloku A, jenž znázorňuje obrázek 5.6 jsou vypočteny váhové koeficienty w_Γ pro všechny tyto bloky. Váhový koeficient w_Γ je dán vztahem $w_\Gamma = C \cdot r_\Gamma$, kde C je koherence příslušného bloku a r_Γ je konstanta určena v závislosti na vzdálenosti od cílového bloku. Pro cílový blok A je tato konstanta 1/4, pro bloky B je 1/8 a pro bloky C je 1/16. Výsledný gradient $[\bar{g}_{sx}, \bar{g}_{sy}]^T$ cílového bloku A je určen vztahem (5.2), kde Γ určuje bloky 1 až 9.

$$\begin{bmatrix} \bar{g}_{sx} \\ \bar{g}_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum w_\Gamma \cdot \bar{g}_{sx} | \Gamma \\ \sum w_\Gamma \cdot \bar{g}_{sy} | \Gamma \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Jak bylo již zmíněno výše, úhel orientace je kolmý na výsledný úhel gradientu, jenž vznikl průměrováním gradientů v každém pixelu bloku. Výsledná orientace O je tedy dána vzorcem

$$O = \frac{1}{2} \angle(\bar{g}_{sx}, \bar{g}_{sy}) + \frac{\pi}{2}. \quad (5.3)$$

5.2.2 Výpočet gradientu v bodě

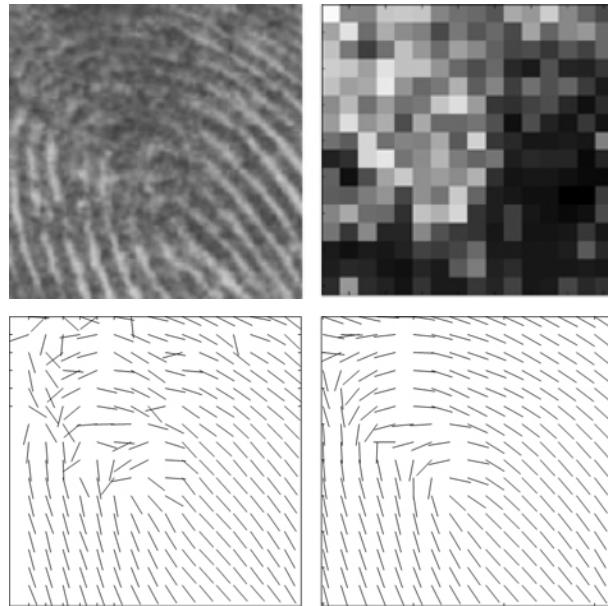
Gradientní složky v digitalizovaném obrazu pro n určující vzdálenost pixelů jsou dány následujícími vztahy:

$$\nabla_x g(x, y) = g(x, y) - g(x - n, y) \quad (5.4)$$

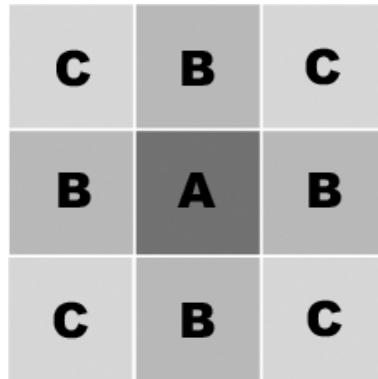
$$\nabla_y g(x, y) = g(x, y) - g(y, x - n). \quad (5.5)$$

Výpočet gradientu pro malé okolí, jako dvou sousedních bodů, je méně vhodný, neboť se tak zvyšuje citlivost na šum. Pro lepší approximaci gradientu je implementován Sobelův operátor pro konvoluční masku o velikosti 3×3 . Vertikální a horizontální konvoluční masky jsou ve vztahu (5.6), kde h_x je pro horizontální složku gradientu a h_y pro vertikální složku gradientu.

$$h_x = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad h_y = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix} \quad (5.6)$$



Obrázek 5.5: Nahoře je otisk prstu a jemu příslušná koherence. Tmavé body značí vyšší koherenci a světlé body naopak nižší. Vlevo dole vidíme orientace získané na základě standardní metody a vpravo dole orientace získané váhovým průměrováním gradientů a koherence [16].



