

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Rozpoznání a klasifikace otisků prstů
Recognition and Classification of Fingerprints

2016

Adam Holub

Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Holub**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik

Téma: **Rozpoznání a klasifikace otisků prstů**
Recognition and Classification of Fingerprints

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout a v MATLABu realizovat algoritmus pro identifikaci osoby na základě otisků prstů. V práci budou uvedeny současné metody používané při zpracování otisků prstů. Zejména se bude jednat o metody zabývající se zpracováním digitálního obrazu a algoritmy pro porovnávání dvou otisků, příp. nalezení otisku v databázi. Součástí práce bude vzorový protokol k navržené laboratorní úloze.

Body zadání:

1. Rešerše technik používaných při zpracování otisků prstů za účelem identifikace osoby.
2. Návrh algoritmu pro identifikaci osoby na základě otisků prstů.
3. Realizace navrženého algoritmu v programovacím prostředí Matlab.
4. Ověření úspěšnosti algoritmu při identifikaci náhodně vybraného otisku prstu.
5. Provedení zhodnocení výsledků.
6. Vypracování vzorového protokolu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] GONZALEZ, Rafael C a Richard E WOODS. *Digital image processing*. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, c2008, xxii, 954 s. ISBN 978-0-13-168728-8.
- [2] MALTONI, Davide, et al. *Handbook of Fingerprint Recognition*. Second Edition. London, Springer 2009. ISBN 978-1-84882-253-5.
- [3] RAK, Roman, Vašek MATYÁŠ a Zdeněk ŘÍHA. *Biometrie a identita člověka ve forezních a komerčních aplikacích*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2008, 631 s., 32 s. obr. příl. ISBN 978-80-247-2365-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Blanka Filipová, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 29. 4. 2016

Adn H247

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí své bakalářské práce Ing. Blance Filipové, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost a cenné rady při psaní této práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s technikami zpracování digitálního obrazu otisku prstu, a následné využití těchto znalostí při realizaci softwaru pro porovnání dvou otisků prstů, tedy porovnání 1:1. Algoritmus je napsán v programovacím prostředí MATLAB.

K řešení byla použita metoda, která srovnává dva otisky na základě jejich specifických rysů, což jsou markanty a singulární body. Jednotlivé operace a postupy, které byly využity při implementaci vlastního klasifikačního algoritmu, jsou podrobně rozebrány v teoretické části této práce.

Kompletní softwarové řešení je popsáno v praktické části. Jsou zde taktéž uvedeny konkrétní aplikované postupy. Výsledný program je ovládaný prostřednictvím uživatelské rozhraní, umožňující nastavit jednotlivé parametry zpracování, případně zvolit operace, které budou na otisky aplikovány.

Klíčová slova

Otisk prstu, biometrie, histogramová ekvalizace, Fourierova transformace, orientované pole, Gáborův filtr, MATLAB, singulární body, markanty, GUI

Abstract

The objective of this bachelor thesis is to become acquainted with different techniques of digital image processing of fingerprint, and use them to implement software for comparison of two fingerprints 1:1. The algorithm is written in MATLAB.

The method of comparison of two fingerprints according to their features, singular points and minutiae, was used in the final solution. Each operation and procedure, which were used in implementation of own classification algorithm, are described in theoretical part of this work.

Complete software solution is described in practical part. This part also contains all applied specific procedures. The final program is controlled by an user interface, where each parameter of image processing and election of operations can be set.

Key Words

Fingerprint, biometry, histogram equalization, Fourier transform, orientation field, Gabor filter, MATLAB, singular points, minutiae, GUI

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
Úvod	13
1. Biometrie	14
1.1 Biometrie otisku prstu	14
1.1.1 Papilární linie	14
1.1.2 Charakteristika otisku prstu	15
2. Analýza otisku prstu	17
2.1 Předzpracování obrazu otisku	17
2.1.1 Histogramová ekvalizace	17
2.1.2 Oblast zájmu	18
2.1.3 Fourierova transformace	18
2.1.4 Odhad lokální orientace hřebenů	19
2.1.5 Odhad lokální frekvence hřebenů	21
2.1.6 Gáborův filtr	22
2.1.7 Binarizace	23
2.1.8 Ztenčování linií	23
2.2 Nalezení významných bodů	23
2.2.1 Extrakce markantů	24
2.2.2 Extrakce singulárních bodů	25
2.3 Porovnání otisků	29
2.3.1 Euklidovská vzdálenost	30
3. Výkonnost biometrických metod	31
3.1 Pravděpodobnost chybného odmítnutí	31
3.2 Pravděpodobnost chybného přijetí	31
4. Realizace algoritmu pro identifikaci osob na základě obrazové předlohy otisků prstů	32
4.1 Návrh algoritmu	32
4.2 Fáze předzpracování otisků	33
4.3 Fáze extrakce významných bodů	38
4.4 Fáze porovnání otisků	41
4.5 Grafické uživatelské prostředí	44

5. Výsledky a zhodnocení	47
Závěr	50
Literatura	51
Seznam příloh.....	53
A. Obsah přiloženého CD	54
B. Rešerše	55
C. Vzorový protokol	69
D. Vzorový protokol: klíč	75

Seznam symbolů a zkratek

∇_x, ∇_y – gradienty obrazu ve směru x a y

B – strukturální element pro ztenčení linií

D – Euklidovská vzdálenost

DNA – deoxyribonukleová kyselina

DP filtr – dolnoproputný filtr

$E(x,y)$ – obraz filtrovaný Gáborovým filtrem

$F(u,v)$ – Fourierova transformace

FAR – pravděpodobnost chybného přijetí (False Acceptance Rate)

FFT – rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)

FRR – pravděpodobnost chybného odmítnutí (False Rejection Rate)

$G(x,y)$ – Gáborův filtr

GUI – grafické uživatelské rozhraní (Graphical User Interface)

$H(u,v)$ – kmitočtový přenos Gaussova DP filtru

I – obraz otisku prstu

ROI – oblast zájmu (Region of Interest)

W – velikost bloku

$\theta(x,y)$ – odhad lokální orientace

$O(x,y)$ – zpřesněný odhad lokální orientace

Φ_x, Φ_y – vektorová pole lokální orientace

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma stavby kůže s papilárními liniemi [6]	15
Obr. 2: Znázornění údolí a hřebenu. Upraveno z [8]	15
Obr. 3: Oblouk (vlevo), smyčka (uprostřed), vír (vpravo) s vyznačenými singulárními body [11]	16
Obr. 4: Nejběžnější typy markantů	16
Obr. 5: Různé kvality nasnímaných otisků [8].....	17
Obr. 6: Histogram před a po ekvalizaci.....	18
Obr. 7: Lokální orientace v bodě (x, y) [10]	19
Obr. 8: Sobelova konvoluční maska, horizontální (vlevo), vertikální (vpravo).....	19
Obr. 9: Gaussův DP filtr [7]	20
Obr. 10: Orientované pole [8]	20
Obr. 11: Nastavené okno kolmé na lokální orientaci	21
Obr. 12: Projekce intenzit pixelů v okně.....	21
Obr. 13: Gáborův filtr pro $\sigma = 4$, $\theta = 45^\circ$, $\lambda = 8$, $\gamma = 1$ a $\psi = 0$	22
Obr. 14: Papilární linie před a po ztenčení s vyznačenými markanty [6]	23
Obr. 15: Příklady falešných markantů [10].....	24
Obr. 16: Okolí pixelu P o velikosti 3x3	24
Obr. 17: Masky bifurkací	25
Obr. 18: Digitální křivka definovaná body P1, ..., P8	26
Obr. 19: Mapa nepravidelností [16]	27
Obr. 20: Oblast pro integraci sinových komponent pole O(x,y) [8]	28
Obr. 21: Orientace markantů [6]	29
Obr. 22: Diagram aktivit	32
Obr. 23: Původní otisk (vlevo), upravený otisk (vpravo).....	33
Obr. 24: FFT otisku pro $W = 30$ a $f = 0,4$	34
Obr. 25: Vypočtené orientované pole	36
Obr. 26: Původní otisk (vlevo), filtrovaný obraz s defaultně nastavenými parametry (vpravo).....	37
Obr. 27: Výsledný ztenčený otisk	38
Obr. 28: Veškeré nalezené markanty a zobrazení ROI	39
Obr. 29: Otisk s nalezenými markanty	39
Obr. 30: Otisk se všemi vyznačenými body	41
Obr. 31: Vývojový diagram porovnání	43
Obr. 32: GUI aplikace	44
Obr. 33: Vkládání parametrů pro analýzu otisků (vlevo) a porovnání otisků (vpravo)	45
Obr. 34: Příklad shodných otisků	46
Obr. 35: Příklad rozdílných otisků	46
Obr. 36: Ukázka otisků z testovací databáze.....	47
Obr. 37: Otisky číslo 6 (vlevo) a 15 (vpravo)	49
Obr. 38: Původní otisk (vlevo), zmenšený otisk (uprostřed), binarizovaný otisk (vpravo) [1].....	56
Obr. 39: Příklady lineárních binárních vzorů [1]	56
Obr. 40: Rozdělení do "zón" [1].....	57
Obr. 41: Příklad vyhledávání vzoru "10" [1]	57
Obr. 42: Blokové schéma filtrační metody [2].....	59
Obr. 43: Gáborův filtr (vlevo), FFT (uprostřed), spojené obrazy (vpravo) [2]	60
Obr. 44: Binarizovaný obraz (vlevo), ztenčený obraz (vpravo) [2]	60

Obr. 45: Obraz otisku po odstranění falešných markantů [2]	61
Obr. 46: Masky bifurkace [3]	62
Obr. 47: Rozdělení otisku [3]	63
Obr. 48: Schéma klasifikace otisku [4]	64
Obr. 49: Ukázka převodu [5]	66
Obr. 50: Směrové kódy [5]	66
Obr. 51: Vzorkovací matice (vlevo), výsledná úprava (vpravo) [5]	66

Seznam tabulek

Tab. 1: Dosažené výsledky aplikace	48
Tab. 2: Úspěšnost algoritmu [1].....	58

Úvod

Rozpoznávání a klasifikace otisků prstů je tématem, které je rozebíráno v mnoha odborných publikacích a článcích. Identifikace je založena na skutečnosti, že otisk prstu je pro každého člověka jedinečný a nezaměnitelný. Není tedy nutné, aby si člověk pamatoval složité bezpečnostní kódy, nebo u sebe nosil identifikační karty či klíče, u kterých hrozí nebezpečí jejich ztráty a případného zneužití. Oblast využití otisků prstů je široká. Najdeme je běžně u osobních i komerčně používaných aplikací, ať už se jedná o přístupová hesla do počítače nebo přístup do zabezpečených místností. Důležitou roli hrají v kriminalistice, kde bývají často klíčem k usvědčení osob ze spáchaného zločinu.

Metoda rozpoznávání na základě otisků prstů patří mezi nejpokročilejší a nejpoužívanější techniku identifikace, využívající biometrické znaky člověka. V současnosti se na poli biometrické verifikace jedná o standardní metodu rozpoznávání člověka. Výhodou biometrických znaků je, že na světě nenalezneme dva lidi, kteří by měli tyto znaky totožné. Při správném zpracování otisku prstu je identifikace zcela jednoznačná.

S příchodem doby počítačové technologie dochází také k zautomatizování procesu identifikace. Správné techniky zpracování otisku prstu umožňují zrekonstruovat i otisky, které jsou sotva čitelné, nebo jsou jejich struktury poškozené různými nečistotami, jizvami či chybami způsobenými při sejmutí otisku.

Cílem této bakalářské práce je náhled na techniky, které jsou využívány při zpracovávání otisků prstů, zahrnující fázi předzpracování otisku, nalezení důležitých bodů a porovnání otisků. Dalším úkolem bude vytvoření vlastního klasifikačního programu pro identifikaci osob, na základě zpracování obrazové předlohy otisku. Tento program bude vytvořen v prostředí MATLAB, a bude ovládaný pomocí grafického uživatelského prostředí (GUI). Program bude graficky zobrazovat výstupy jednotlivých fází zpracování a umožňovat porovnání otisků 1:1.

První kapitola této práce bude pojednávat o biometrii jako takové. Bude vysvětlen pojem biometrie a její základní rozdělení z hlediska identifikačních znaků. Dále rozebereme biometrii otisku prstu, jeho základní anatomickou charakteristiku a strukturu, ve které se hledají specifické rysy otisku.

V druhé kapitole bude rozebrána analýza otisku prstu. Popíšeme jednotlivé operace a postupy, které jsou na otisk aplikovány za účelem jeho zkvalitnění, extrakce singulárních bodů a markantů a finálního porovnání.

Třetí kapitola bude popisovat výkonnost biometrických zařízení. Zmíněny budou pojmy jako pravděpodobnost chybného přijetí a pravděpodobnost chybného odmítnutí.

Čtvrtá kapitola se již bude věnovat praktické části a implementaci vybraných postupů pro porovnání dvou otisků prstů. Součástí této kapitoly budou taktéž části vlastního napsaného kódu.

V poslední kapitole proběhne ověření funkčnosti aplikace a zhodnocení výsledků. Dosažené výsledky budou zapsány do přehledné tabulky, která bude také obsahovat výslednou procentuální úspěšnost.

1. Biometrie

Biometrie je metoda používaná pro identifikaci a ověřování totožnosti osob. Vychází z poznatku, že jisté fyzické znaky nebo projevy, jsou pro každého člověka jedinečné a nezaměnitelné. Zkoumáním a praktickým využitím těchto měřitelných charakteristik pak dochází k jednoznačné identifikaci nebo verifikaci. Každá z těchto charakteristik musí splňovat určité vlastnosti, aby bylo možné jejich využití a vyhodnocení na základě porovnání s charakteristikami ostatních jedinců. [6]

Mezi tyto vlastnosti patří:

- jedinečnost
- časová stálost
- měřitelnost
- možnost dalšího zpracování

Oblast biometrické identifikace můžeme rozdělit do dvou okruhů: anatomicko-fyziologické biometrické charakteristiky a behaviorální biometrické identifikace.

Anatomicko-fyziologické biometrické charakteristiky slouží pro identifikaci na základě morfologických znaků daného živého organismu. Mezi tyto znaky můžeme zařadit oční duhovku (*iris*), oční sítnici (*retina*), tvář, stavbu vnějšího ucha, geometrii končetin, otisky prstů a dlaní nebo poznatky o stavbě DNA (deoxyribonukleová kyselina). Tyto biometrické znaky jsou pro každého jedince jedinečné a časově stálé, jejich využití proto převládá ve většině aplikací pro identifikaci.[6]

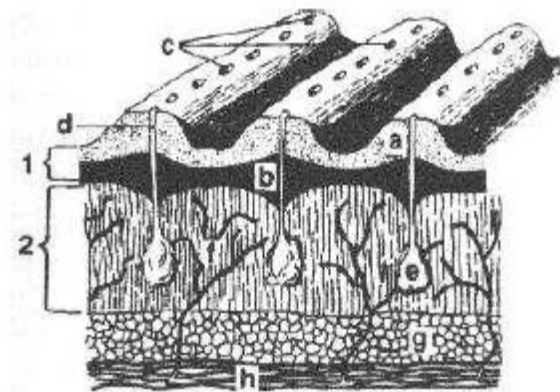
Behaviorální biometrická identifikace využívá pro rozpoznání projevy člověka v chování. Mezi základní projevy řadíme hlas, pohyb těla (lokomoce) a psaní souvislého textu či podpisu. Behaviorální znaky jsou unikátní, avšak nemusí být časově stálé. V praxi jsou méně častou variantou pro identifikaci osob.[6]

1.1 Biometrie otisku prstu

Otisk prstu patří do kategorie anatomicko-fyziologických biometrických charakteristik. Řadí se mezi nejčastěji používané a zároveň i nejspolehlivější biometrické znaky. Oblast jeho využití sahá od osobních a komerčních aplikací, jako jsou zámky u dveří či přihlašování do počítače, až po kriminalistiku. Věda zabývající se naukou o průběhu a anatomii otisku prstu se nazývá daktyloskopie.

1.1.1 Papilární linie

Bříško prstu a celé dlaně je tvořeno spojitými výběžky kůže, které tvoří tzv. papilární linie prstu. Tyto linie tvoří na konečcích prstů obrazce charakteristické pro každého člověka a jsou základem pro daktyloskopickou identifikaci osob.



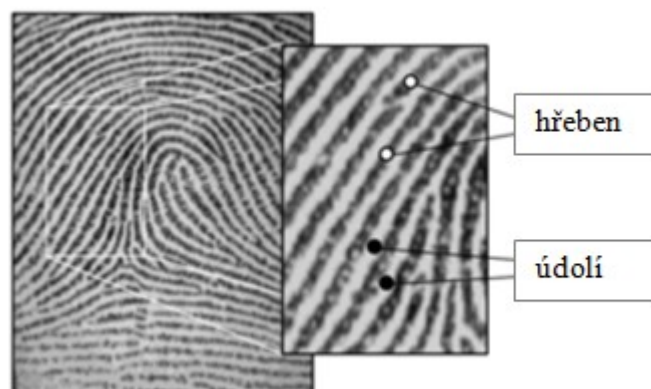
Obr. 1: Schéma stavby kůže s papilárními liniemi [6]

1 – pokožka (*epidermis*), 2 – škára (*cutis*), a – vrstva rohová, b – vrstva zárodečná, c – póry, d – vývody potních žláz, e – potní žlázy, f – cévy, g – podkožní tuk, h – svalstvo

Papilární linie se nacházejí na povrchu dlaně. Hřeben linie dosahuje výšky 0,1 až 0,4 mm a šířky 0,2 až 0,7 mm. Tyto linie se vytvářejí již v embryonálním stavu a jsou relativně neodstranitelné, pokud není odstraněna také zárodečná vrstva.[6] Zůstávají neměnné po celý život.

