



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

## BIOMETRIE OTISKU PRSTU

FINGERPRINT BIOMETRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

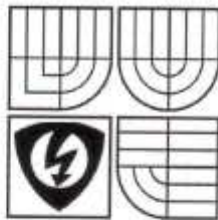
ONDŘEJ SMÉKAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR FEDRA

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Biomedicínská technika a bioinformatika

**Student:** Ondřej Smékal

**Ročník:** 3

**ID:** 106108

**Akademický rok:** 2009/10

**NÁZEV TÉMATU:**

## Biometrie otisku prstu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s matematickými modely popisu papilárních čar lidských otisků prstů z horních končetin pro následnou identifikaci osoby. Prostudujte a porovnejte současné aplikované algoritmy na rozpoznání osoby podle otisku prstu z hlediska úspěšnosti s ohledem na rozlišení obrazu (dpi). Seznamte se s experimentální databází sejmutých obrazů prstů.

Navrhněte a v MATLABu realizujte vhodný algoritmus na identifikaci osoby podle otisku prstu. Ověřte úspěšnost algoritmu při identifikaci náhodně vybraného obrazu s otiskem prstu známé/neznámé osoby. Zhodnoťte výsledky dle parametrů falešného odmítnutí oprávněné osoby a falešného přijetí neoprávněné osoby.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] RAK, Roman, MATYÁŠ, Václav, ŘÍHA, Zdeněk a kol. Biometrie a identita člověka ve forezních a komerčních aplikacích. Praha: Grada Publishing, 2008. ISBN 978-80-247-2365-5.

[2] MALTONI, Davide, et al. Handbook of Fingerprint Recognition. Second Edition. London: Springer 2009. ISBN 978-1-84882-253-5.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 31.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Fedra

**Konzultanti bakalářské práce:**

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

---

## Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Biometrie otisku prstu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 31. května 2010

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Ing. Petru Fedrovi** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 31. května 2010

.....  
podpis autora

---

## ABSTRAKT

Algoritmy sloužící pro identifikaci a verifikaci osob pomocí rozpoznávání otisků prstů jsou již dlouhodobě rozšířeny a využívány ve forenzních aplikacích i v soukromém sektoru. Cílem této práce je seznámení se s různými aplikovanými matematickými modely zpracování obrazů otisků v digitální podobě. Druhým úkolem je prezentace algoritmického řešení vybraného postupu identifikace osoby pomocí otisku prstu. Algoritmus je řešen ve vývojovém prostředí programu Matlab.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Otisk prstu, markant, papilární linie, závit, smyčka, delta, jádro, oblouk, klenutý oblouk, singularita, segmentace, binarizace, zakončení, vidlice, pole orientací, generování, Gaborův filtr, míra falešného přijetí/odmítnutí, senzitivita, specifická, práh citlivosti, porovnání.

## ABSTRACT

Algorithms designed for identification and verification persons by fingerprints recognition are spread and used as in forensics applications as in private sector for a long time. The aim of this thesis is to make us acquainted with various applied mathematic models of fingerprint processing in digital way. Second task is the presentation algorithmic solution of chosen subject identification procedure by force of Fingerprint matching. Algorithm is solid in the development environment platform Matlab.

## KEYWORDS

Fingerprint, minutiae, ridge pattern, whorl, loop, delta, core, arch, tented arch, singularity, segmentation, binarization, termination, bifurcation, directional map, generation, Gabor filter, false acceptance/rejection rate, sensitivity, specificity, threshold, comparison.

## CITACE

SMĚKAL, O. *Biometrie otisku prstu: Bakalářská práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010, 42s., 2 příl. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Fedra.