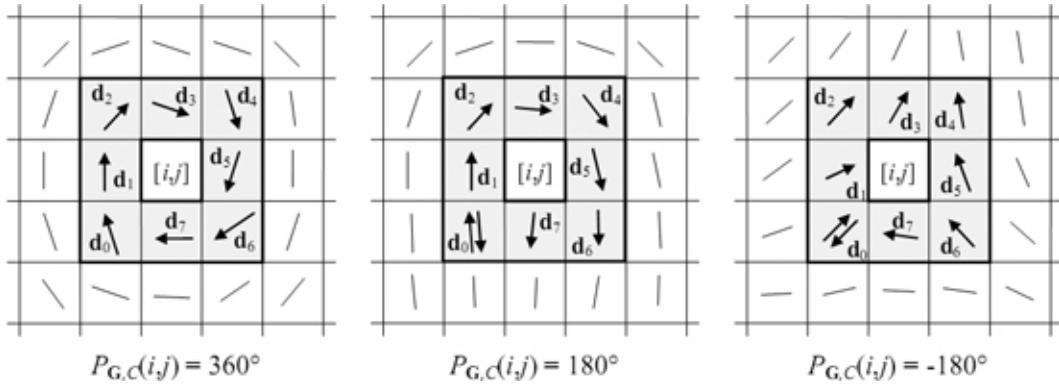
Obrázek 5.6: Oblast ze které je počítána orientace pro cílový blok A.

5.3 Detekce singulárních bodů

Singulární body jsou globální charakteristiky otisku prstu, které umožňují klasifikovat otisk prstu. Nejznámější metoda detekce singulárních bodů je založena na Poincaréově indexu [11, 12], který představuje algebraický součet všech sousedních rozdílů úhlů z pole orientací.

Takovou detekci znázorňuje obrázek 5.7. Pro výpočet Poincaréova indexu $P_{(i,j)}$ elementu na souřadnicích (i, j) musí být tento element obklopen okolními elementy $d_0 - d_7$, které představují úhel papilární linie z pole orientací. Poté se Poincaréův index $P_{(i,j)}$ spočítá jako algebraický součet rozdílů úhlů všech sousedních elementů $d_0 - d_7$.

Ke scítání rozdílů úhlů je nutné přiřadit každému elementu původní směr. Řešením je náhodné zvolení směru prvního elementu orientace a poté vždy následujícímu elementu přiřadit směr nejbližší předchozímu.



Obrázek 5.7: Detekce singulárních bodů v poli orientací pomocí Poincaréova indexu. Vlevo detekce singulárního bodu typu jádro (spirála), uprostřed detekce singulárního bodu typu jádro (smyčka) a vpravo detekce singulárního bodu typu delta [11].

Poincaréův index může nabývat jen diskrétních hodnot. V případě singulárních bodů u otisků prstů může být $P_{(i,j)}$ rovno [11]:

- 0° pokud $P_{(i,j)}$ neodpovídá žádnému singulárnímu bodu
- 360° pokud $P_{(i,j)}$ odpovídá singulárnímu bodu typu jádro (spirála)
- 180° pokud $P_{(i,j)}$ odpovídá singulárnímu bodu typu jádro (smyčka)
- -180° pokud $P_{(i,j)}$ odpovídá singulárnímu bodu typu delta.

5.4 Klasifikace

Z níže uvedené tabulky 5.1 je patrné, že zařazení otisku prstu do klasifikační třídy oblouk a spirála bude jednoduchá, neboť mají různý počet jader a delt než ostatní.

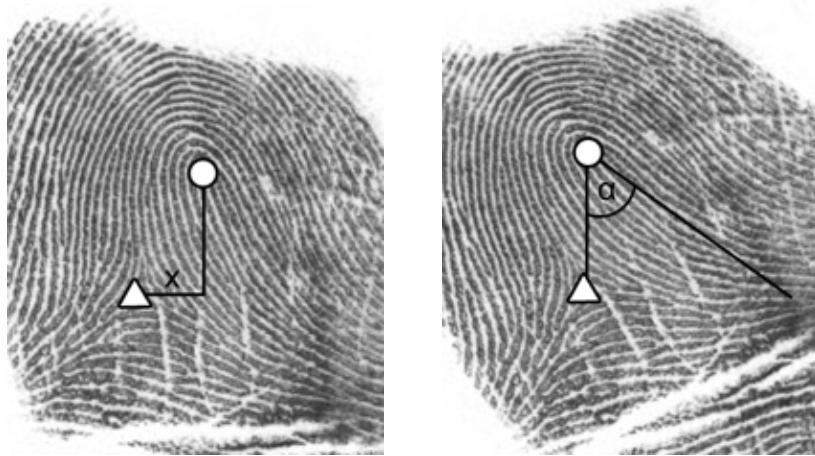
Problém nastává u klasifikačních tříd klenutý oblouk, levá smyčka a pravá smyčka. Mají totiž jedno jádro a jednu deltu. Určení klasifikační třídy tedy závisí jen na poloze jádra a delty v otisku prstu. Je nezbytně nutné mít informace o poloze jader a delt.