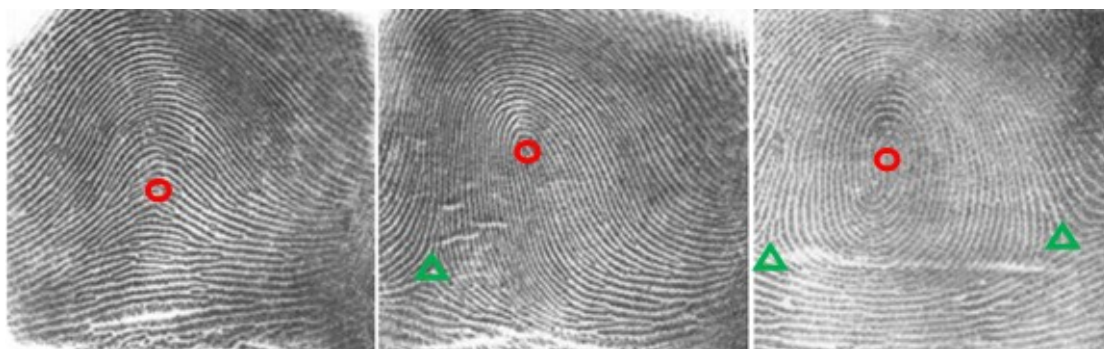
1.1.2 Charakteristika otisku prstu

Tok papilárních linií tvoří strukturu, která je pro každý otisk prstu jedinečná. Základními prvky struktury jsou hřebeny a údolí (viz. Obr. 2).



Obr. 2: Znárodnění údolí a hřebenu. Upraveno z [8]

V obrazu otisku prstu rozlišujeme dva singulární body, jádro (*core*) a deltu. Zakřivení a tok papilárních linií může v otisku prstu tvořit charakteristické uspořádání, které odpovídá jednomu ze tří základních vzorů: oblouk (*arch*), smyčka (*loop*) a vír (*whorl*).



Obr. 3: Oblouk (vlevo), smyčka (uprostřed), vír (vpravo) s vyznačenými singulárními body [11]

jádru ○ delta ▲

Popis základních charakteristik otisku prstu:

Oblouk je tvořen plynule probíhajícími papilárními liniemi, které ve středu bříška tvoří vyklenutý oblouk. Ten může být dvojího typu: mírný (*arch*) a strmý oblouk (*tended arch*). [6]

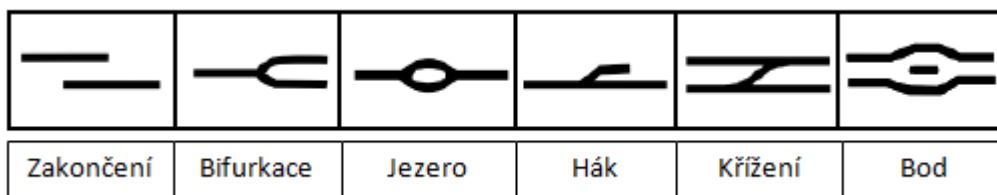
Smyčka je tvořena liniemi, které vychází z jedné strany otisku, prochází okolo jádra, a vrací se zpět. Podle strany ze které linie vychází, rozlišujeme pravou a levou smyčku. V otisku obsahující smyčku zpravidla také nalezneme singulární bod typu delta. Ten se nachází na opačné straně, než odkud vychází smyčka. [6]

Vír tvoří uprostřed otisku spirálový obrazec kolem jádrového bodu. Vír může být buďto jednoduchý nebo s dvojitou smyčkou (obsahuje dva jádrové body). Tento typ otisku musí také obsahovat minimálně dva body typu delta. [6]

Jádru je singulární bod, kolem kterého se stáčejí papilární linie otisku. Jedná se o pomyslný střed otisku. Společně s bodem typu delta se jedná o významný bod při klasifikaci otisku prstů. [6]

Delta je singulární bod, ve kterém se papilární linie rozbíhají do tří směrů. Při klasifikaci otisku hraje důležitou roli. [6]

Tok papilárních linií není vždy spojitý. V obrazu otisku prstu můžeme, kromě bodů jádro a delta, nalézt také detaily (*minutiae*) ve struktuře linií. Tyto detaily se nazývají markanty, a může se jednat například o konce linií nebo o rozdvojení linie (bifurkace). Informace o počtu a pozici těchto markantů je často využívána ke klasifikaci otisku. Mezi nejběžnější typy markantů patří zakončení linie, bifurkace a bod.



Obr. 4: Nejběžnější typy markantů

2. Analýza otisku prstu

Fázi analyzování otisku prstu můžeme rozdělit na tyto tři oblasti:

- Předzpracování obrazu otisku
- Nalezení významných bodů
- Porovnání otisků

2.1 Předzpracování obrazu otisku

V praxi bývá kvalita otisku prstu často ovlivněna nejrůznějšími vlivy, které způsobují přítomnost šumu v obraze. Kvalita obrazu otisku závisí na vlastnostech kontaktních ploch, vlastnostech použitého snímače a také okolním prostředí (vlivy atmosférické, fyzikální, chemické). Smyslem předzpracování otisku prstu je právě odstranění nežádoucího šumu, obnovení přerušovaných linií a zvýraznění jejich kresby tak, aby bylo možné otisk dále klasifikovat. [6]



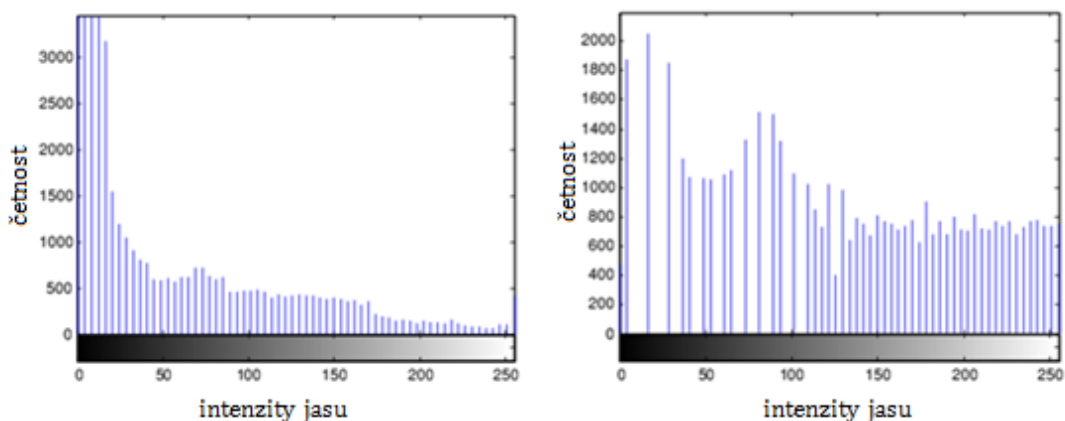
Obr. 5: Různé kvality nasnímaných otisků [8]

Na Obr. 5 vidíme otisky prstů v různých kvalitách: a) dobrá kvalita, b) otisk suchého prstu, c) otisk mokrého prstu, d) otisk se špatně čitelnou vnitřní strukturou

2.1.1 Histogramová ekvalizace

Ekvalizace histogramu slouží pro úpravu kontrastu obrazu s využitím jeho histogramu¹. Tato technika upravuje intenzity jasu jednotlivých pixelů tak, aby zvýšila celkový kontrast obrazu. Výsledkem je pak rovnoměrné rozložení intenzit jasu po celé škále dat (pro šedotónový obraz od 0 do 255). Histogramová ekvalizace je vhodná zejména pro obrazy, které jsou příliš tmavé, nebo naopak příliš světlé.

¹ Grafické znázornění distribuce dat pomocí sloupcového grafu. Šířka sloupce vyjadřuje interval dat, výška sloupce pak jejich četnost v obraze.



Obr. 6: Histogram před a po ekvalizaci

2.1.2 Oblast zájmu

Nasnímaný obraz otisku prstu může na svém pozadí obsahovat šum, nebo jiné nežádoucí prvky, které by mohly být softwarem falešně detekovány. Segmentací vlastního otisku od pozadí definujeme oblast zájmu (ang. *Region of Interest – ROI*).

2.1.3 Fourierova transformace

Pro zvýšení kvality otisku je možné použít Fourierovu transformaci. Pomocí níže uvedeného postupu lze odfiltrovat z obrazu vysokofrekvenční složku, tedy šum, a dále spojit přerušené linie a rozdělit falešně spojené hřebeny. Pro zpřesnění filtrace není transformace aplikována na celý obraz, ale postupně na jednotlivé dílčí bloky o velikosti $W \times W$. [9]

FFT je aplikována podle následujících rovnic [9]:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot \exp \left\{ -j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right\} \quad (2.1)$$

pro $u, v = 0, 1, \dots, W-1$

Pomocí této rovnice dostaneme matici $W \times W$ komplexních čísel. Další úprava spočívá ve vynásobení FFT bloku jeho velikostí, umocněnou konstantou h .

Úprava bloku:

$$d(x, y) = F^{-1} \{ F(u, v) \cdot |F(u, v)|^h \} \quad (2.2)$$

Zpětná Fourierova transformace $F^{-1}(F(u, v))$:

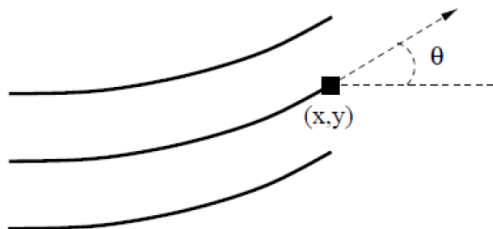
$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(u, v) \cdot \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right\} \quad (2.3)$$

pro $x, y = 0, 1, \dots, W-1$

Konstanta h je experimentálně určenou konstantou. Vyšší hodnoty h zajistí lepší filtraci a kvalitnější hřebenovou strukturu. Příliš vysoké hodnoty h by však v obraze mohly způsobit splynutí linií. [9]

2.1.4 Odhad lokální orientace hřebenů

Jednou ze základních charakteristik otisku prstu je orientované pole, které znázorňuje tok papilárních linií v otisku prstu. Lokální orientace pixelu v bodě (x,y) je úhel $\theta_{x,y}$, který svírá s horizontální osou (viz. Obr. 7). Orientace $\theta_{x,y}$ leží v rozmezí od 0° do 180° .



Obr. 7: Lokální orientace v bodě (x, y) [10]

Metod pro výpočet orientovaného pole $O(x, y)$ je několik. Nejjednodušší technika pro extrakci lokální orientace hřebenů je založena na výpočtu gradientů obrazu otisku prstu. Gradient $\nabla(x,y)$ v bodě (x,y) je dvourozměrný vektor $[\nabla_x(x,y), \nabla_y(x,y)]$, kde ∇_x a ∇_y jsou derivace obrazu v bodě (x,y) . Je známo, že směr gradientu sleduje největší změnu intenzity pixelu, orientace $\theta(x,y)$ je na tento směr ortogonální. [8]

Postup výpočtu orientovaného pole $O(x,y)$ [14]:

- 1) Výpočet gradientů ∇_x a ∇_y obrazu pomocí Sobelovy konvoluční masky

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Obr. 8: Sobelova konvoluční maska, horizontální (vlevo), vertikální (vpravo)

- 2) Odhad lokální orientace podle vztahů:

$$G_{xy}(x, y) = \nabla_x(x, y) \cdot \nabla_y(x, y) \quad (2.4)$$

$$G_{yy}(x, y) = \nabla_y(x, y) \cdot \nabla_y(x, y) \quad (2.5)$$

$$G_{xx}(x, y) = \nabla_x(x, y) \cdot \nabla_x(x, y) \quad (2.6)$$

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot G_{xy}}{G_{yy} - G_{xx}} \right) + \frac{\pi}{2} \quad (2.7)$$

- 3) Kvůli přítomnosti šumu v obraze nemusí být vypočtený odhad přesný. Výsledek proto musíme vyfiltrovat filtrem typu dolní propust. Nejprve je odhad $\theta(x,y)$ převeden do vektorového pole:

$$\Phi_x = \cos(2 \cdot \theta(x, y)) \quad (2.8)$$

$$\Phi_y = \sin(2 \cdot \theta(x, y)) \quad (2.9)$$

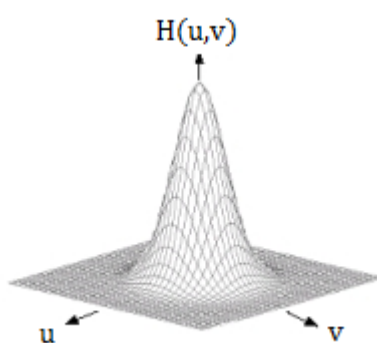
4) Pro filtraci je použit Gaussův dolnoproustný filtr:

$$\Phi'_y = H(u, v) * \Phi_y(x, y) \quad (2.10)$$

$$\Phi'_x = H(u, v) * \Phi_x(x, y) \quad (2.11)$$

kde $H(u, v)$ je kmitočtový přenos Gaussova DP filtru [7]:

$$H(u, v) = e^{\frac{-(u^2+v^2)}{2\sigma^2}} \quad (2.12)$$

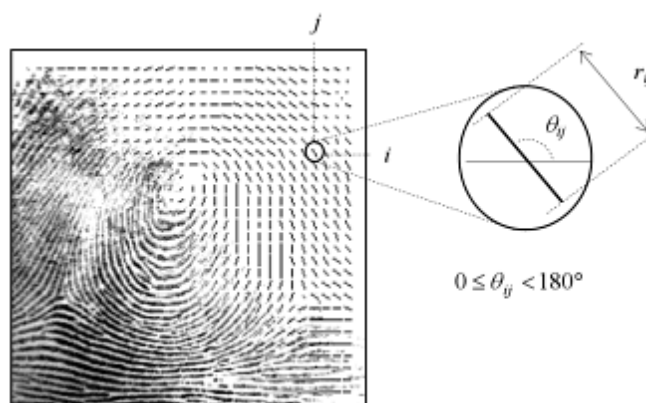


Obr. 9: Gaussův DP filtr [7]

5) Zpřesněný odhad lokální orientace:

$$O(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Phi'_y}{\Phi'_x} \right) \quad (2.13)$$

Výpočet orientovaného pole je důležitý pro následné použití Gáborova filtru a také pro nalezení singulárních bodů jádro a delta. Ukázka orientovaného obrazu je vidět na Obr. 10.



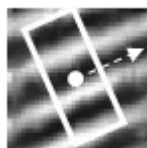
Obr. 10: Orientované pole [8]

2.1.5 Odhad lokální frekvence hřebenů

Pro konstrukci Gáborova filtru je důležité kromě orientace hřebenů znát také jejich frekvenci. V místech, kde se nenachází žádný markant nebo singulární bod, jsou papilární linie téměř rovnoběžné, a můžeme se na jejich projekci dívat jako na sinusový průběh.

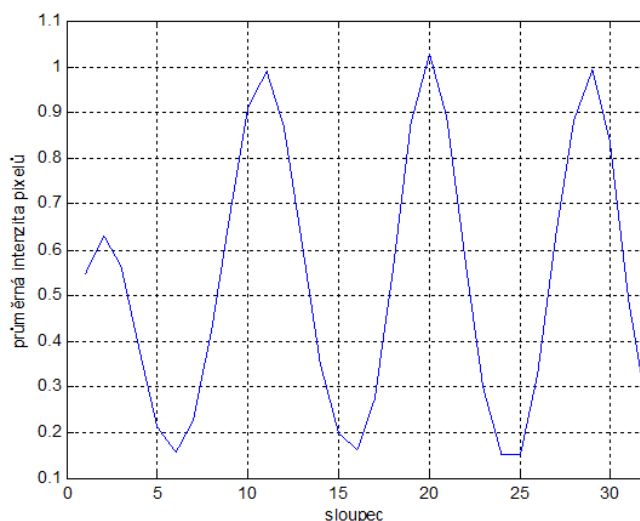
Postup pro určení lokální frekvence [10]:

- 1) Prvním krokem je rozdělení obrazu otisku na bloky o velikosti $W \times W$
- 2) V každém bloku, který je vycentrován na pixelu (x,y) vyčleníme okno o velikosti $l \times w$. Okno musí být kolmé na orientaci θ , pro daný blok.



Obr. 11: Nastavené okno kolmé na lokální orientaci

- 3) Zprůměrováním a projekcí hodnot v jednotlivých sloupcích uvnitř bloku, kolmých na lokální orientaci získáme téměř sinusový průběh, kde lokální minima odpovídají hřebenům a lokální maxima údolím



Obr. 12: Projekce intenzit pixelů v okně

Nalezením lokálních maxim lze stanovit počet pixelů, které se mezi nimi nacházejí. Zprůměrováním těchto hodnot určíme periodu T projekce. Hledanou frekvenci f poté stanovíme pomocí vztahu:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.14)$$

2.1.6 Gáborův filtr

Výpočet lokálních orientací a frekvencí obrazu otisku prstu nám umožňuje zkonstruovat dvoudimenzionální Gáborův filtr. Tento filtr pracuje jako filtr typu pásmová propust a skládá se ze sinusoidální plochy modulované Gaussovou obálkou (viz. Obr. 13). Gáborův filtr je frekvenčně a směrově nastavitelný, což nám umožňuje maximálně zvýraznit kresbu papilárních linií o vlastní orientaci a frekvenci. Správně nastavený filtr tak efektivně zachovává hřebenové struktury a potlačuje nechtěné frekvence v obrazu. [10]

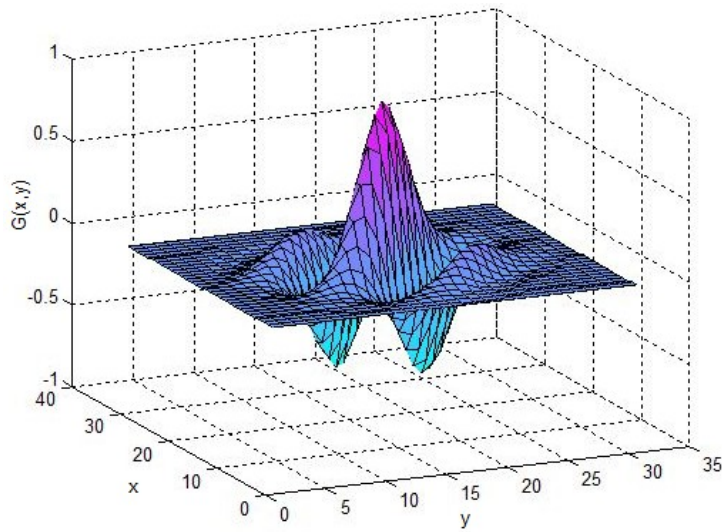
Matematické vyjádření Gáborova filtru [13]:

$$G(x, y; \theta, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_{\theta}^2}{\delta_x^2} + \frac{y_{\theta}^2}{\delta_y^2} \right] \right\} \cdot \cos(2\pi f x_{\theta}) \quad (2.15)$$

$$x_{\theta} = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (2.16)$$

$$y_{\theta} = -x \cdot \sin \theta + y \cdot \cos \theta \quad (2.17)$$

Kde θ je orientace, f frekvence a δ směrodatná odchylka Gaussovy obálky ve směru x a y .