---

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 ÚVOD</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2 OTISK PRSTU</b>   | <b>8</b>  |
| 2.1 SNÍMÁNÍ OTISKU PRSTU   | 9         |
| CHYBY V PROCESU SNÍMÁNÍ  | 10        |
| 2.2 KOMPRIMAČNÍ METODY   | 11        |
| 2.3 PŘEDZPRACOVÁNÍ   | 12        |
| SEGMENTACE   | 12        |
| BINARIZACE   | 12        |
| MATEMATICKÁ MORFOLOGIE   | 13        |
| 2.4 DETEKCE BODŮ SINGULARITY   | 15        |
| POINCARÉ INDEX   | 16        |
| 2.5 MARKANTNÍ BODY, MARKANTY   | 17        |
| 2.6 VLIV ROZLIŠENÍ ZPRACOVÁVANÉHO OBRAZU   | 18        |
| <b>3 ROZPOZNÁVACÍ METODY</b>   | <b>20</b> |
| 3.1 ROZPOZNÁVÁNÍ OTISKŮ PRSTŮ POMOCÍ EXTRAKCE A VZÁJEMNÉ LOKALIZACE MARKANTŮ                   | 20        |
| 3.2 METODA KORELACE SEGMENTŮ   | 21        |
| 3.3 NEURONOVÁ SÍŤ  | 21        |
| 3.4 GABORŮV FILTR  | 22        |
| <b>4 VYHODNOCENÍ POROVNÁNÍ</b>   | <b>25</b> |
| 4.1 IDENTIFIKACE A VERIFIKACE  | 25        |
| IDENTIFIKACE   | 25        |
| VERIFIKACE   | 25        |
| 4.2 POROVNÁVACÍ SKÓRE  | 25        |
| 4.3 SENZITIVITA A SPECIFICITA  | 26        |
| 4.4 FRR A FAR  | 26        |
| PRAVDĚPODOBNOST CHYBNÉHO ODMÍTNUTÍ (FALSE REJECTION RATE – FRR)                                | 27        |
| PRAVDĚPODOBNOST CHYBNÉHO PŘIJETÍ (FALSE ACCEPTANCE RATE – FAR)                                 | 27        |
| 4.5 RECEIVER OPERATING CHARACTERISTICS (ROC KŘIVKA)  | 28        |
| <b>5 REALIZACE ALGORITMICKÉHO ŘEŠENÍ IDENTIFIKACE OSOBY<br/>V PROGRAMOVÉM PROSTŘEDÍ MATLAB</b> | <b>29</b> |
| 5.1 DEFINICE SOUSTAVY SOUŘADNIC OBRAZU   | 29        |
| 5.2 VYTVOŘENÍ VZTAŽNÉ SOUSTAVY   | 30        |
| VYUŽITÍ DVOU SINGULÁRNÍCH BODŮ   | 30        |
| VYUŽITÍ JEDINÉHO SINGULÁRNÍHO BODU   | 31        |
| ŽÁDNÝ SINGULÁRNÍ BOD   | 32        |
| 5.3 GRAFICKÉ UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ PROGRAMU   | 32        |
| 5.4 ZPRACOVÁVANÁ DATABÁZE OTISKŮ   | 33        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6 HODNOCENÍ VÝSLEDNÝCH PARAMETRŮ ŘEŠENÍ</b> | <b>34</b> |
| 6.1 MOŽNÉ PŘÍČINY CHYB VÝSLEDKŮ .....          | 37        |
| <b>7 ZÁVĚR</b>                                 | <b>38</b> |
| SEZNAM LITERATURY .....                        | 39        |
| SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....                 | 40        |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....                 | 42        |
| SEZNAM PŘÍLOH.....                             | 42        |

---

# 1 Úvod

S rostoucí hodnotou informací ve všech oblastech lidské společnosti se stále častěji hovoří o nezbytnosti zabezpečení všech zneužitelných dat. Může se jednat o průmyslová tajemství, platební styky, citlivé osobní údaje, atd. Množství informací k uchovávání však nekontrolovatelně vzrůstá a klasické databáze v papírové podobě začínají být nevyhovující. V dnešní době expanze výpočetních technologií se tedy i tato data začala zpracovávat, uchovávat a zabezpečovat právě prostřednictvím informačních systémů. Velké databázové servery se tímto způsobem staly naprosto běžnou součástí světového trhu. Ruku v ruce se vzrůstající hodnotou rostla i snaha o jejich získání neoprávněnými osobami. Proto je třeba neustále zvyšovat úroveň zabezpečení proti případnému neautorizovanému přístupu k těmto informacím a následnému zneužití. Žádné heslo není dostatečně zabezpečeno proti vyzrazení nebo ztracení a žádný klíč není neodcizitelný. Proto se hledal dostatečně unikátní prvek, složitý k odcizení nebo ztracení a jednoznačně charakteristický pro jakoukoliv osobu na světě. Na přelomu 19. a 20. století se díky progresi oboru kriminalistiky, daktyloskopii, prosadil jako nový možný způsob rozlišování jednotlivých osob otisk prstu. Tento útvar na povrchu lidských končetin vyhovuje všem požadavkům, které byly kladeny na univerzální identifikační prvek každé osoby.