Nejjednodušším přístupem k určení klasifikační třídy výše zmíněných otisků prstů by bylo možné určit dle horizontální vzdálenosti polohy delty a jádra, jak je tomu na obrázku 5.8 vlevo. Tento přístup však nepřináší vhodné výsledky u natočených otisků prstů v obrazu.

Určení klasifikační třídy je tedy provedeno na základě svírajícího úhlu orientací paralelních linií a polohy jádra a delty viz obrázek 5.8 vpravo.

Tabulka 5.1: Klasifikační třídy dle počtu singulárních bodů [19].

třída	jádro	delta
oblouk	0	0
klenutý oblouk	1	1 (uprostřed)
levá smyčka	1	1 (vpravo)
pravá smyčka	1	1 (vlevo)
vír	2	2



Obrázek 5.8: Vlevo: určení klasifikační třídy otisku prstu na základě horizontální vzdálenosti delty a jádra; Vpravo: určení klasifikační třídy otisku prstu na základě velikosti úhlu.

Pro kompletně nasnímaný otisk prstu platí, že počet jader je roven počtu delt. Otisk prstu lze pak jednoznačně klasifikovat. Ve skutečnosti některé snímky neobsahují celý otisk prstu. Obvykle se ztratí jedna nebo dvě delty, neboť jsou pro levou smyčku, pravou smyčku a spirálu po stranách otisku prstu. V těchto případech nejsou jádra rovna počtu delt, je proto vhodné určit klasifikační třídu na základě „vypárování“ chybějících singulárních bodů.

Tabulka 5.2 představuje možné kombinace počtu singulárních bodů a jejich pravděpodobnou klasifikační třídu.

Tabulka 5.2: Možné klasifikační třídy dle počtu singulárních bodů, kde Ω vyjadřuje počet chybějících singulárních bodů [8].

Ω	jádro	delta	pravděpodobná třída
0	0	0	oblouk
0	1	1	klenutý oblouk, levá smyčka, pravá smyčka
0	2	2	spirála
1	1	0	klenutý oblouk, levá smyčka, pravá smyčka
1	2	1	spirála
2	2	0	spirála

K určení třídy pro klenutý oblouk, levou a pravou smyčku je nutné znát polohu delty. Pokud se delta v otisku prstu nevyskytuje, nelze klasifikovat otisk prstu.

Na „živém“ otisku prstu se mohou vyskytovat maximálně čtyři singulární body tj. klasifikační třída spirála. U nasnímaného otisku nízké kvality mohou být i navíc detekovány falešné singulární body. Je proto nutné redukovat jejich počet pro zařazení do klasifikační třídy. Ze známého faktu, že nejvýše položený singulární bod je jádro, je vhodné zkoumat posloupnost čtyř po sobě jdoucích singulárních bodů od prvního nalezeného jádra.

Kapitola 6

Dosažené výsledky a možnosti dalšího vývoje

6.1 Experimentální testy

K testovacím účelům bylo použito 1000 otisků prstů, které tvoří jen zlomek databáze otisků prstů *NIST Special Database 14* [13]. Tato databáze poskytuje otisky prstů v přirozeném rozdělení tříd, o němž je diskutováno v 2.4.1. V této databázi se nachází otisky prstů v 256 odstínech šedi s rozměry 832×768 pixelů. Jsou komprimovány použitím speciálního kompresního algoritmu *wavelet scalar quantization* (WSQ) [3], který poskytuje kvalitní otisky s vysokým kompresním poměrem (18:1).