Obr. 13: Gáborův filtr pro $\sigma = 4$, $\theta = 45^\circ$, $\lambda = 8$, $\gamma = 1$ a $\psi = 0$

Gáborův filtr G je na obraz otisku I aplikován pomocí konvoluce. Vyfiltrovaný obraz E dostaneme podle následujícího vztahu [13]:

$$E(x, y) = \sum_{u=-\frac{w_x}{2}}^{\frac{w_x}{2}} \sum_{v=-\frac{w_y}{2}}^{\frac{w_y}{2}} G(u, v, O(x, y), F(x, y)) I(x - u, y - v) \quad (2.18)$$

w_x a w_y udává velikost Gáborova filtru, $O(x, y)$ vyjadřuje lokální orientaci a $F(x, y)$ lokální frekvenci v pixelu (x, y) .

2.1.7 Binarizace

Nasnímaný otisk prstu je šedotónový obraz. Každý pixel obsahuje vlastní hodnotu šedi na škále od 0 do 255. Pro zjednodušení práce s otiskem a extrakci markantů je obraz binarizován, tedy převeden do formy obrazu obsahující pouze dvě hodnoty (0 a 1).

Abychom mohli binarizaci uskutečnit je potřeba zvolit tzv. prahovou hodnotu. Tato hodnota udává jakousi mezní hodnotu mezi tmavšími a světlejšími pixely v obraze. Veškeré pixely, jejichž hodnota je vyšší než prahová, budou převedeny na 1. Pixely, které mají hodnotu nižší než prahová, budou naopak převedeny na hodnotu 0.

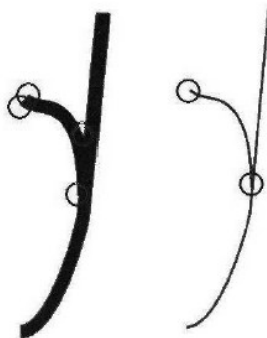
2.1.8 Ztenčování linií

Posledním bodem fáze předzpracování otisku prstu je ztenčení. Pro počítačové zpracování jsou čáry papilárních linií příliš tlusté, a mohlo by docházet k detekci falešných markantů. Aby byla extrakce markantů efektivní je třeba papilární linie otisku prstu patřičně ztenčit. Linie o tloušťce několika pixelů jsou transformovány na velikost čar o šířce právě jednoho pixelu.

Obraz otisku I je opakovaně transformován sadou strukturálních elementů B^1, \dots, B^n do té doby, dokud se obraz nepřestane měnit. [7]

$$I \otimes \{B\} = ((\dots ((I \otimes B^1) \otimes B^2) \dots) \otimes B^n) \quad (2.19)$$

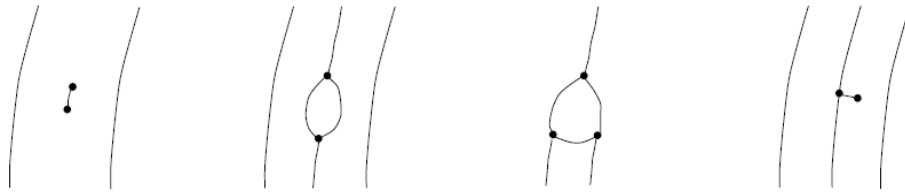
Výsledkem je obraz otisku s šířkou linií jeden pixel.



Obr. 14: Papilární linie před a po ztenčení s vyznačenými markanty [6]

2.2 Nalezení významných bodů

Druhou fází analyzování otisku prstu je extrakce významných bodů. Vyhledání těchto bodů probíhá na skeletizovaném obrazu otisku, který je výsledkem předchozího předzpracování. Smyslem je nalezení všech důležitých bodů otisku a eliminace co největšího počtu falešně detekovaných markantů (viz. Obr. 15). Kromě falešných markantů, které vznikly nedokonalým obrazovým předzpracováním, jsou vyloučeny také hraniční (koncové) body papilárních linií, jelikož se nejedná o skutečné zakončení linie, ale pouze o krajní body, vymezující hranice otisku. [6]



Obr. 15: Příklady falešných markantů [10]

2.2.1 Extrakce markantů

Jedinečnost každého otisku prstu, kromě singulárních bodů, zajišťují také drobné detaily definující strukturu papilárních linií, markanty. Typů markantů můžeme v lidské populaci nalézt hned několik (viz. Obr. 4). Mezi nejběžnější typy markantů, které se zároveň využívají při identifikaci osob, patří zakončení linie a bifurkace (někdy také jednoduchá vidlice). V procesu rozpoznávání otisku se uplatňují informace o počtu, pozici a směrové orientaci těchto markantů. Vysoká četnost těchto dvou typů však snižuje jejich identifikační hodnotu.

Metoda hledání markantů je založená na zkoumání blízkého okolí každého pixelu **P**, který je kandidátem na markant. Velikost okna, představující blízké okolí pixelu, je obvykle 3x3.[2]

P8	P1	P2
P7	P	P3
P6	P5	P4

Obr. 16: Okolí pixelu **P** o velikosti 3x3

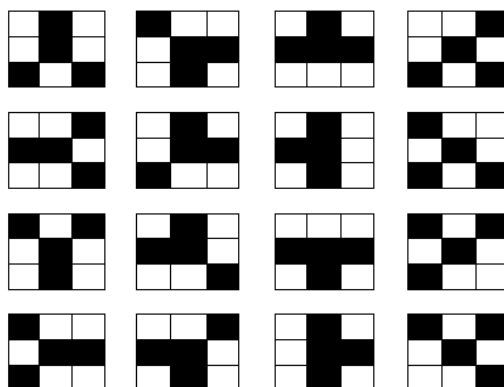
Hledání zakončení papilární linie vychází z předpokladu, že v okolí 3x3 pixelu **P** se nachází už jen jeden pixel stejné hodnoty (černý pixel = 0, bílý pixel = 1). Platí tedy:

$$\sum_{i=1}^8 P(i) = 7 \quad (2.20)$$

Pro hledání bifurkace platí podobný princip, jako u hledání zakončení linie. Tentokrát se vychází z předpokladu, že v okolí 3x3 pixelu **P** se nachází celkem tři pixely hodnoty 0.

$$\sum_{i=1}^8 P(i) = 5 \quad (2.21)$$

Tímto výpočtem však nezajistíme spolehlivost výsledku, jelikož nelze ošetřit, v jakém pořadí se pixely v okolí nacházejí. Proto je nutné takto nalezené okolí porovnat s maskami definujícími tvary bifurkací. [3]



Obr. 17: Masky bifurkací

Odstranění falešných markantů je uskutečněno na základě výpočtu vzdálenosti mezi jednotlivými markanty. Pokud vypočtená vzdálenost D mezi dvěma markanty $M_1(x_1, y_1)$ a $M_2(x_2, y_2)$ nepřesahuje předem zvolenou mez, jsou oba nalezené markanty eliminovány.

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.22)$$

Takto lze ze skeletizovaného obrazu otisku prstu vyloučit markanty typu hák, krátká čárka (bod) nebo jezero. Odstraněny jsou také případně nalezené zakončení způsobené přerušením linie.

2.2.2 Extrakce singulárních bodů

Nalezení singulárních bodů je důležitou součástí mnoha klasifikačních algoritmů. Tyto algoritmy pracují zejména s orientovaným polem otisku. Mezi singulární body řadíme jádro a deltu (viz. Obr. 3). Extrakci singulárních bodů lze provést několika metodami.

Poincaré Index

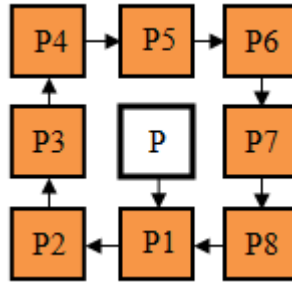
Mezi nejpoužívanější a zároveň nejelegantnější metody detekce singulárních bodů patří metoda výpočtu Poincarého Indexu.

Tato technika využívá úhlovou sumaci linií, které bezprostředně obklopují daný typ markantu. Pro pixel (x, y) je zvolena digitální křivka, která tvoří uzavřenou cestu přímo obklopující daný pixel. Tuto křivku tvoří posloupnost za sebou jdoucích elementů P_1, P_2, \dots, P_N , které jsou definovány orientovaným obrazem $O(x, y)$. Hodnota Poincaré Indexu je určena jako sumace rozdílů sousedních hodnot ležících na této křivce. [8] Pokud je délka křivky zvolena na hodnotu 8, jedná se o nejbližší okolí daného pixelu (viz. Obr. 18).

Hodnoty Poincaré Indexu definující typ singularity:

- **0** pokud pixel (x, y) neodpovídá žádnému typu singulárního bodu
- **1/2** pokud pixel (x, y) odpovídá jednoduchému jádru (smyčka)
- **1** pokud pixel (x, y) odpovídá dvojitému jádru (vír)

- $-1/2$ pokud pixel (x,y) odpovídá deltě



Obr. 18: Digitální křivka definovaná body P1,...,P8

Výpočet Poincaré Indexu [17]:

$$Poincare(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} \Delta(k) \quad (2.23)$$

kde

$$\Delta(k) = \begin{cases} \delta(k), & |\delta(k)| < \frac{\pi}{2} \\ \delta(k) + \pi, & \delta(k) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \delta(k) - \pi, & \delta(k) \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\delta(k) = \theta(x_{(k+1) \bmod N}, y_{(k+1) \bmod N}) - \theta(x_k, y_k) \quad (2.25)$$

Hodnota N definuje počet elementů ležící na digitální křivce, pro většinu případů $N = 8$. Jednotlivé úhly všech elementů křivky určuje orientovaný obraz $O(x,y)$.

Aplikováním rovnic (2.23–2.25) může být nalezeno, kromě skutečného jádra a delty, také několik falešných singulárních bodů. Tyto falešné singulární body jsou odstraněny splněním dvou podmínek [17]:

- jádro i delta jsou eliminovány, pokud je vzdálenost mezi nimi menší než 8 pixelů
- v kruhových oblastech, obsahujících N singulárních bodů (jádro nebo delta), jsou jejich x -ové a y -ové souřadnice zprůměrovány

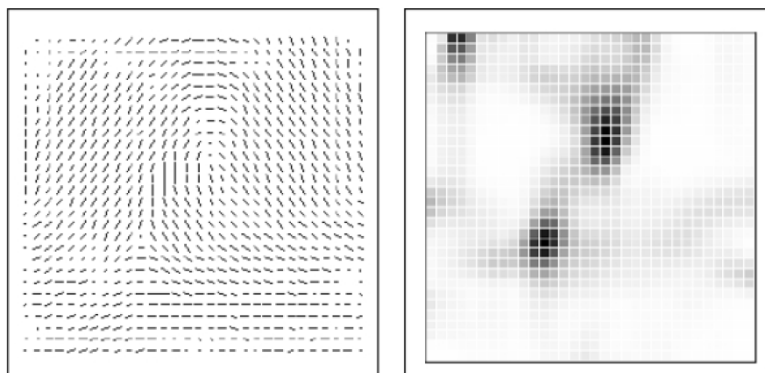
$$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.26)$$

$$y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.27)$$

Mapa nepravidelností

Základem této metody je vyhledání největšího zakřivení nebo jiných nepravidelností v orientovaném obraze $O(x,y)$. Pro každý pixel, náležící poli $O(x,y)$, je prozkoumáno jeho nejbližší okolí o velikosti 3×3 . Na základě různorodosti jednotlivých hodnot úhlů v daném bloku, je pixelu přiřazena barva z šedotónové škály. Pokud jsou v okolí všechny vektory orientovány stejně, je pixel označen bílou barvou. S rostoucí nepravidelností, jsou pixely zbarvovány do tmavších odstínů. [16]

Na výsledném obraze jsou patrné tmavší oblasti, které obsahují singulární body (viz. Obr. 19). Nevýhodou zmíněné metody je, že nelze přímo rozlišit, o jaký typ singularity se jedná. Proto je dále nutné hlouběji prozkoumat nalezené oblasti a jejich okolí.



Obr. 19: Mapa nepravidelností [16]

Využití ortogonálních gradientů

Metoda využívající ortogonální gradienty je použita pro detekci singulárního bodu typu jádro. Pro tuto techniku je třeba správně stanovit orientované pole $O(x,y)$ a segmentovat oblast zájmu otisku prstu (ROI).

Algoritmus pro detekci jádra [18]:

- 1) Výpočet sinové a kosinové složky orientovaného pole $O(x,y)$:

$$a = \cos(O(x, y)) \quad (2.28)$$

$$b = \sin(O(x, y)) \quad (2.29)$$

- 2) Ze získaných matic a a b je určen jejich gradient ve směrech x a y :

$$[g_{xa}, g_{ya}] = \nabla(a) \quad (2.30)$$

$$[g_{xb}, g_{yb}] = \nabla(b) \quad (2.31)$$

- 3) Výpočet velikostí gradientů:

$$G_a = \sqrt{g_{xa}^2 + g_{ya}^2} \quad (2.32)$$

$$G_b = \sqrt{g_{xb}^2 + g_{yb}^2} \quad (2.33)$$

4) Výsledná matice gradientů G , je získána jako menší hodnota každé pozice pixelu v maticích G_a a G_b :

$$G = \min(G_a, G_b) \quad (2.34)$$

Pixely $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$, které jsou kandidáty na jádro, jsou získány extrahováním lokálních maxim matice G , pro které platí:

$$G(x, y) \geq 0,3 \cdot V_{max} \quad (2.35)$$

kde V_{max} odpovídá maximální hodnotě v matici G

Z těchto pixelů je vybrán jádrový bod (x_p, y_p) na základě splnění následujících dvou podmínek:

- jádro je bod nejbližší ležící k centru ROI
- pro jádro platí:

$$\theta(x_p - W, y_p - W) > \theta(x_p - W, y_p + W) \quad (2.36)$$

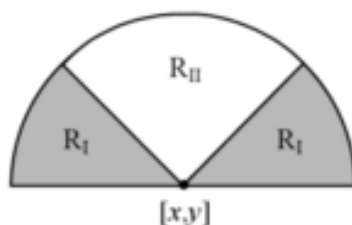
kde W byla stanovena na hodnotu 10. [18]

R92

Principem techniky R92 je vyhledání nejsevernějšího bodu smyčky, který odpovídá singulárnímu bodu typu jádro, na základě rozdílu součtu sinových složek oblastí R_I a R_{II} . Geometrie těchto dvou regionů je navržena tak, aby pokryla co největší zakřivení u konkávních hřebenů.[15] Výstupem je obraz $A(x, y)$, který je výsledkem rovnice [15]:

$$A(x, y) = \sum_{R_I} \varepsilon(x, y) - \sum_{R_{II}} \varepsilon(x, y) \quad (2.37)$$

$\varepsilon(x, y)$ je sinová složka orientovaného pole $O(x, y)$



Obr. 20: Oblast pro integraci sinových komponent pole $O(x, y)$ [8]

V obraze $A(x, y)$ je poté nalezena největší hodnota, a její souřadnice jsou přiřazeny singularitě typu jádro.

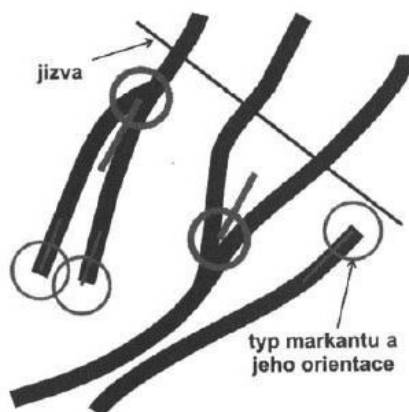
2.3 Porovnání otisků

Poslední fází analýzy otisku prstu je jeho porovnání s dalšími otisky. V procesu porovnání (identifikace nebo verifikace) se ztotožňuje analyzovaný otisk s jiným otiskem, případně s otisky, které byly sejmuty již dříve a uloženy do databáze.

Metody porovnávání otisků lze rozdělit do těchto skupin [12]:

- Porovnávání významných bodů
- Porovnávání na základě korelace otisků
- Porovnávání podle hřebenové struktury

Ve většině biometrických aplikací převažuje metoda porovnávání nalezených významných bodů. Do této skupiny patří charakteristické body otisku, tzn. markanty a singulární body. U těchto bodů se hledají charakteristiky definující vztahy mezi nimi. Příkladem může být výpočet vzdáleností mezi singulárním bodem typu jádro a sousedními markanty, nebo vzdálenost mezi samotnými singulárními body. Pro zpřesnění identifikace je u markantů porovnávána, kromě jejich pozice v obraze otisku, i orientace (viz. Obr. 21).



Obr. 21: Orientace markantů [6]

Okolní markanty však nemusí být, ani u totožných otisků, vždy ve stejné vzdálenosti. Příčinou tohoto zkreslení může být šum, přítomný v obraze, nebo elasticita lidské kůže.

Výsledkem fáze porovnání otisků je tzv. skóre porovnání (ang. *match score*). Jedná se o číslo v rozmezí od 0 do 1, případně z jiného číselného intervalu. Vyšší skóre značí vyšší pravděpodobnost, že jsou otisky identické. V uživatelské aplikaci lze nastavit prahovou hodnotu, která udává hranici mezi ztotožněním a odmítnutím otisků. Pokud se bude hodnota skóre nalézat nad tímto prahem, je možno říct, že se otisky shodují. V opačném případě ke shodě nedojde. [6]

Nastavení citlivostního prahu závisí na požadavcích každého biometrického zařízení. Vyšší hodnoty prahu jsou uplatněny v prostředích, které vyžadují vysokou bezpečnost. V tomto ohledu je však nutné smířit se s tím, že i oprávněné osoby mohou být občas mylně odmítnuty. Bude-li naopak

práh nastaven na hodnotu nižší, je pravděpodobnější, že přes identifikační systém pronikne i osoba nežádoucí. [6]

2.3.1 Euklidovská vzdálenost

Vhodným způsobem, kterým lze určit vzdálenost nalezených bodů je výpočet Euklidovské vzdálenosti. Hodnota vypočtená touto metodou představuje přímou vzdálenost mezi dvěma body v rovině. Tato vzdálenost je určena jako odmocnina sumy čtvercových vzdáleností mezi souřadnicemi každého bodu. Pro dva body v rovině můžeme stanovit rovnici [3]:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.38)$$

Při identifikaci otisku prstu lze využít výpočtu Euklidovské vzdálenosti např. pro měření vzdálenosti jádra a okolních bifurkací. V tomto případě by souřadnice (x_1, y_1) patřily jádru, a souřadnice (x_2, y_2) sousedním bifurkacím.

3. Výkonnost biometrických metod

Cílem biometrické identifikace je jednoznačné a bezchybné nalezení nebo potvrzení identity člověka. U biometrických zařízení se vyžaduje, aby tento cíl splňovaly, nebo se k němu co nejvíce blížily. To, s jakou přesností zařízení funguje, lze stanovit pomocí různých charakteristik. V praxi se nejčastěji používá pravděpodobnostní vyjádření udávající, s jakou chybovostí zařízení pracuje. Jsou zavedeny dva pojmy [6]:

- Pravděpodobnost chybného odmítnutí
- Pravděpodobnost chybného přijetí

3.1 Pravděpodobnost chybného odmítnutí

Jednou ze základních charakteristik je pravděpodobnost chybného odmítnutí (ang. *False Rejection Rate* – FRR). Tato veličina udává, s jakou pravděpodobností bude osoba s oprávněným přístupem zamítnuta. Hodnota FRR je definována vztahem [6]:

$$FRR = \frac{N_{FR}}{N_{EIA}} \quad (3.1)$$

kde N_{FR} značí počet chybných odmítnutí a N_{EIA} počet pokusů o identifikaci oprávněných osob.

3.2 Pravděpodobnost chybného přijetí

Druhou základní charakteristikou je pravděpodobnost chybného přijetí (ang. *False Acceptance Rate* – FAR). FAR je veličina, která udává, s jakou pravděpodobností bude biometrickým systémem osoba bez oprávnění přijata. Hodnotu FAR definuje vztah [6]:

$$FAR = \frac{N_{FA}}{N_{IIA}} \quad (3.2)$$

kde N_{FA} značí počet chybných přijetí a N_{IIA} počet pokusů o identifikaci neoprávněných osob.

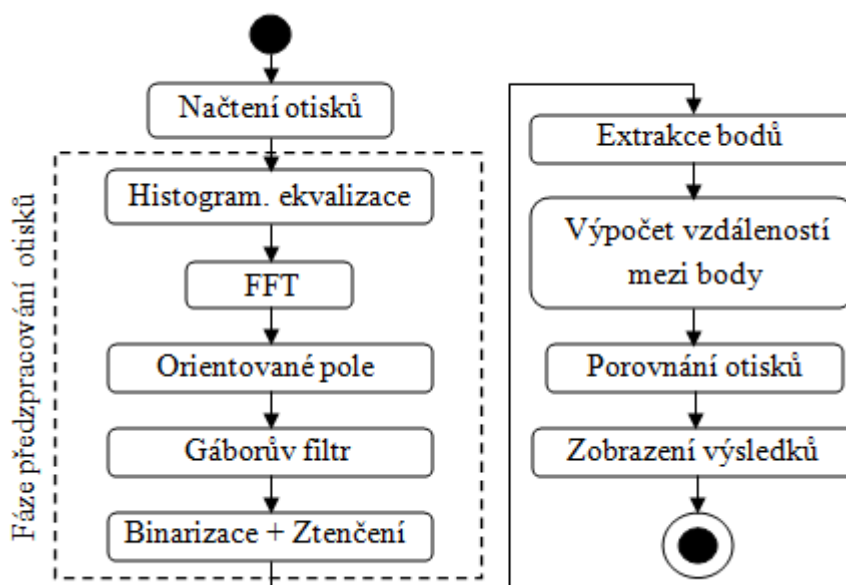
Za vysokou míru spolehlivosti biometrické identifikace se považuje hodnota $FAR < 0,01\%$. Horní hranici FAR pro bezpečnostní aplikace činí hodnota 1%.

4. Realizace algoritmu pro identifikaci osob na základě obrazové předlohy otisků prstů

Praktická část bakalářské práce byla věnována implementaci vlastního klasifikačního algoritmu pro identifikaci osob na základě obrazové předlohy otisků prstů. Cílem programu je ověření shody mezi dvěma otisky, tedy porovnání 1:1. Pro realizaci algoritmu byly využity vybrané postupy a metody, které byly popsány v teoretické části v kapitole 2.

Program byl napsán v programovacím prostředí MATLAB verze 8.3 (R2014a) s využitím funkcí, které nabízí Image Processing Toolbox.

4.1 Návrh algoritmu



Obr. 22: Diagram aktivit

Program byl navržen tak, aby umožňoval vzájemné porovnání dvou různých otisků. Kompletní algoritmus je rozdělen do tří základních oblastí: fáze předzpracování otisků, fáze extrakce významných bodů a fáze porovnání otisků. V první fázi předzpracování, která zahrnuje bloky od *histogramové ekvalizace* po *binarizaci + ztenčení* (viz. Obr. 22), jsou na obraz dvou otisků prstů aplikovány jednotlivé postupy, které byly popsány v kapitole 2.1. Výstupem této části jsou skeletizované otisky. V druhé fázi jsou oba skeletizované otisky zpracovány s cílem nalezení všech markantů a singulárních bodů typu jádro a delta. Poslední fází je fáze porovnání otisků. Ověření shodnosti otisků bylo uskutečněno na základě určení vzájemné pozice jádra a delty, a výpočtu vzdáleností mezi jádrem a okolními bifurkacemi. Pro oba otisky byly porovnány vypočtené vzdálenosti a orientace jednotlivých bodů bifurkace. Výstupem algoritmu je procentuální číselný údaj, určující, v jaké míře byly dva vstupní otisky navzájem podobné.

V následujících kapitolách bude popsán algoritmus zpracování otisků.

4.2 Fáze předzpracování otisků

Vstupními grafickými obrazy jsou šedotónové otisky ve formátu *.tiff. Načtení obou otisků je provedeno pomocí příkazu **imread**.

Histogramová ekvalizace

Prvotním krokem ve fázi předzpracování otisků je histogramová ekvalizace. Ta má za úkol upravit kontrast obrazu otisku **I**, pokud je příliš tmavý, nebo naopak příliš světlý. Pro tuto operaci je použita funkce **histeq**.

```
I = histeq(I);
```



Obr. 23: Původní otisk (vlevo), upravený otisk (vpravo)

Fourierova transformace

Úkolem Fourierovy transformace je potlačení nežádoucí vysokofrekvenční složky obrazu a celkové zvýraznění hřebenů otisku. Algoritmus byl postaven tak, že neaplikuje transformaci na celý obraz otisku, ale na jednotlivé bloky o velikosti $W \times W$. Rozdělení na bloky umožňuje vylepšit obraz lokálně, tedy zvýrazněním vlastní dominantní frekvence každého bloku. Algoritmus byl napsán podle rovnic (2.1–2.3) s využitím zabudovaných funkcí MATLABu **fft2** a **ifft2**.

Algoritmus [19]:

```
for i = 1:W:r
    for j = 1:W:c
        if i+W-1 <= r && j+W-1 <= c
            F = fft2(I(i:i+W-1,j:j+W-1)); %FFT bloku WxW
            factor = abs(F).^f;
            IF = abs(ifft2(F.*factor)); %zpetna FFT
            Max_IF = max(IF(:));
            IF = IF./Max_IF;
            FFT_I(i:i+W-1,j:j+W-1) = IF;
        end
    end
end
```

```
end
FFT_I = histeq(FFT_I);
```

Kvalitu výsledného obrazu otisku lze ovlivnit parametry **W** (velikost bloku) a **f** (experimentálně určená konstanta). Otisky z testovací databáze mají velikost 338 x 248, proto je ideálním rozdělením (tak, aby pokryla celý obraz) hodnota **W** = 30. Konstanta **f** ovlivňuje kvalitu filtrace. Optimální hodnota **f** se pohybuje v rozmezí od 0,4 do 1, v závislosti na kvalitě otisku z testovací databáze.



Obr. 24: FFT otisku pro $W = 30$ a $f = 0,4$

Aplikací Fourierovy transformace lze také docílit vyhlazenějšího orientovaného pole otisku a tím i přesnější filtrace Gáborovými filtry a vyhledávání singulárních bodů.

Orientované pole

Výpočet orientovaného pole otisku je důležitým krokem ve fázi předzpracování z hlediska následného aplikování Gáborových filtrů a nalezení singulárních bodů jádro a delta. Jednotlivé kroky algoritmu pro určení orientace byly popsány v kapitole 2.1.4. Pro zvýšení přesnosti je orientace vypočtena pro každý obrazový pixel.

Popis algoritmu [19]:

Pro výpočet gradientů **Gx** a **Gy** byly využity funkce **fspecial** a **filter2**. Příkazem **fspecial('sobel')** lze vytvořit předdefinovaný 2-D filtr. Funkce **filter2** poté aplikuje vytvořený filtr konvolucí na obraz otisku prstu.

```
g_filter = fspecial('sobel');
Gx = filter2(g_filter, FFT_I);
Gy = filter2(g_filter', FFT_I);
```

Nadefinováním vztahů a jejich filtrace Gaussovým filtrem dojde k vyhlazení a tím i zpřesnění následného výpočtu prvotního odhadu.

```
Gxy = Gx.*Gy;
```

```

Gxx = Gx.^2;
Gyy = Gy.^2;
jmenovatel = Gyy - Gxx;

blocksigma = 3;
velikost = fix(6*blocksigma);
if mod(velikost,2) == 0
    velikost = velikost + 1;
end
f = fspecial('gaussian', velikost, blocksigma);
jmenovatel = filter2(f, jmenovatel);
Gxy = filter2(f, Gxy);

```

Po této filtraci je podle rovnice 2.7 vypočten prvotní odhad orientace všech bodů otisku, který je uložen do proměnné **theta**.

```
theta = 1/2*atan2(2*Gxy,jmenovatel) + pi/2;
```

Následně je výsledek převeden do vektorového pole.

```

FIx = cos(2*theta);
FIy = sin(2*theta);

```

Kvůli možné přítomnosti šumu v obraze je vektorové pole **FIx** a **FIy** filtrováno filtrem typu dolní propust. Pro tuto operaci je použit Gaussův DP filtr. Vytvoření filtru a aplikování konvolucí probíhá opět za pomoci příkazů **fspecial** a **imfilter**.

```

maska = fspecial('gaussian',5);
gfx = imfilter(FIx,maska,'symmetric','same');
gfy = imfilter(FIy,maska,'symmetric','same');

```

Zpřesněný odhad orientace podle rovnice 2.13:

```
omikron = 1/2*atan2(gfy,gfx);
```

Posledním krokem je převod orientovaného pole do kladných hodnot radiánů, tedy 0 až π .

```
omikron(omikron < 0) = omikron(omikron < 0) + pi;
```

V proměnné **omikron** jsou nyní uloženy orientace všech pixelů vstupního obrazu otisku prstu, na který byla předtím aplikována FFT. Pro použití v Gáborových filtrech je výsledná matice **omikron** ještě převedena z radiánů na stupně.

```
img_orient_deg = omikron*(180/pi);
```



Obr. 25: Vypočtené orientované pole

Gáborův filtr

Aplikováním Gáborových filtrů dochází k maximálnímu zvýraznění struktury hřebenů otisku a potlačení všech nežádoucích složek. Znalostí orientovaného pole otisku lze v každém pixelu aplikovat odpovídající filtr. Tento filtr je vybrán z řady filtrů, které byly vytvořeny a postupně aplikovány na celý otisk. V této práci bylo použito 18 filtrů s natočením od 0° do 170° s intervalem 10° .

Algoritmus vytvoření banky filtrovaných obrazů:

```

GB = {};
m = 1;
for theta = 0:pi/18:pi-pi/18 %0:10:170
    G = gabca(gb_sigma,theta+pi/2,gb_lambda,0,gb_gamma);
    IG = conv2(FFT_I,G,'same');
    GB{m} = IG;
    m = m + 1;
end

```

Takto lze získat 18 filtrovaných obrazů, které jsou uloženy v buněčném poli **GB**. Filtr byl vytvořen pomocí skriptu **gabca.m** s nastavitelnými parametry σ , θ , λ a γ , parametr ψ je pevně nastaven na hodnotu 0. Na obraz je pak filtr aplikován pomocí konvoluční funkce **conv2**.

Následně je obraz otisku procházen pixel po pixelu, za účelem vložení odpovídajícího pixelu na základě orientace daného bodu. Výsledný obraz je tedy tvořen mozaikovitě.

```

G_OUT = zeros(r,c);
for i = 1:r
    for j = 1:c
        ori = img_orient_deg(i,j);
        uh(1) = abs(ori - 0);
    end
end

```

```

        .
        .
        uh(19) = abs(ori - 180);
        pozice = find(uh == min(uh));
        if numel(pozice) > 1
            pozice = min(pozice);
        end
        switch pozice
            case 1
                G_OUT(i,j) = GB{1}(i,j);
                .
                .
            case 18
                G_OUT(i,j) = GB{18}(i,j);
            case 19
                G_OUT(i,j) = GB{1}(i,j);
            otherwise
                %%%
        end
    end
end
end
end

```

Nejprve je aktuálnímu pixelu přiřazena jedna z hodnot odpovídající filtrovaným otiskům v bance, tedy číslo určující jeho přibližnou orientaci (0° až 170° s intervalem 10°). Výsledné „poskládání“ obrazu je provedeno pomocí funkce **switch**.

Zkonstruování Gáborova filtru vyžaduje výpočet orientací a frekvencí pole otisku. V této práci je však hodnota frekvence pro všechny otisky (pro zjednodušení) nastavena na 1/8. Tato hodnota byla vybrána kompromisem, jelikož se průměrná frekvence opakování hřebenů, u všech otisků z testovací databáze, pohybuje právě kolem této hodnoty.

Defaultní parametry pro použití Gáborova filtru v aplikaci byly nastaveny na hodnoty $\lambda = 8$, $\psi = 0$, $\gamma = 1$ a $\sigma = 3,15$.



Obr. 26: Původní otisk (vlevo), filtrovaný obraz s defaultně nastavenými parametry (vpravo)

Morfologické operace

Finálními úpravami pro následnou detekci významných bodů je binarizace a skeletizace. Pro binarizaci je nejprve určena prahová hodnota **level** pomocí příkazu **graythresh**. Ta je určena metodou Otsu. Binarizace je provedena funkcí **im2bw**.

```
level = graythresh(G_OUT);  
G_OUT = im2bw(G_OUT, level);
```

Ztenčení je provedeno pomocí morfologické funkce **bwmorph**. Výstup je pak opět prohledán pro odstranění výběžkovitých nebo osamocených pixelů.

```
I4 = bwmorph(~G_OUT, 'thin', 'inf');  
V4 = bwmorph(I4, 'spur', 4); %odstraneni vybezkovitych pixelu  
V5 = bwmorph(V4, 'clean'); %odstraneni osamocenyh pixelu
```



Obr. 27: Výsledný ztenčený otisk

4.3 Fáze extrakce významných bodů

Výstupní obraz otisku z předchozí fáze (viz. Obr. 27) je nyní zpracován pro nalezení markantů a singulárních bodů typu jádro a delta.

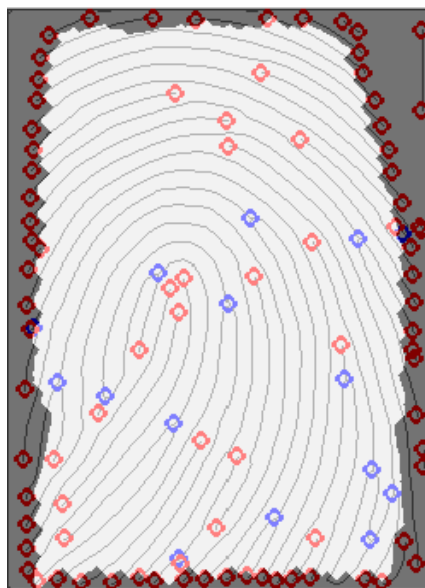
Extrakce markantů

Proces nalezení markantů otisku byl popsán v kapitole 2.2.1. Obraz je procházen bod po bodu, pokud je nalezen černý pixel (hodnota 0) je prozkoumáno jeho nejbližší okolí. Na základě počtu bílých pixelů (hodnota 1) a porovnání s maskami (platí pro bifurkace) je pixel buďto označen za markant nebo proces hledání pokračuje.