V hlavičce každého takového souboru je informace o tom, do jaké klasifikační třídy byl otisk prstu zařazen *National Crime Information Center* (dále jen NCIC). Výsledná aplikace pro klasifikaci otisků prstů nepodporuje čtení tohoto speciálního typu souboru. Nebylo to ani předmětem této bakalářské práce. Bylo tedy nutné použít externí aplikaci (WSQ-Viewer) k převedení tohoto formátu souboru na jiný, běžně používaný (konkrétně PNG¹). Tento převod vedl samozřejmě ke ztrátě informace o příslušnosti otisku ke klasifikační třídě udělenou NCIC. Z tohoto důvodu jsem byl nucen na základě svých nabytých zkušeností touto prací roztrídit otisky prstů dle vlastního uvážení. V některých případech se vyskytovaly i takové otisky prstů, které byly neidentifikovatelné. Toto rozdělení otisků prstů blíže specifikuje tabulka 6.1. Obsahuje také informace o rozdělení otisků prstů pomocí mnou vytvořené aplikace pro bloky o velikosti 10×10 , 12×12 , 14×14 a 16×16 pix.

Další testy byly zaměřeny již na samotnou spolehlivost metody klasifikace otisků prstů, pro stejnou velikost výše zmíněných bloků. Provedené testy jsou zahrnuty v tabulkách 6.2 až 6.5, kde klasifikační třídy vysvětlují zkratky: A - oblouk, L - levá smyčka, R - pravá smyčka, W - spirála, T - klenutý oblouk.

¹Portable Network Graphics

Tabulka 6.1: Rozdělení otisků prstů.

klasifikační třída	manuální rozdělení	automatické rozdělení dle velikosti bloku			
		10 × 10 pix	12 × 12 pix	14 × 14 pix	16 × 16 pix
oblouk	28	36	37	46	51
levá smyčka	265	284	296	289	290
pravá smyčka	244	236	260	263	264
spirála	340	290	272	271	248
klenutý oblouk	26	49	42	45	51
nezařazeno	97	105	93	86	96

Tabulka 6.2: Test klasifikace otisků prstů pro blok o velikosti 10 × 10 pix. Celková úspěšnost správného zařazení je 71,43%.

správná třída	hypotetická třída				
	A	L	R	W	T
A	13	6	5	5	2
L	2	209	11	32	4
R	3	6	179	21	3
W	3	18	19	231	3
T	1	10	8	10	13

Tabulka 6.3: Test klasifikace otisků prstů pro blok o velikosti 12 × 12 pix. Celková úspěšnost správného zařazení je 74,75%.

správná třída	hypotetická třída				
	A	L	R	W	T
A	19	5	3	4	1
L	1	221	7	33	5
R	1	3	193	36	2
W	1	15	13	228	3
T	1	7	7	5	14

Tabulka 6.4: Test klasifikace otisků prstů pro blok o velikosti 14 × 14 pix. Celková úspěšnost správného zařazení je 76,30%.

správná třída	hypotetická třída				
	A	L	R	W	T
A	20	12	5	2	1
L	0	223	3	32	4
R	3	2	194	40	1
W	0	11	10	236	3
T	0	6	9	5	16

Tabulka 6.5: Test klasifikace otisků prstů pro blok o velikosti 16×16 pix. Celková úspěšnost správného zařazení je 74,10%.

správná třída	hypotetická třída				
	A	L	R	W	T
A	20	10	3	3	1
L	1	219	4	39	6
R	0	1	199	46	1
W	0	18	6	218	3
T	0	10	8	10	13

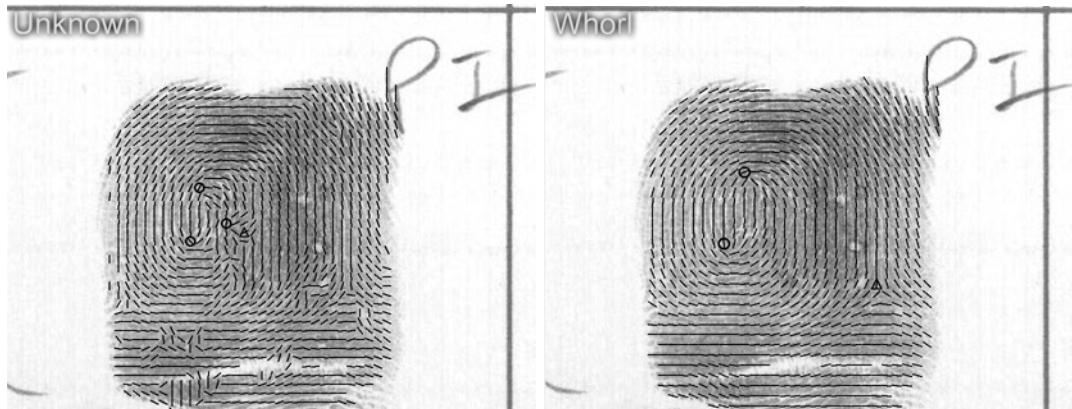
6.2 Zhodnocení dosažených výsledků

Z tabulek 6.2 až 6.5 je patrné, že průměrná spolehlivost určení klasifikační třídy se pohybuje na hranici 74%.