Mezi veškerými nalezenými markanty se však zpravidla nacházejí také falešné detekce. Je tedy nutné detekované body znovu projít a na základě definovaných pravidel markant nechat označený nebo jej odstranit.

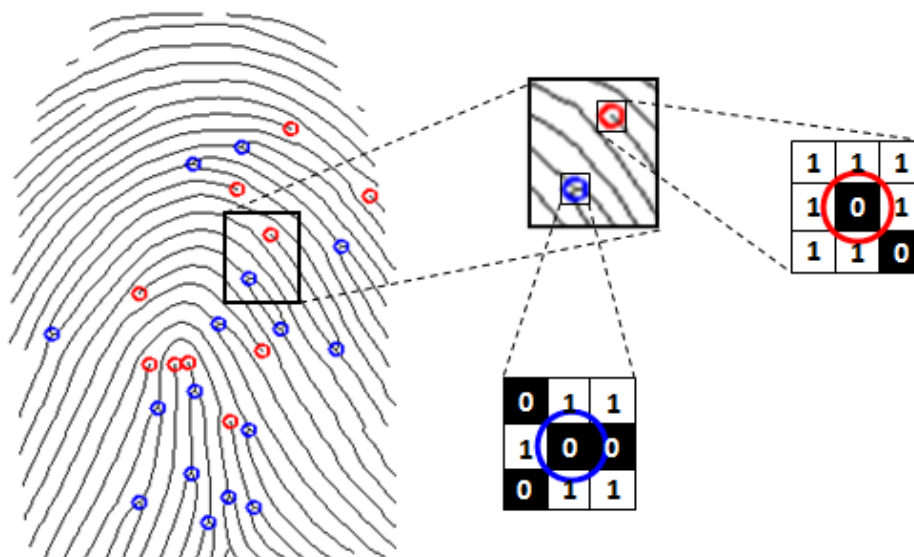
Mezi kontrolovaná pravidla patří podmínka na vzdálenost markantů a jejich pozice. Pokud jsou dva markanty typu bifurkace vzájemně blíže, než je vzdálenost 10, jsou oba markanty odstraněny. Pro zakončení linie platí stejná podmínka, ale vzdálenost je nastavena na hodnotu 7,5. Druhou podmínkou je pozice markantů uvnitř ROI. Pokud se markant nachází mimo vymezenou oblast, je také odstraněn (viz. Obr. 28).

Ve výsledném obrazu otisku prstu červená kolečka odpovídají zakončení linie a modrá kolečka bifurkaci (viz. Obr. 29).



Obr. 28: Veškeré nalezené markanty a zobrazení ROI

Všechny markanty, které se nacházejí v tmavé oblasti, jsou z procesu vyloučeny.



Obr. 29: Otisk s nalezenými markanty

zakončení linie ● bifurkace ●

Extrakce singulárních bodů

Vyhledání singulárních bodů jádro a delta bylo provedeno metodou výpočtu Poincaré Indexu. Algoritmus byl vytvořen podle rovnic 2.23–2.25, které jsou popsány v kapitole 2.2.2.

```
for i = 2:r-1
    for j = 2:c-1
        B = omikron(i-1:i+1,j-1:j+1);
        curve = [B(3,2),B(3,1),B(2,1),B(1,1),...
            B(1,2),B(1,3),B(2,3),B(3,3)];
        for k = 1:7
            del = [del (curve(k+1) - curve(k))];
        end
        del = [del (curve(1) - curve(8))];
        for l = 1:8
            if del(l) <= -pi/2
                del(l) = del(l) + pi;
            else if del(l) >= pi/2
                del(l) = del(l) - pi;
            else
                del(l) = del(l);
            end
        end
        PCI(i,j) = sum(del)/(2*pi);
        del = [];
    end
end
```

Délka digitální křivky byla nastavena na nejbližší okolí zkoumaného pixelu, tedy na hodnotu 8. Hodnoty pole orientací v proměnné **omikron** jsou postupně ukládány do vektoru **curve**. Výsledná matice **PCI** pak obsahuje pouze čtyři hodnoty odpovídající detekovaným singularitám (0, 1, ½ a -½).

Stejně jako u markantů lze i v tomto případě očekávat falešně detektované body. Všechny nalezené body jsou proto přezkoumány. Pro oba typy je vybrán právě jeden bod, tak aby odpovídal nastaveným podmínkám.

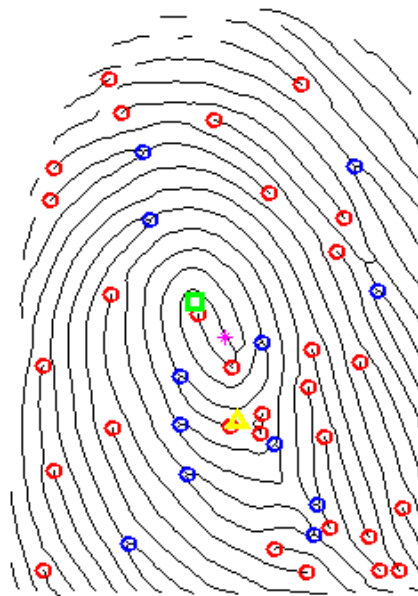
Pro výběr *jádra* platí, že je to bod, který leží nejbližší centru ROI a zároveň splňuje podmínku danou rovnicí 2.36.

```
s = regionprops(Iroi, 'centroid');
center = cat(1, s.Centroid);
```

Centrum ROI je určeno s využitím funkce **regionprops**. Do proměnné **center** jsou pak uloženy jeho souřadnice.

V případě, že alespoň v jednom z otisků jádro není možné detekovat, bude vypsána chybová hláška a otisky nemohou být porovnány.

Delta je označena jako bod, nejbližší ležící nalezenému jádru, musí však být od něj vzdálena alespoň na vzdálenost 9.



Obr. 30: Otisk se všemi vyznačenými body

jádru ■ delta ▲

Na Obr. 30 je možné vidět výstupní obraz této fáze se všemi nalezenými body. Zelený čtverec odpovídá jádru, žlutý trojúhelník deltě a fialová hvězda centru ROI.

4.4 Fáze porovnání otisků

Poslední fází zpracování otisků je fáze porovnání. To je provedeno na základě vypočtených vzdáleností mezi jádrem a deltou (pokud je v otisku přítomna) a jádrem a okolními bifurkacemi. Vzhledem k počtu a vyšší pravděpodobnosti falešného výskytu nejsou zakončení linie při porovnávání brána v úvahu.

Výstupním údajem je procentuální číselný údaj, který udává, v jaké míře jsou oba otisky stejné. Citlivostní práh, nad kterým dochází ke ztotožnění otisků, byl nastaven na hodnotu 60 %.

Porovnání jádra a delty

V případě, že se v obou otiscích nachází jádro i delta, je vypočtena jejich vzdálenost a úhel, pod kterým se nacházejí. Zjištěné vzdálenosti a úhly jsou uloženy do proměnných **vzd1**, **vzd2**, **ang1** a **ang2**. Následně je zjištěn rozdíl mezi těmito hodnotami. Pokud se obě hodnoty **S1** a **S2** nacházejí v toleranci (10 pro vzdálenost a 20° pro úhel) nabývá proměnná **MATCH1** hodnoty 100. V opačném případě je do **MATCH1** uložena 0.

```
S1 = abs(vzd1 - vzd2);
S2 = abs(ang1 - ang2);
if (S1 <= 10) && (S2 <= pi/9)
    MATCH1 = 100;
else
    MATCH1 = 0;
end
```

Nachází-li se delta pouze v jednom z otisků, je nejdříve zkontrolována její pozice v otisku. Pokud se delta nalézá blízko okrajů ROI, není do otisku započtena a porovnání proběhne pouze na základě vzdáleností jádro – bifurkace. Tímto lze ošetřit případy, kdy jsou dva stejné otisky nasnímány s posuvem, nebo je otisku pouze část, takže přítomnost delty je možné zaregistrovat jen u jednoho z otisků.

V případě, že se delta nachází v dostatečné vzdálenosti od okrajů ROI, je proměnné **MATCH1** automaticky přiřazena hodnota 0.

Jestliže se ani v jednom z otisků nenachází delta, je porovnání uskutečněno pouze podle vzdáleností jádro – bifurkace.

Porovnání jádra a bifurkací

Porovnání jádra s okolními body je provedeno v každém případě. Z otisku je vybráno 10 bifurkací, které jsou nejbližší jádru. Mezi jádrem a těmito body je poté vypočtena vzdálenost. Tyto údaje jsou pak uloženy do matice **FIN1** a **FIN2** společně s informacemi o orientaci každé bifurkace. Pokud v otisku není více než 9 bifurkací, je brán nejvyšší společný počet. Jestliže je však alespoň v jednom z otisků nalezeno méně než 3 bifurkace, dojde k výpisu chybové hlášky a otisky nebudou porovnány.

```
SCORE = 0;
for i = 1:numel(FIN1)/2;
    for j = 1:numel(FIN2)/2
        if FIN2(1,j) == 0
            continue;
        else
            D = abs(FIN1(1,i) - FIN2(1,j));
            if D <= rozsahD
                A = abs(FIN1(2,i) - FIN2(2,j));
                if A <= rozsahA
                    SCORE = SCORE + 1;
                    FIN2(1,j) = 0;
                    break;
                end
            end
        end
    end
end
MATCH2 = (SCORE * 100) / (numel(FIN1)/2);
```

Porovnávání probíhá systémem každý s každým. Mezi body se hledá shoda ve vzdálenosti a orientaci. Jestliže se body nacházejí v toleranci (20 pro vzdálenost a 15° pro orientaci) jsou body ztotožněny a hodnota ve **FIN2** vynulována, aby již nemohla být přiřazena jinému bodu bifurkace. Výstupem je proměnná **MATCH2**, ve které je uložen údaj procentuální shody.

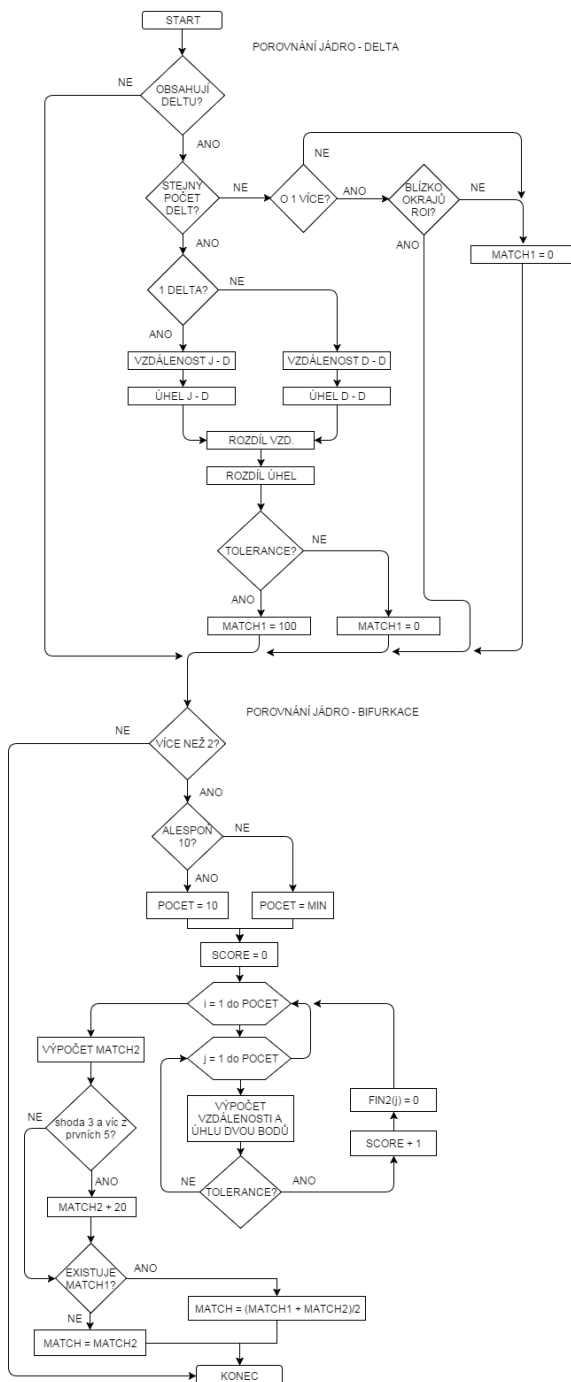
Doplňujícím porovnáním je počet ztotožněných bodů v pěti bifurkacích, které jsou nejbližší jádru. Pokud jsou takové body alespoň 3 z 5 je **MATCH2** navýšena o hodnotu 20.

Finální vyhodnocení shody mezi otisky je uskutečněno podle hodnot v **MATCH1** a **MATCH2**. V případě existence **MATCH1** jsou oba výsledky zprůměrovány. V opačném případě je výsledkem pouze **MATCH2**.

```

if exist('MATCH1') == 1
    MATCH = (MATCH1 + MATCH2)/2;
else
    MATCH = MATCH2;
end

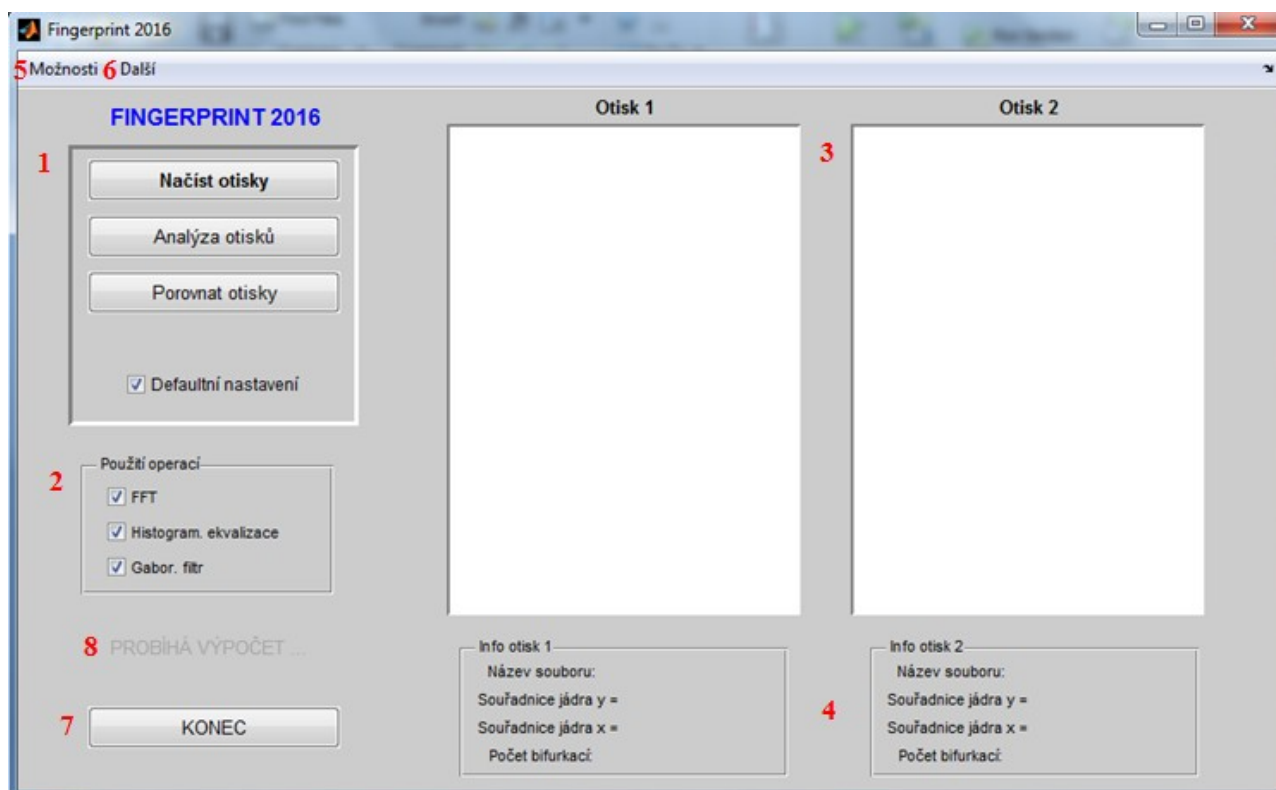
```



Obr. 31: Vývojový diagram porovnání

4.5 Grafické uživatelské prostředí

Aplikace pro porovnávání otisků prstů je ovládána pomocí grafického uživatelského prostředí (zkráceně GUI). Toto prostředí bylo vytvořeno programově, tedy vlastním naprogramováním jednotlivých komponent GUI. Pro vytvoření těchto komponent (tlačítka, panely, popisky,...) byly využity zejména funkce **uicontrol** a **uipanel**. Program lze spustit skriptem **FINGERPRINT_2016.m**. Stejný název nese také samotný program.

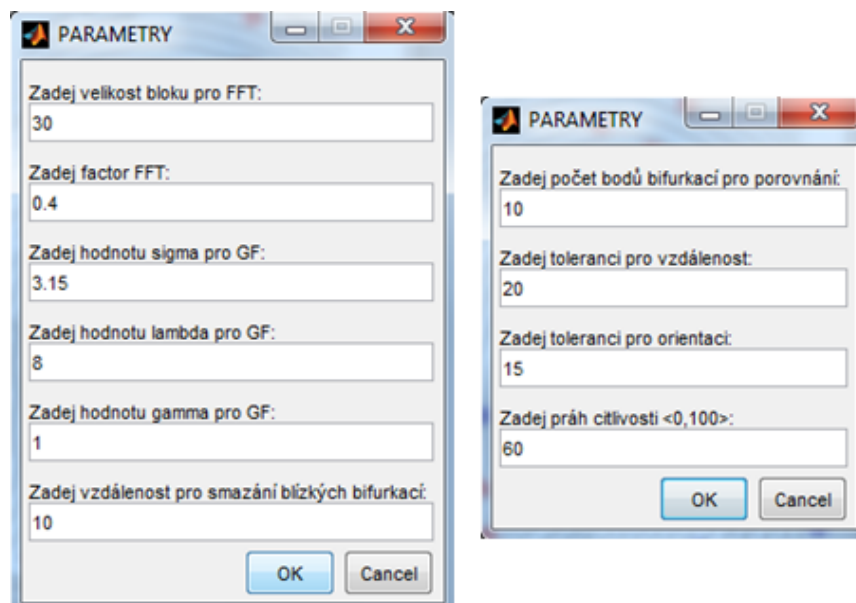


Obr. 32: GUI aplikace

Popis jednotlivých komponent GUI:

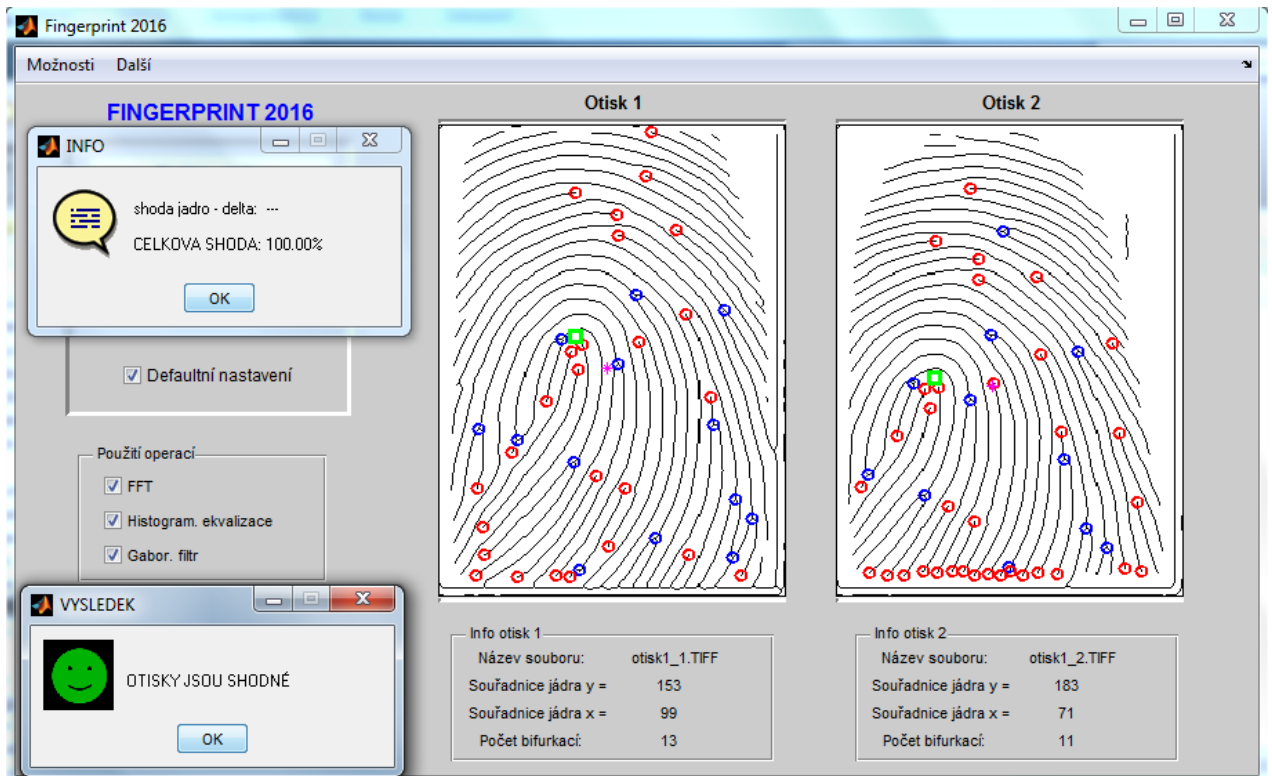
- 1) Hlavní ovládací panel
 - Načíst otisky – provede načtení dvou otisků ze zvoleného adresáře
 - Analýza otisků – aplikuje na otisky operace pro předzpracování otisků a nalezení významných bodů
 - Porovnat otisky – provede porovnání obou otisků
 - Defaultní nastavení – zaškrťovací políčko, pokud je zaškrtnuté, proběhne analýza a porovnání s defaultně nastavenými parametry. V opačném případě je možné, aby uživatel parametry nastavil sám (viz. Obr. 33).
- 2) Použití operací – zaškrtnutím příslušných políček (FFT, Histogramová ekvalizace nebo Gáborův filtr) může uživatel zvolit, které operace budou na otisky aplikovány

- 3) V panelech Otisk1 a Otisk2 jsou zobrazovány grafické výstupy obou otisků
- 4) Panely obsahující informace o obou otiscích (název otisku, souřadnice jádra a počet bifurkací)
- 5) Možnosti
 - Zobrazit aktuální otisky – umožňuje kdykoliv zobrazit původní načtené otisky
 - Uložit záznam – uložení záznamu ze zpracování a porovnání otisků. Jsou vytvořeny dva soubory: .txt (obsahující veškeré zadané parametry a výsledky) a .png (obrazy zpracovaných otisků).
- 6) Další
 - nápověda – zobrazí nápovědu k programu
 - O programu – zobrazí informace o programu
- 7) Konec – ukončí program
- 8) Indikace běžícího procesu – pokud je popisek zvýrazněn červenou barvou, probíhá výpočet

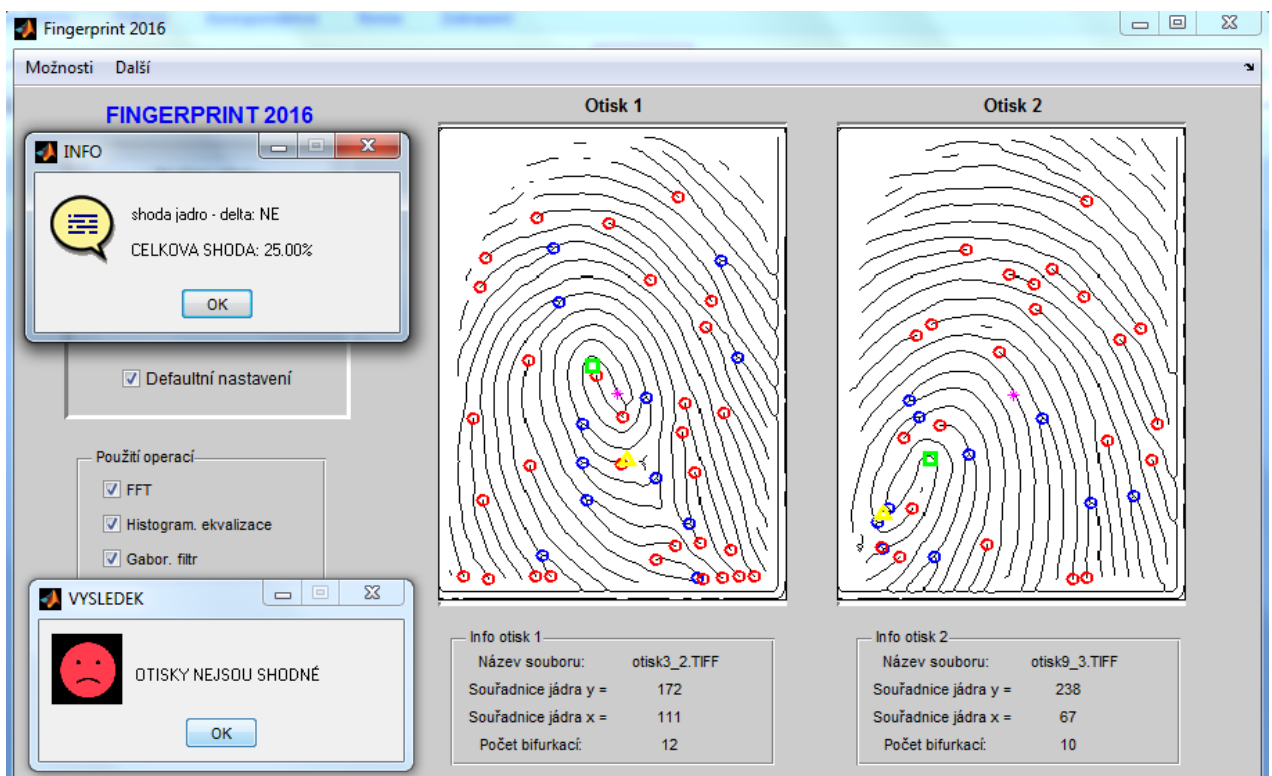


Obr. 33: Vkládání parametrů pro analýzu otisků (vlevo) a porovnání otisků (vpravo)

Výstupem aplikace a zároveň vyhodnocením shody dvou otisků jsou dvě vyskakovací okna. První informuje uživatele o detailech shody mezi otisky (shoda jádro – delta a celkovou procentuální shodu). Druhé poskytuje celkový výsledek, zda byly otisky ztotožněny nebo zamítnuty.



Obr. 34: Příklad shodných otisků



Obr. 35: Příklad rozdílných otisků

5. Výsledky a zhodnocení

Efektivita vytvořené aplikace byla ověřena na testovací databázi otisků. Tato databáze obsahovala celkem 16 druhů otisků, každý ve 3 různých verzích, dohromady tedy 48 obrazů otisků prstů. Velikost všech otisků byla 338 x 248. Mezi těmito obrazy se nacházely otisky v dobré kvalitě, ale také otisky v horších kvalitách.



Obr. 36: Ukázka otisků z testovací databáze

Na Obr. 36 lze vidět příklady otisků z testovací databáze. Horší kvalitu některých otisků způsobovaly zejména jizvy, které byly na prstu přítomny, dále pak špatné sejmutí otisku, vlhký otisk nebo nasnímání pouze části prstu.

Otisky byly porovnávány 1:1, testovala se tedy míra správného přijetí/zamítnutí a chybného přijetí/zamítnutí pro každý z šestnácti druhů otisků.

Pro každý otisk byla ověřena shoda se zbývajícemi dvěma stejnými otisky, a poté došlo k určení míry chybného přijetí s třiceti náhodně vybranými zástupci z ostatních druhů otisků prstů. Z každého druhu otisku byli pro tento účel vybráni dva zástupci.

Porovnání proběhlo při defaultně nastavených parametrech aplikace. Doba zpracování otisků při tomto nastavení byla přibližně 6 až 7 sekund.

Tab. 1: Dosažené výsledky aplikace

druh otisku	správné přijetí	chybné přijetí
1	100 % (3/3)	3,84 % (1/26)
2	100 % (3/3)	0 % (0/26)
3	100 % (3/3)	0 % (0/26)
4	33 % (1/3)	7,69 % (2/26)
5	100 % (3/3)	7,69 % (2/26)
6	—	—
7	100 % (3/3)	3,84 % (1/26)
8	66 % (2/3)	0 % (0/26)
9	100 % (3/3)	7,69 % (2/26)
10	100 % (3/3)	3,84 % (1/26)
11	100 % (3/3)	15,38 % (4/26)
12	100 % (3/3)	0 % (0/26)
13	100 % (3/3)	7,69 % (2/26)
14	100 % (3/3)	0 % (0/26)
15	—	—
16	100 % (3/3)	3,84 % (1/26)
CELKEM	92,85 % (39/42)	4,39 % (16/364)

Ve výše uvedené tabulce (Tab. 1) lze vidět výsledky, kterých aplikace dosáhla. Pro ověření správného přijetí byly otisky porovnány každý s každým, celkem tedy 3 porovnání pro každý druh otisku. Téměř všechny otisky v tomto testu dosáhly hranice 100 %, výjimkou byly otisky číslo 8 a 4. Výsledek 33 % u otisků číslo 4 byl způsoben především špatnou kvalitou těchto otisků. Celkově

proběhlo 42 porovnání, z nichž 39 bylo správně přijato, výsledkem tohoto ověření je tedy úspěšnost 92,85 %.

U sady otisků číslo 6 a 15 nebylo možné detekovat jádro, tudíž byly tyto otisky ze všech testů vyřazeny.

Pro test chybného přijetí bylo pro každého zástupce z jednoho druhu otisku vybráno třicet různých otisků k porovnání. Z výše uvedených důvodů se otisky číslo 6 a 15 tohoto testu nezúčastnily, celkový počet otisků k porovnání tedy klesl na hodnotu 26. Z výsledků je patrné, že většina otisků dosáhla nulového nebo maximálně jednoho až dvou chybných přijetí. Nejhůře dopadl otisk číslo 11, který byl chybně přijat 4x z 26 porovnání. Celkový počet porovnání v tomto testu se zastavil na metě 364, z toho 16 porovnání bylo chybně přijato. Míra chybného přijetí je tedy 4,39 %.



Obr. 37: Otisky číslo 6 (vlevo) a 15 (vpravo)

Z hlediska úspěšného ztotožnění otisků si aplikace vedla dobře. Celkový výsledek 92,85 % lze považovat za uspokojivý a dostačující pro uplatnění v komerčních aplikacích. Nicméně z pohledu bezpečnosti a míry chybného spárování otisků aplikace dosáhla příliš vysoké procentuální shody (více než 1 %). Výsledná aplikace se tedy nehodí pro bezpečnostní ani komerční využití, ovšem může si najít své uplatnění na akademické půdě, kde ji lze využít pro demonstrování jednotlivých postupů při rozpoznávání a klasifikaci otisků prstů.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření softwaru pro identifikaci osob na základě otisků prstů. Aplikace byla naprogramována v prostředí MATLAB a umožňuje porovnání dvou otisků prstů s vyhodnocením jejich procentuální shody.

Nezbytným předpokladem pro správně napsanou aplikaci bylo seznámení se s různými technikami, které se v praxi využívají pro zpracování digitálního obrazu otisku prstu. Po nastudování těchto podkladů a napsání rešeršní práce byly vybrány metody a postupy pro vytvoření vlastního klasifikačního programu. Algoritmus byl navržen tak, aby v otisku vyhledával specifické rysy otisku, tzn. singulární body a markanty. Porovnání dvou otisků probíhalo na základě srovnání vzdálenosti a vzájemné polohy těchto bodů. Zmíněný postup byl vybrán, jelikož je v praxi často uplatňovanou metodou.

Ověření funkčnosti vytvořené aplikace proběhlo na databázi obsahující 48 obrazů otisků. Z hlediska míry správného přijetí byl dosažen uspokojivý výsledek 92,85 %, avšak procento falešného přijetí bylo vyšší, než je nastavená míra pro bezpečnostní aplikace. Výsledný program se tedy pro tyto účely nehodí.

Nepřesnosti při porovnávání otisků byly způsobeny především horší kvalitou některých otisků, z čehož vyplývá i jednoznačná závislost spolehlivosti výsledku na kvalitě otisku. Další eventualitou, která mohla způsobit chybný výsledek, bylo ne úplně dokonalé zkvalitnění otisku ve fázi předzpracování. Důvodem však mohla být opět nižší kvalita obrazové předlohy otisku.

Další rozšíření aplikace vidím v důkladnějším zpracování otisku prstu tak, aby byl systém schopen správně ztotožnit resp. zamítnout také otisky v nižších kvalitách. Možností také může být přidání další podpůrné metody porovnání otisků, aby bylo možné rozpoznat a klasifikovat i otisky, ve kterých nelze detekovat jádro. To v současnosti není možné, jelikož se detekční systém aplikace opírá o nalezení pevného bodu otisku, kterým je jádro.

Literatura

- [1] GOWTHAMI, A. T. a H. R. MAMATHA. Fingerprint Recognition Using Zone Based Linear Binary Patterns. *Procedia Computer Science* [online]. 2015, 58: 552-557. DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.072. ISSN 18770509.
- [2] GOPI, Kondreddi a J. T. PRAMOD. Fingerprint Recognition Using Gabor Filter And Frequency Domain Filtering. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*. 01/2012n. 1., 2(6): 17-21. DOI: 10.9790/2834-0261721.
- [3] PORNANOMCHAI, C. a A. PHAISITKULWIWAT. Fingerprint Recognition by Euclidean Distance. *Computer and Network Technology (ICCNT), 2010 Second International Conference on*. 2010, 437 - 441. DOI: 10.1109/ICCNT.2010.100.
- [4] MAIO, D. a D. MALTONI. A structural approach to fingerprint classification. *Pattern Recognition, 1996., Proceedings of the 13th International Conference on*. 1996, 13th (vol. 3), 578 - 585. DOI: 10.1109/ICPR.1996.547013.
- [5] Kameswara Rao, Kenneth Balck, "Type Classification of Fingerprints: A Syntactic Approach", *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, vol. 2, no. 3, pp. 223-231, March 1980, DOI: 10.1109/TPAMI.1980.4767009
- [6] RAK, Roman, Vašek MATYÁŠ a Zdeněk ŘÍHA. Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2008, 631 s., 32 s. obr. příl. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [7] GONZALEZ, Rafael C a Richard E WOODS. *Digital image processing*. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002, xx, 793 s. ISBN 0-201-18075-8.
- [8] MALTONI, Davide, et al. *Handbook of Fingerprint Recognition*. Second Edition. London, Springer 2009. ISBN 978-1-84882-253-5.
- [9] ZAHEDI, M. a O. R. GHADI. Combining Gabor filter and FFT for fingerprint enhancement based on a regional adaption method and automatic segmentation. *Signal, Image and Video Processing*. Springer London, 2015, (9), 267-275. DOI: 10.1007/s11760-013-0436-3.
- [10] THAI, Raymond. Fingerprint image enhancement and minutiae extraction. *The University of Western Australia*, 2003.
- [11] Fingerprint. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fingerprint>
- [12] KAZÍK, Martin. *ZPRACOVÁNÍ OTISKŮ PRSTŮ*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce ING. KAMIL ŘÍHA, PH.D.
- [13] HONG, Lin; WAN, Yifei; JAIN, Anil. Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation. *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*. 1998, vol. 20, no.8, s. 777-789.