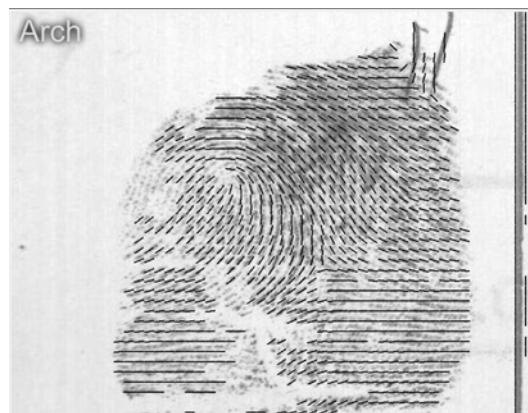
To je způsobeno převážně velkými rozmazenými oblastmi v otisku, z nichž není možno přesně určit směr papilární linie. V těchto rozmazených oblastech je pak větší pravděpodobnost detekce falešných singulárních bodů i přes vyhlazení pole orientací papilárních linií. Vyhlazení pole orientací papilárních linií je použito dvakrát za sebou, což přináší příznivější výsledky viz obrázek 6.1. Musí se však provádět v rozumné míře, neboť větší počet provedeného vyhlazení vede i ke ztrátě skutečných singulárních bodů.

Další příčinou je segmentace otisku prstu. Segmentace je prováděna prahováním bloků na základě analýzy jasových intenzit bodů v histogramu. Problém nastává u otisků, v nichž některé oblasti mají podobné pozadí viz obrázek 6.2. Tyto oblasti jsou segmentací odstraněny, což má v některých případech za následek ztráty singulárních bodů. Naopak otisky prstů, které splývají i s jinými objekty v obraze, např. popisky nebo ohrazení, jsou zahrnuty do oblasti zájmu, což vede v některých případech k falešné detekci singulárních bodů.

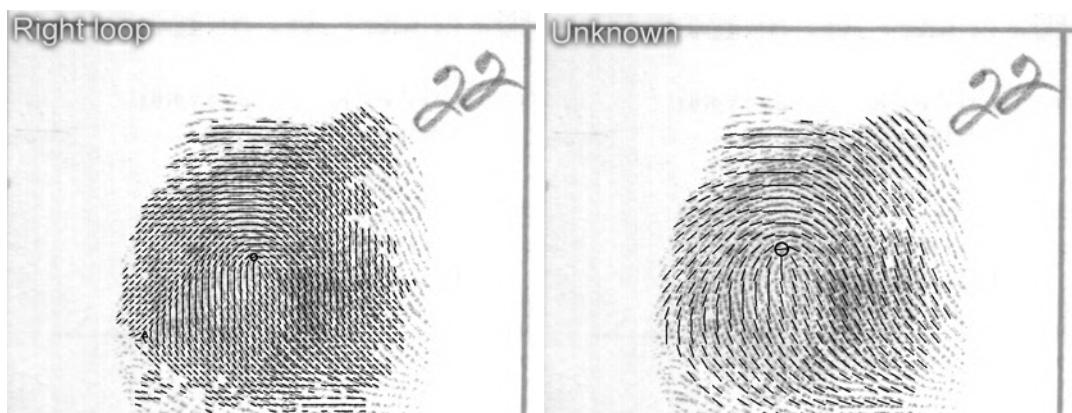
Je také těžké odhadnout vhodnou velikost bloku pro pole orientací papilárních linií. Větší velikost bloku je více rezistentní vůči šumu, ale méně citlivá na detekci singulárních bodů viz obrázek 6.3. Opakem toho je menší velikost bloku, která způsobuje i detekci falešných singulárních bodů.



Obrázek 6.1: Vlevo: otisk prstu bez vyhlazeného pole orientací, což většinou způsobuje falešnou detekci singulárních bodů; Vpravo: otisk prstu s vyhlazeným polem orientací a správně přiřazenou klasifikační třídou.