- [14] BO, Jin; PING, Tang Hua; LAN, Xu Ming. Fingerprint singular point detection algorithm by Poincaré index. *wseas transactions on systems*, 2008, 7.12: 1453-1462.
- [15] JAIN, Anil; PRABHAKAR, S.; HONG L.; PANKANTI, Sharath, „Filterbank-Based Fingerprint Matching,“ *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 9, no. 5, s. 846-859, 2000.
- [16] CAPPELLI, Raffaele, et al. Fingerprint Classification by Directional Image Partitioning. *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*. 1999, vol. 21, no.5, s. 402-421.
- [17] IWASOKUN, Gabriel Babatunde, and Oluwole Charles AKINYOKUN. "Fingerprint Singular Point Detection Based on Modified Poincare Index Method." *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 7, no. 5 (2014): 259-272.
- [18] ROSA, Luigi. *Core Point Detection Using Orthogonal Gradient Magnitudes of Fingerprint Orientation Field*.
- [19] PRAŽENKA, Miroslav. *Detekční systém s identifikací osob z obrazového signálu analýzy prstu*. Ostrava, 2015. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Macháček, Ph.D.

Seznam příloh

A. Obsah přiloženého CD	54
B. Rešerše	55
C. Vzorový protokol	69
D. Vzorový protokol: klíč	75

A. Obsah přiloženého CD

soubor	popis
BP_HOL0267_Holub.pdf	PDF soubor obsahující textovou část bakalářské práce a přílohy B a C
program_HOL0267_Holub	Adresář se zdrojovými kódy programu
protokol_klic_HOL0267_Holub.pdf	PDF soubor s vypracovanou verzí vzorového protokolu (příloha D)

B. Rešerše

Název CZ: Rozpoznání a klasifikace otisku prstů

Název EN: Recognition and Classification of Fingerprints

Klíčová slova: otisk prstu, klasifikace, euklidovská vzdálenost, binarizace, skeletizace, Gáborův filtr, neuronová síť, relační graf, lineární binární vzory

Key words: fingerprint, clasiffication, euclidian distance, binarization, skeletonization, Gabor filter, neuron network, relation graph, linear binary patterns

Použité EIZ: ScienceDirect, ResearchGate, IEEE Xplore

1. Východiska rešerše

Biometrie je již několik desítek let metodou používanou pro identifikaci a ověření totožnosti osob. Mezi nejspolehlivější biometrické znaky patří otisk prstu, který je pro každého člověka jedinečný a nezaměnitelný. Metoda rozpoznávání a klasifikace otisků prstů je velmi hojně využívána nejen pro osobní účely, ale také pro komerční aplikace, jako jsou zámky dveří nebo přihlašování do počítače. Otisky prstů hrají také důležitou roli v kriminalistice, kde jsou často klíčem k usvědčení osob ze spáchaného zločinu.

Cílem rešerše bylo získat nové poznatky a přehled o metodách a postupech, které jsou použity pro rozpoznání a klasifikaci otisků prstů, a tyto poznatky následně využít pro výslednou softwarovou implementaci vlastního algoritmu pro klasifikaci otisku prstů.

Rešerše se přímo zabývá metodami a postupy pro rozpoznávání a klasifikaci otisků prstů. V rešerši jsou také uvedeny závěry, ke kterým autoři článků dospěli.

Rešerše byla vyhotovena přes zdroje Ústřední knihovny Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava a byla provedena jako první bod bakalářské práce.

Název: Fingerprint Recognition Using Zone Based Linear Binary Patterns

Autoři: A. T. Gowthami, H. R. Mamatha

Publikováno: Procedia Computer Science

Tato studie se zabývá rozpoznáním otisku prstu na základě použití lineárních binárních vzorů, kdy je obraz otisku rozdělen do 9 stejných bloků, ve kterých jsou tyto binární vzory identifikovány. Následná klasifikace je provedena za pomoci neuronových sítí a výpočtu euklidovské vzdálenosti.

Prvním krokem této metody klasifikace je předzpracování obrazu, to slouží pro převod obrazu do formy, ve které lze snadněji detekovat důležité markanty otisku. V tomto článku autor využil změny velikosti obrazu (resize) a proces binarizace (binarization), kdy je obraz převeden do formátu obsahující pouze 1 a 0. Rozdělení je uskutečněno na základě prahovací hodnoty (threshold value).



Obr. 38: Původní otisk (vlevo), zmenšený otisk (uprostřed), binarizovaný otisk (vpravo) [1]

Pro extrakci markantů jsou použity lineární binární vzory (viz. Obr. 39). Pro tuto studii autor pracoval se vzorem „10“.

Linear Binary Patterns
00
01
10
11

Obr. 39: Příklady lineárních binárních vzorů [1]

Popis algoritmu:

- 1) Načtení obrazu otisku prstů
- 2) Zmenšení obrazu otisku na velikost 60x60
- 3) Binarizace obrazu
- 4) Rozdělení obrazu na 9 stejně velkých oblastí (viz. Obr. 40)
- 5) V každém z devíti bloků je hledán zvolený vzor na horizontální úrovni (viz. Obr. 41)
- 6) Pro každý otisk je získán vektor obsahující markanty

Zone1	Zone2	Zone3
Zone4	Zone5	Zone6
Zone7	Zone8	Zone9

Obr. 40: Rozdělení do "zón" [1]

0	0	0	1	1	0	0	0
1	0	1	1	1	1	0	0
0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	1	1	0
1	1	1	1	0	1	1	0
0	1	0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	0

Obr. 41: Příklad vyhledávání vzoru "10" [1]

Pro klasifikaci otisků prstu byly použity dvě metody. Metoda klasifikace pomocí neuronových sítí a metoda „nejbližšího souseda“.

Klasifikace na základě neuronových sítí využila neuronovou síť s možností zpětného toku informací, tedy stav, při kterém dochází k trénování neuronové sítě tokem dat. Data se pohybují dopředným směrem od vstupního uzlu skrze jednu skrytou vrstvu, která používá sigmoidní signální funkci, do výstupního uzlu. Na tomto uzlu dochází k výpočtu chyby a následné kompenzaci procesu, tak aby byla chyba na výstupu co nejvíce potlačena.

Metoda tzv. „nejbližšího souseda“ využila výpočtu euklidovské vzdálenosti vektoru markantů, které byly získány z binarizovaného a rozděleného obrazu. Byla vypočtena vzdálenost mezi vstupním (testovacím) vektorem a všemi vzorovými vektory. Vektor, pro který byla vzdálenost nejmenší, byl přiřazen k testovacímu vektoru.

Rovnice:

$$VZD = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2}$$

q_i ... hodnoty testovacího vektoru
 p_i ... hodnoty vzorového vektoru

Tab. 2: Úspěšnost algoritmu [1]

Database name	Neural network classifier (%)	Euclidean distance similarity measure (%)
FVC2002DB1	96.66	92.10
FVC2002DB2	92.00	88.14
FVC2002DB3	94.14	89.98
FVC2002DB4	94.50	90.84
FVC2004DB1	94.00	92.56
FVC2004DB2	92.32	91.23
FVC2004DB3	95.00	93.00
FVC2004DB4	95.67	94.39
Overall average	94.28	91.15

Na výše uvedené tabulce je vidět úspěšnost testovaného algoritmu. Autor hodnotí metodu klasifikace neuronových sítí jako přesnější, ve srovnání s druhou implementovanou metodou. Pomocí neuronových sítí bylo dosaženo průměrné úspěšnosti 94.28 %, pomocí metody „nejbližšího souseda“ úspěšnosti 91.15 %.

Metoda rozpoznání a klasifikace otisků prstů řešená v této studii je velice přesná. Avšak implementace neuronových sítí, s možností zpětného toku dat, je docela komplikovaná i výpočetně náročná, pro použití v mé bakalářské práci je tedy nevhodná.

Název: Fingerprint Recognition Using Gabor Filter And Frequency Domain Filtering

Autoři: K. Gopi, J. T. Pramod

Publikováno: IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering

V tomto článku se autoři zabývají zejména předzpracováním obrazu otisku prstu, a metodami filtrace obrazu. V práci popisují využití kombinace Gáborova filtru a Fourierovy transformace (FFT), a dále morfologických obrazových operací. Pro klasifikaci byla použita metoda euklidovské vzdálenosti.

Gáborův filtr i Fourierova transformace je v oblasti obrazového předzpracování používána ke zkvalitnění obrazu a odstranění šumu.

Matematické vyjádření Gáborova filtru:

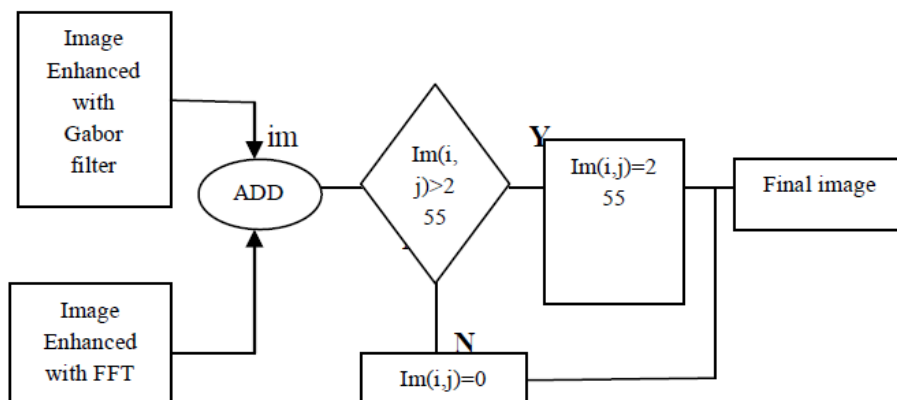
$$G(x, y) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x^2}{\delta_x^2} + \frac{y^2}{\delta_y^2} \right] \right\} * \cos(2\pi f x)$$

Matematické vyjádření Fourierovy transformace:

$$F(U, V) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) * \exp \left\{ -j2\pi * \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right\}$$

Pro zkvalitnění filtrace je otisk rozdělen na bloky (obvykle 32x32 pixelů) a v každém bloku je aplikován vlastní Gáborův i Fourierův filtr.

Autoři článku použili pro filtrování obrazu otisku obě zmíněné metody. Pro získání výsledného obrazu provedli algebraický součet dílčích obrazů. Jednotlivé obrazy je vidět na Obr. 43.



Obr. 42: Blokové schéma filtrační metody [2]



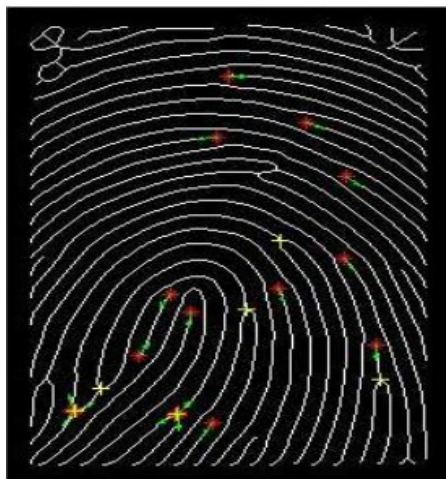
Obr. 43: Gáborův filtr (vlevo), FFT (uprostřed), spojené obrazy (vpravo) [2]

Dalším krokem předzpracování obrazu byla binarizace. Prahovací hodnota rozděluje obraz pouze na pixely o hodnotách 1 nebo 0. Po jejím zvolení byly všechny pixely s hodnotou nižší než prahovací označeny 0, a pixely s vyšší hodnotou jako pixely 1. Pro snazší detekování markantů otisku bylo nutné ještě provést ztenčení, které spočívá ve ztenčení linií papilárních linií pouze na šířku jednoho pixelu. Výsledné obrazy těchto morfologických operací je vidět na Obr. 44.



Obr. 44: Binarizovaný obraz (vlevo), ztenčený obraz (vpravo) [2]

Po ztenčení byla provedena extrakce markantů (zakončení linií, větvení). Extrakce spočívala v prohledávání obrazu pixel po pixelu a hledání pixelů s hodnotou 1 a zkoumání bloku 3x3, se středem v daném pixelu. Pokud se v daném bloku nacházely přesně tři pixely s hodnotou 1, byl středový pixel označen jako větvení. Pokud se v bloku nacházel přesně jeden pixel s hodnotou 1, pixel byl označen jako zakončení. Extrahované markanty jsou patrné na Obr. 45.



Obr. 45: Obrázek otisku po odstranění falešných markantů [2]

Popsaná metoda předzpracování a klasifikace otisku prstů, využívající výpočtu euklidovské vzdálenosti, dosahuje v testech úspěšnosti 95 %. Chybné rozpoznání u této metody způsobuje nejčastěji různá pozice a natočení testovaného otisku a vzorového otisku. Tato chyba by mohla být eliminována vycentrováním obrazu podle jádra otisku.

Tento článek se zabývá metodami, které jsou při předzpracování a rozpoznání otisku prstu často používány v praxi, ať už jde o Gáborovy filtry, Fourierovy transformace nebo výpočet euklidovské vzdálenosti. Pro mou bakalářskou práci se mi jeví jako vhodné postupy pro finální implementaci vlastního klasifikačního algoritmu.

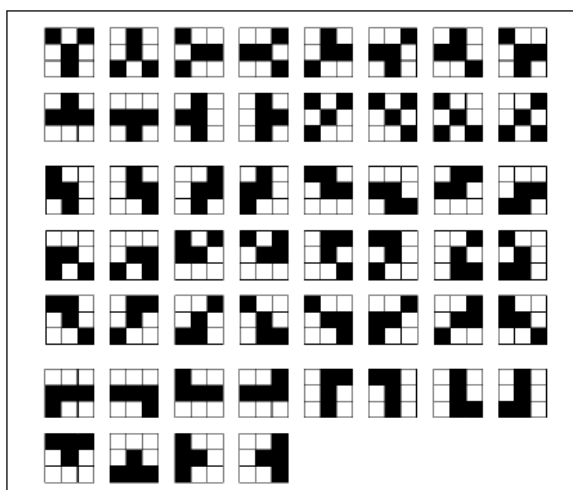
Název: Fingerprint Recognition by Euclidean Distance

Autoři: C. Pornpanomchai, A. Phaisitkulwiwat

Publikováno: Computer and Network Technology (ICCNT), 2010 Second International Conference

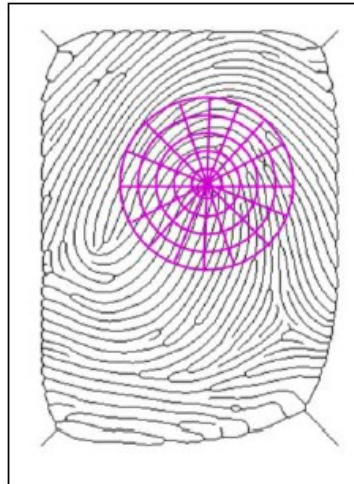
Tento článek shrnuje metody rozpoznávání otisku prstu a popisuje metodu klasifikace na základě výpočtu euklidovské vzdálenosti mezi významnými body otisku. Systém se skládá ze tří částí, první se zabývá předzpracováním obrazu, druhá extrakcí významných bodů a třetí porovnáním s otisky v databázi.

Část předzpracování obrazu využila známé techniky binarizace, skeletizace a morfologických operací pro získání kvalitního otisku. Pro tuto techniku bylo nutné z obrazu otisku extrahovat body bifurkace a jádrový bod. Extrakce jádrového bodu proběhla na základě metody ASDF (average squared direct field), která pracuje s určením orientací linií v otisku. Extrakce bodů bifurkace využila porovnání s maskami o velikosti 3x3 pixelů. Ukázky masek jsou vidět na Obr. 46.



Obr. 46: Masky bifurkace [3]

Po nalezení jádrového bodu a všech bodů bifurkace byl otisk rozdělen do pěti kruhových drah, se středem v jádrovém bodě, a ty byly dále rozděleny na šestnáct oddílů (viz. Obr. 47).



Obr. 47: Rozdělení otisku [3]

Následně byla podle uvedené rovnice vypočtena euklidovská vzdálenost mezi jádrovým bodem a každým bodem bifurkace v každé dráze a oddílu.

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

D ... vzdálenost

(x_1, y_1) ... souřadnice jádrového bodu

(x_2, y_2) ... souřadnice bifurkace

Pro klasifikaci byla v každém z šestnácti oddílů vypočtena nejkratší vzdálenost mezi jádrovým bodem a bodem bifurkace. Tímto způsobem bylo získáno šestnáct hodnot. Porovnáním těchto hodnot bod po bodu s databází byl nalezen otisk, jehož hodnoty se nejvíce blížily hodnotám testovaného otisku.

Při testování tato metoda dosáhla průměrné úspěšnosti 85 %, což lze považovat za velice dobrý výsledek. Technika klasifikace otisků prstů na základě výpočtu euklidovské vzdálenosti je poměrně jednoduchá a zároveň efektivní. Problémem by mohla být extrakce bodů z otisku, který by nebyl dostatečně kvalitní, tomuto lze však částečně předejít použitím obrazových filtrů v části předzpracování obrazu. Pro účely mé bakalářské práce je tato metoda velice užitečná.