Obrázek 6.2: Nekvalitní otisk prstu levé smyčky, který má některé oblasti podobné pozadí. Takové oblasti jsou segmentací odstraněny, což má v tomto případě následek ztráty singulárních bodů. Jelikož v otisku prstu nebyly nalezeny žádné singulární body je klasifikován (nesprávně) jako oblouk.



Obrázek 6.3: Vlevo: správně přiřazená klasifikační třída pravá smyčka v poli orientací o velikosti bloku 10×10 pix; Vpravo: pro pole orientací o velikosti bloku 20×20 pix došlo ke ztrátě singulárního bodu a otisk tedy nebyl zařazen do žádné klasifikační třídy.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit spolehlivou metodu klasifikace otisků prstů. Pro tento účel jsem si zvolil klasifikační metodu zakládající se na detekci singulárních bodů v poli orientací pomocí Poincaréova indexu. Tato metoda však vykazuje nedostatky týkající se šumu v obrazu, a proto jsem kladl především důraz na jeho redukci. Dále jsem se zaměřil na aplikaci jako takovou, umožňující grafické zobrazení klasifikačních detailů otisku prstu.

Výsledkem mé práce je grafická aplikace implementovaná v programovacím jazyce C++ s využitím knihovny wxWidgets, která je právě předurčena pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní. Výhodou je také její multiplatformnost.

Aplikace poskytuje zobrazení pole orientací papilárních linií, singulárních bodů, oblasti zájmu a názvy klasifikačních tříd. Umožňuje také měnit velikost pole orientací a tím přizpůsobit citlivost klasifikace a dále provádět statistiku načtených otisků. Aplikace je velmi jednoduchá s intuitivním ovládáním.

Co se týče dosažené spolehlivosti, navržená metoda nevykazuje dosažené výsledky na takové úrovni, aby se dala použít v praxi. Problematika klasifikace otisků prstů má totiž rozsáhlejší charakter. Existují i sofistikovanější metody klasifikace otisků prstů, které jsou implementačně více náročné. V budoucnu by se tento návrh mohl rozšířit právě o další metodu klasifikace a zvýšit tím tak celkovou spolehlivost. Toto se používá běžně v praxi.

Další možnost pro zdokonalení spolehlivosti by mohla poskytnout kvalitnější segmentace obrazu otisku prstu za pomocí více statistických vlastností obrazu, o nichž je diskutováno v podkapitole 4.1.1.

V aplikaci by mohl být zabudován také dekodér pro čtení otisků prstů ve formátu WSQ¹, neboť tento formát je standardem pro databáze otisků prstů. V jeho hlavičce jsou zahrnuti informace o tom do jaké třídy byl otisk zařazen (určené NCIC). To by mohlo vést k přesnému zhodnocení klasifikační metody a tak porovnat úspěšnost i s jinými metodami klasifikace.