Název: A structural approach to fingerprint classification. Pattern Recognition

Autoři: D. Maio, D. Maltoni

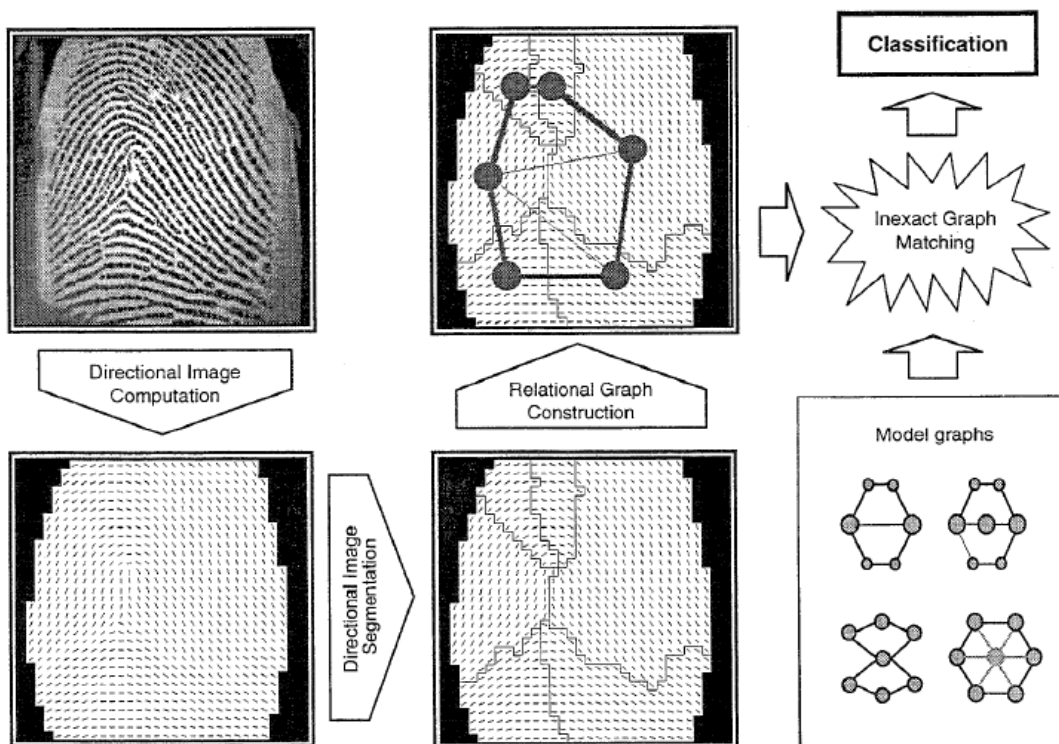
Publikováno: Proceedings of the 13th International Conference

V této práci autoři představují způsob rozpoznávání otisků prstů, který se řadí mezi metody strukturální. Tato metoda využívá obrazu orientovaného pole, který je rozdělen na oblasti se stejnou papilární orientací. Na základě tohoto rozdělení je vytvořen relační graf otisku, který je následně porovnáván s ostatními grafy spadajícími do stejné třídy.

Prvním krokem byl výpočet orientovaného pole otisku, tedy pole, které znázorňuje orientace všech papilárních linií v otisku. Pro určení orientovaného pole použili autoři článku metodu založenou na výpočtu gradientů. Následně byla provedena segmentace obrazu do oblastí s podobnou orientací. K tomu autoři využili algoritmus, který prochází jednotlivé elementy orientovaného pole a přiřazuje je do jednotlivých oblastí.

Relační graf popisuje vzor otisku několika informacemi a vztahy (poloha těžiště oblasti, průměrná orientace elementů v oblasti, vzájemná poloha dvou těžišť a další). Relační graf aplikovaný v této studii nevyužívá všech dostupných informací, avšak zaručuje neměnnost s ohledem na polohu otisku.

Klasifikace byla provedena na základě rozřazování grafů do tříd. Algoritmus pracuje tak, že porovnává testovaný relační graf s modelovými grafy, které byly vytvořeny zprůměrováním jednotlivých grafů dané třídy. Podle následného výpočtu vzdáleností mezi body grafu a připočtením tolerance byl testovaný graf přiřazen do stejné třídy. Další klasifikaci však autoři již nepopisují.



Obr. 48: Schéma klasifikace otisku [4]

Autoři předpokládají další rozvoj této metody v budoucnu, se zaměřením především na přiřazování grafů do jednotlivých tříd a další kroky v klasifikaci otisku prstu.

Článek dobře popisuje algoritmy pro segmentaci otisku a vytvoření relačního grafu. Výhodou této metody je, že není nutné předzpracování obrazu (binarizace, skeletizace), jako je tomu u jiných metod. Pro klasifikaci tříd také není nutné brát ohled na orientaci otisku. Autoři článku nedošli k jednoznačné klasifikaci otisku, avšak s ohledem na rok publikování této studie lze předpokládat, že v současné době již došlo k zefektivnění algoritmu a dalšímu pokroku při bližší klasifikaci otisku.

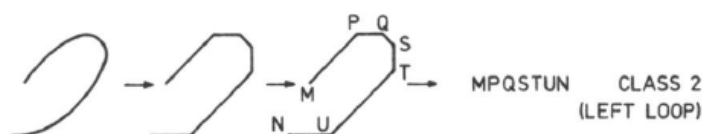
Název: Type Classification of Fingerprints: A Syntactic Approach

Autoři: K. Rao, K. Balck

Publikováno: IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence

V této studii se autoři článku zabývají syntaktickou metodou rozpoznávání otisku prstu, která je založena na převodu toku linií do konečného řetězce symbolů.

Algoritmus pracuje tak, že převádí papilární linie do řetězce symbolů, kde každý symbol vyjadřuje změnu směru toku linie (viz. Obr. 49).



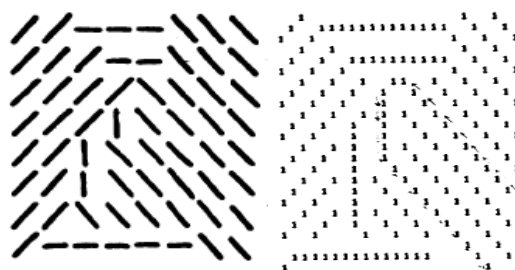
Obr. 49: Ukázka převodu [5]

Tímto způsobem algoritmus vyhledává deset nadefinovaných tříd. Jedná se o pravou a levou smyčku, pravou a levou ulnární smyčku, závit, pravou a levou dvojitou smyčku, oblouk, oblouk s vyvýšeným středem a přechodný stav mezi třídami.

Na začátku byl obraz o velikosti 256 x 256 rozdělen oddíly 32 x 32 (tedy 64 oddílů). Pro každý oddíl byl poté určen směrový kód, definující směr toku linie v daném oddílu (viz. Obr. 50). Pro jednoznačné určení směru byly směrové kódy převedeny na matici 3x3, obsahující 1 a 0. Aplikací speciálních operátorů na vzorkovací matici daného oddílu byla získána výsledná úprava (viz. Obr. 51).



Obr. 50: Směrové kódy [5]



Obr. 51: Vzorkovací matice (vlevo), výsledná úprava (vpravo) [5]

Dalším krokem bylo nalezení zakončení linií a míst, kde docházelo ke změně směru linie. To bylo provedeno pomocí nadefinovaných masek o velikosti 3x3. Každý typ zakončení i změny směru reprezentuje určitý symbol.

Po této úpravě byl proveden sken celého obrazu pro nalezení označených symbolů, a symbolů, které s ním byly spojeny řadou hodnot 1. Následně, po odstranění hodnot 1 z řetězce, byly získány řetězce symbolů, reprezentující toky linií v otisku. Poslední úpravou před klasifikací bylo odstranění řetězců, které představují přímé linie (řetězce obsahující pouze dva symboly).

Autoři článku založili klasifikaci na základě nalezené pravé smyčky, kterou představuje řetězec symbolů „KQPRWK“. Různé pravé smyčky se však mohou mírně lišit, a ne vždy musí odpovídat stejnému řetězci. Pro univerzálnost byl symbol PR převeden na znak Å.

Klasifikace pro pravou smyčku využila kontextovou gramatiku, která pracuje na základě nahrazování symbolů podle definovaných produkčních pravidel. Tímto způsobem se hledá shoda.

Článek popisující syntaktickou metodu rozpoznávání otisku prstu dosáhl v testech vysoké úspěšnosti. Avšak různorodost tvarů a řetězců symbolů vyžadují konstrukci složité gramatiky. V praxi se tento způsob téměř nepoužívá pro svou složitost a neefektivnost, není proto ani vhodný pro aplikaci v mé bakalářské práci.

2. Výsledky rešerše

Problematikou rozpoznávání a klasifikace otisků prstů se zabývá mnoho studií a je rozebírána v mnoha odborných člancích. V této rešerši jsem se zaměřil na různé metody rozpoznávání a klasifikace otisků prstů, ať už se jedná o strukturální metody, syntaktické metody, metody založené na vyhledávání významných markantů nebo využití neuronových sítí. Pro každou z popsaných metod jsem zhodnotil jejich klady a zápory za účelem nalezení optimálního návrhu a realizace vlastního klasifikačního algoritmu.

Z výsledků je patrné, že nejschůdnější metodou je klasifikace na základě výpočtu vzdáleností mezi důležitými body otisku, jako jsou body bifurkace a jádro či delta. Tento algoritmus je také pro svou jednoduchost a efektivitu často používaným v praxi. Pro mou bakalářskou práci budou také přínosné informace o předzpracování obrazu otisku prstu popsané v článku [2].

Součástí mé bakalářské práce bude vlastní program napsaný v prostředí MATLAB, který se bude zabývat rozpoznáváním a klasifikací otisků prstů, a následné využití celého softwaru pro účely školní laboratorní úlohy.

C. Vzorový protokol

1. Zpracování a analýza otisků prstů

1.1 Cíl úlohy

Prostřednictvím této laboratorní úlohy se naučíte:

- Zpracovat otisk prstu za účelem jeho zkvalitnění pro porovnání
- Aplikovat operace pro zpracování otisku pomocí prostředí MATLAB
- Pochopit důležitost a vliv Gáborova filtru na kvalitu výsledného obrazu
- Vyhodnotit výhody a nevýhody zpracování kvalitních a nekvalitních otisků

1.2 Zadání

1. Ověřte míru správného přijetí shodných otisků prstů pro nastavený citlivostní práh 60 % a 90 %. Porovnejte rozdíly.
2. Zkoumejte vliv Gáborova filtru na kvalitu výstupního otisku. Popište rozdíly.
3. Popište vliv změny parametru *factor FFT* na kvalitu Fourierovy transformace.

1.3 Předpokládané znalosti

Pro tuto úlohu se vyžaduje nastudování:

- R. Hájovský, R. Pustková, F. Kutálek, Zpracování obrazu v měřicí a řídicí technice, 2012

Zaměřte svoji pozornost na následující témata:

- Kapitola 2: Korekce obrazu a histogram
- Kapitola 3: Detekce hran
- Kapitola 4: Prahování, segmentace obrazu
- Kapitola 5: Filtrace obrazu
- Kapitola 7: Transformace obrazových signálů, Fourierova transformace, použití FT

1.4 Použité vybavení

- počítač
- MATLAB

1.5 Teoretický rozbor

Metoda identifikace založená na rozpoznání otisku prstu patří mezi nejvyspělejší a nejpoužívanější techniku. Identifikace je založena na skutečnosti, že otisk prstu je pro každého člověka jedinečný a nezaměnitelný. Oblast využití otisků prstů je široká. V praxi je najdeme běžně u osobních, komerčních i bezpečnostních aplikací. Důležitou roli hrají v kriminalistice, kde bývají často klíčem k usvědčení osob ze spáchaného zločinu.

Aby bylo možné otisk správně klasifikovat, je nutné ho nejdříve patřičně zpracovat. Díky tomuto procesu předzpracování otisku lze docílit celkového zkvalitnění, což je výhodné zejména u otisku v nižších kvalitách.

Kompletní zpracování otisku prochází těmito operacemi:

- Histogramová ekvalizace
- Fourierova transformace
- Výpočet orientovaného pole
- Gáborův filtr
- Morfologické operace

Jednou ze stěžejních operací ve fázi předzpracování obrazů otisků prstů je aplikace **Gáborova filtru**. Tento filtr je směrově i frekvenčně nastavitelný, čímž výrazně přispívá k celkovému zvýraznění struktury hřebenů a potlačuje ostatní nežádoucí složky. Filtr pracuje jako filtr typu pásmová propust.

Matematické vyjádření Gáborova filtru:

$$G(x, y; \theta, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_{\theta}^2}{\delta_x^2} + \frac{y_{\theta}^2}{\delta_y^2} \right] \right\} \cdot \cos(2\pi f x_{\theta}) \quad (1.1)$$

$$x_{\theta} = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (1.2)$$

$$y_{\theta} = -x \cdot \sin \theta + y \cdot \cos \theta \quad (1.3)$$

Filtr má nastavitelné parametry ψ , γ , σ , θ a δ . Správně zvolenými parametry lze vytvořit filtr přesně na míru každému jedinečnému obrazu otisku.

V praxi nejběžnější metoda porovnání dvou otisků je založena na extrakci a srovnání charakteristických rysů otisku, tzn. markanty (zakončení linie, bifurkace, ...) a singulární body (jádro, delta). Mezi těmito body se hledá shoda ve vzdálenosti a úhlu, který vzájemně svírají. Singulární body jsou vyhledány pomocí metody **Poincaré Indexu**, která počítá úhlovou sumaci linií, které bezprostředně obklopují daný typ markantu. Výsledná hodnota poté odpovídá jednomu ze tří typů singularit.

- **1/2** jednoduché jádro (smyčka)
- **1** dvojité jádro (vír)
- **-1/2** delta
- **0** žádný z výše uvedených typů

Markanty jsou extrahovány pomocí jednoduchého maticového vyhledávání.

P8	P1	P2
P7	P	P3
P6	P5	P4

Obr. 1: Matice okolí markantu 3x3

Pro zakončení linie platí podmínka:

$$\sum_{i=1}^8 P(i) = 7 \quad (1.4)$$

Pro bifurkace platí podmínka:

$$\sum_{i=1}^8 P(i) = 5 \quad (1.5)$$

V tomto případě je však ještě nutné nalezené pixely porovnat s maskami definující tvary bifurkací, aby byly eliminovány případné chybně nalezené bifurkace.

1.6 Pracovní postup

1.6.1 Postup k bodu č. 1 zadání

Míra správného přijetí udává procentuální úspěšnost spárování dvou shodných otisků. Je žádoucí, aby byla tato hodnota co nejbližší 100 %.

- 1) Ze složky s otisky vyberte 3 různé druhy otisků ve všech variantách (3 otisky ve 3 variantách).
- 2) Odškrtnutím políčka *Defaultní nastavení* umožníte manuální nastavení citlivostního prahu.
- 3) Pro jednotlivé druhy uskutečnete porovnání shodných otisků systémem každý s každým. Výsledek si zapište do připravené tabulky.
- 4) Pro stejné otisky opakujte test s nastaveným citlivostním prahem na hodnotu 90 %.
- 5) Zhodnoťte výsledky.

1.6.2 Postup k bodu č. 2 zadání

- 1) Ze složky vyberte 2 různé otisky (nejlépe v rozdílných kvalitách).
- 2) Ponechejte zaškrtnutou možnost *Gábor. filtr* a proveďte zpracování a porovnání otisků. Výsledné obrazy otisků si uložte.
- 3) Pro stejné otisky nyní odškrtněte možnost *Gábor. filtr* a opět proveďte zpracování a porovnání otisků. Výsledné obrazy otisků si uložte.
- 4) Možnost *Gábor. filtr* znovu zaškrtněte a ve volbě parametrů změňte hodnotu *lambda* na hodnotu **12**. Výsledné obrazy otisků si uložte.
- 5) Zkoumejte a popište, jaký má filtr vliv na kvalitu výstupních obrazů. Veškeré uložené obrazy přiložte k protokolu.

1.6.3 Postup k bodu č. 3 zadání

- 1) Ze složky vyberte 2 různé otisky (nejlépe v rozdílných kvalitách).
- 2) Odškrtnutím políčka *Defaultní nastavení* umožníte manuální nastavení hodnoty *factor FFT*.
- 3) Pro zvolené otisky nejdříve nastavte hodnotu *factor FFT* **0,05** a proveďte zpracování a porovnání otisků. Výsledné obrazy otisků si uložte.
- 4) Pro stejné otisky nyní nastavte hodnotu *factor FFT* na hodnotu **2** a opět proveďte zpracování a porovnání otisků. Výsledné obrazy otisků si uložte.
- 5) Stejným postupem se pokuste nalézt optimální hodnotu *factor FFT*. Pro takto nalezenou hodnotu *factor FFT* si obrazy uložte.
- 6) Na výsledných obrazech popište změny.

1.7 Výsledky

1.7.1 Dílčí úloha 1

Do jednotlivých kolonek запиšte, zda byla dosažena shoda.

Práh citlivosti: 60%

Druh otisku:			
	1	2	3
1			
2			
3			

Druh otisku:			
	1	2	3
1			
2			
3			

Druh otisku:			
	1	2	3
1			
2			
3			

Práh citlivosti: 90%

Druh otisku:			
	1	2	3
1			
2			
3			

Druh otisku:			
	1	2	3
1			
2			
3			

Druh otisku:			
	1	2	3
1			
2			
3			

1.7.2 Dílčí úloha 2

Obrazy s přednastaveným Gáborovým filtrem:

Obrazy bez Gáborova filtru:

Obrazy s Gáborovým filtrem pro $\lambda = 12$:

1.7.3 Dílčí úloha 3

Obrazy pro $factor\ FFT = 0,05$:

Obrazy pro $factor\ FFT = 2$:

Obrazy pro optimálně nastavený $factor\ FFT$:

1.8 Kontrolní otázky

1. Jaké jsou tři základní typy uspořádání papilárních linií v otisku prstu?
2. Co je to Gáborův filtr?
3. Jaký má Gáborův filtr vliv na výsledný obraz?
4. Jaká je optimální hodnota $factor\ FFT$ pro zpracování otisků prstů?

Závěr

(Zhodnoťte dosažené výsledky)

D. Vzorový protokol: klíč

„Příloha na CD“