¹Wavelet Scalar Quantization

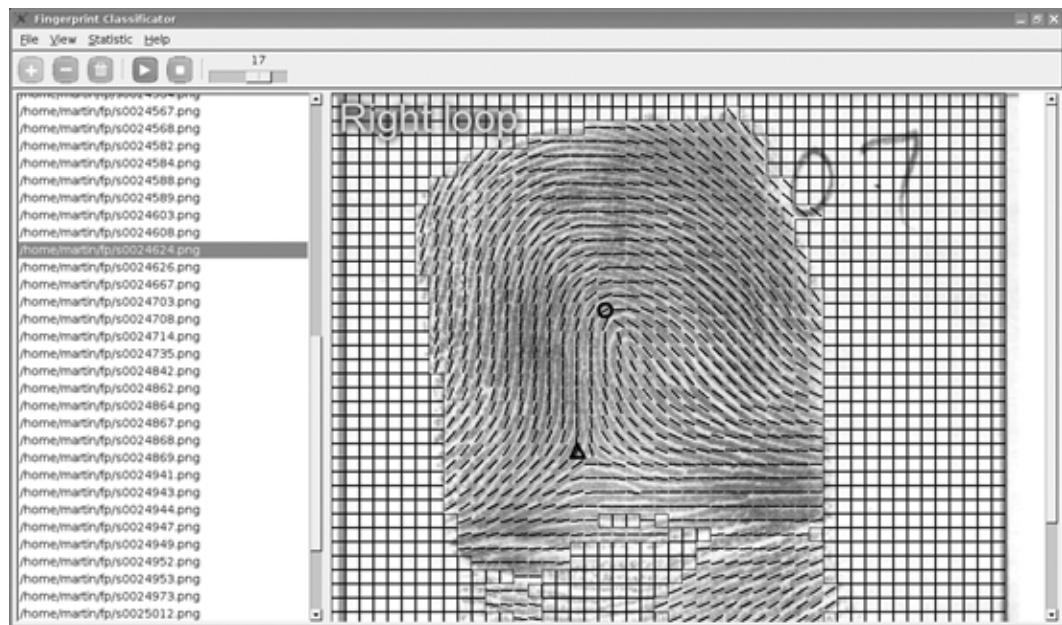
Literatura

- [1] Aladdin USA Corporation: Fingerprinting History. [online], [cit. 2007-12-11].
URL
[<http://www.aladdinusa.com/documentationervices/fingerhistory.htm>](http://www.aladdinusa.com/documentationervices/fingerhistory.htm)
- [2] Bazen, A. M.; Gerez, S. H.: Segmentation of Fingerprint Images. 2001, [online].
URL [<http://www.sas.el.utwente.nl/home/gerez/cgi-bin/sabih/prorisc01a.pdf?sendfile=prorisc01a.pdf>](http://www.sas.el.utwente.nl/home/gerez/cgi-bin/sabih/prorisc01a.pdf?sendfile=prorisc01a.pdf)
- [3] Brislawn, C. M.: *The FBI Fingerprint Image Compression Specification*. Netherlands: Springer, 2002, ISBN 978-0-306-47043-1, s. 271–288, [online].
URL [<http://www.springerlink.com/content/w2715r580264p401/>](http://www.springerlink.com/content/w2715r580264p401/)
- [4] Cappelli, R.; Maio, D.; Maltoni, D.; aj.: A two-stage fingerprint classification system. In *WBMA '03: Proceedings of the 2003 ACM SIGMM workshop on Biometrics methods and applications*, New York, NY, USA: ACM, 2003, ISBN 1-58113-779-6, s. 95–99, [online].
URL [<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=982507.982525>](http://portal.acm.org/citation.cfm?id=982507.982525)
- [5] Chen, X.; Tian, J.; Cheng, J.; aj.: Segmentation of fingerprint images using linear classifier. *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, ročník 2004, č. 1, 2004: s. 480–494, ISSN 1110-8657, [online].
URL [<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1289378>](http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1289378)
- [6] Dass, S. C.; Jain, A. K.: Fingerprint-Based Recognition. 2007, [online].
URL [<http://www.stt.msu.edu/~sdass/papers/technometrics-10-26-06.pdf>](http://www.stt.msu.edu/~sdass/papers/technometrics-10-26-06.pdf)
- [7] DEIS - University of Bologna: Fingerprint Classification. [online], [cit. 2007-12-13].
URL [<http://biolab.csr.unibo.it/Research.asp>](http://biolab.csr.unibo.it/Research.asp)
- [8] Gu, J.; Zhou, J.: Analysis of Singular Points for Fingerprint based on Topological Structure and Orientation Field. Technická zpráva, Tsinghua University, Beijing, 100084, P.R.CHINA, 2005, [online].
URL [<http://www1.cs.columbia.edu/~jwgu/topology.pdf>](http://www1.cs.columbia.edu/~jwgu/topology.pdf)
- [9] Institut Graphische Datenverarbeitung: Evaluation of Fingerprint Recognition Technologies – BioFinger. 2004, [online].
URL [<http://www.bsi.de/english/publications/studies/BioFinger.pdf>](http://www.bsi.de/english/publications/studies/BioFinger.pdf)
- [10] Jain, A.; Pankanti, S.: Fingerprint classification and matching. 2000, [online].
URL [<http://citeseer.ist.psu.edu/jain00fingerprint.html>](http://citeseer.ist.psu.edu/jain00fingerprint.html)

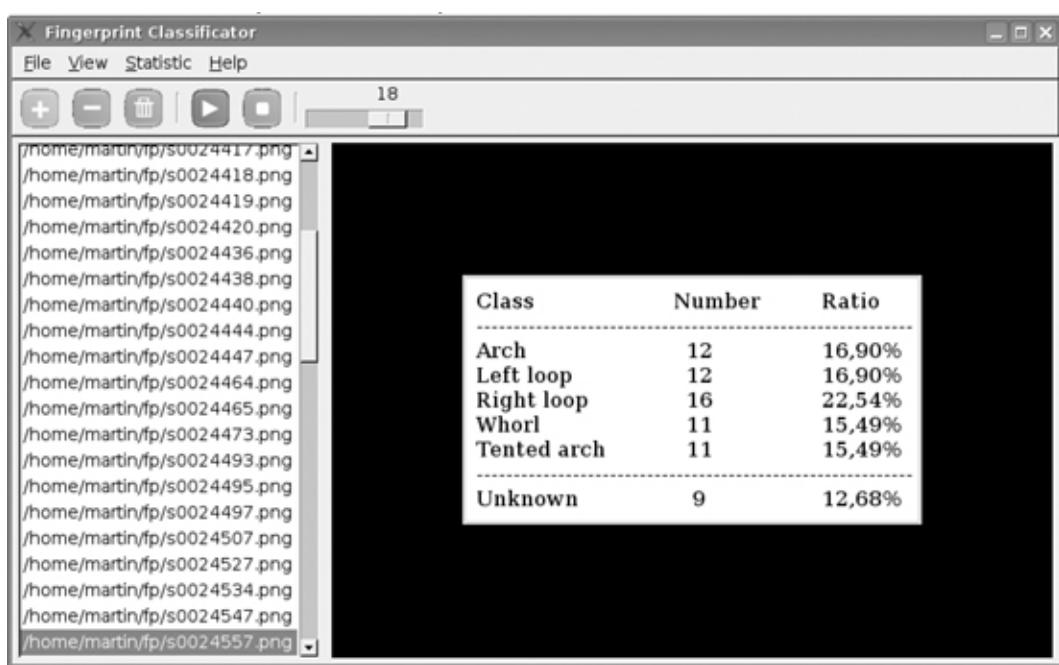
- [11] Maltoni, D.: A Tutorial on Fingerprint Recognition. In *Advanced Studies in Biometrics*, 2003, s. 43–68, [online].
URL <<http://www.springerlink.com/content/rja6gyb3ybvdngt/>>
- [12] Maltoni, D.; Maio, D.; Jain, A. K.; aj.: *Handbook of Fingerprint Recognition*, kapitola 5. New York: Springer, 2003, ISBN 0-387-95431-7.
- [13] National Institute of Standards and Technology: NIST Special Database 14. [online], [cit. 2008-05-06].
URL <<http://www.nist.gov/srd/nistsd14.htm>>
- [14] Prabhakar, S.: *Fingerprint Classification and Matching Using a Filterbank*. Dizertační práce, Michigan State University, 2001, [online].
URL <<http://citeseer.ist.psu.edu/482312.html>>
- [15] Šonka a Václav Hlaváč, M.: *Počítačové vidění*. Praha: Grada, 1992, ISBN 80-85424-67-3.
- [16] Wang, Y.; Hu, J.; Schroder, H.: A Gradient Based Weighted Averaging Method for Estimation of Fingerprint Orientation Fields. In *DICTA '05: Proceedings of the Digital Image Computing on Techniques and Applications*, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005, ISBN 0-7695-2467-2, str. 29, [online].
URL <<http://csdl.computer.org/dl/proceedings/dicta/2005/2467/00/24670029.pdf>>
- [17] Yin, Y.; Wang, Y.; Yang, X.: *Fingerprint Image Segmentation Based on Quadric Surface Model*. Berlin: Springer, 2005, ISBN 978-3-540-27887-0, s. 647–655, [online].
URL <<http://www.springerlink.com/content/3rue9u0admfdf5x/>>
- [18] Zhan, X.; Sun, Z.; Yin, Y.; aj.: *Fingerprint Image Segmentation Method Based on MCMC&GA*. Berlin: Springer, 2005, ISBN 978-3-540-28869-5, s. 391–398, [online].
URL <<http://www.springerlink.com/content/72703402r77u461v/>>
- [19] Zhang, Q.; Huang, K.; Yan, H.: *Fingerprint Classification Based on Extraction and Analysis of Singularities and Pseudoridges*. Australia, 2006, [online].
URL <<http://citeseer.ist.psu.edu/535060.html>>

Dodatek A

Ukázka aplikace



Obrázek A.1: Klasifikace otisku prstu se zobrazením oblasti zájmu, pole orientací papilárních linií, singulárních bodů a názvu klasifikační třídy.



Obrázek A.2: Vytvořená statistika otisků prstů.