Vlivem obrovského nárůstu množství dat uložených v rozsáhlých databázích otisků prstů, nashromážděných za desítky let využívání tohoto postupu, se ruční zpracování a vyhodnocení stalo nereálné vzhledem k efektivitě procesu. Jako osobní identifikační klíč mimo kriminalistickou praxi se tedy celosvětově uplatnil až v průběhu druhé poloviny 20. století právě díky prudkému rozvoji informačních technologií. Ty umožnili opět efektivně provádět celý proces rychlého vyhodnocení a vyhledávání v rozsáhlých databázích.

Cílem této práce je nastínit právě problematiku počítačového zpracování otisku prstu. S využitím různých identifikačních algoritmů je spojeno množství možných funkčních postupů. Vybrané metody jsou založeny na popisu otisku pomocí matematického aparátu a informačních technologií. Jedním z faktorů ovlivňujících úspěšnost identifikačního/verifikačního procesu je i rozlišení zpracovávaného obrazu (dpi).

V první části jsou rozebrány vlastnosti otisků prstů a využívané metody předzpracování získaného obrazu. Dále postupy detekce bodů zájmu sloužící jako zdrojová data v procesu identifikace a verifikace.

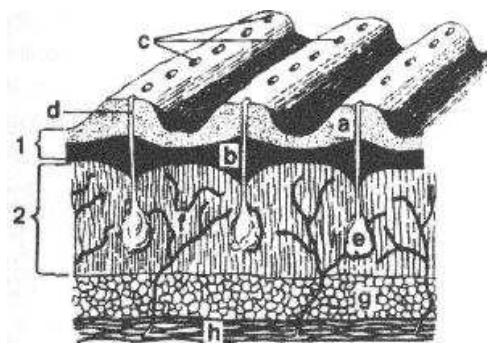
Ve druhé části je pojednáno o současných vybraných biometrických metodách využívajících obraz otisku prstu.

V části třetí figurují hodnotící postupy a kritéria vyjadřující míru spolehlivosti a úspěšnosti identifikačních a verifikačních technik.

Na zbývajících stranách je věnován prostor vlastnímu řešení algoritmu pro zpracování dat otisku prstu, jejichž formát musí umožnit podrobení se následnému procesu porovnání a zhodnocení úrovně shody.

## 2 Otisk prstu

Jedná se o unikátní prostorovou kresbu vyvýšenin povrchové struktury pokožky každého prstu, tzv. *papilární linie*. Tato kresba vznikla evolučními pochody pro zlepšení schopnosti úchopu a hmatového cití na všech končetinách. Kromě nejvyšších primátů ji můžeme nalézt právě jen u člověka. Informace o struktuře těchto útvarů je důmyslně zabudována až v nejhlubších úrovních pokožky, zárodečné vrstvě kůže. Z tohoto důvodu ji tedy nelze snadno odstranit bez použití velmi násilných postupů. Tato informace odolá povrchovému mechanickému poškození i poleptání. Po čase potřebném ke zhojení se tato kresba opět regeneruje, pokud nedojde k nevratnému poškození zárodečné vrstvy kůže.



**Obr. 2.1:** Schéma stavby kůže s papilárními liniemi

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

Neustálým obnovováním odumřelých buněk pokožky novými, diferencujícími se právě ze zárodečné vrstvy, nedochází s věkem ke změně distribuce charakteristických bodů otisku, tzv. *markantů (minutiae)*. Tyto body vznikají různými prostorovými vztahy mezi jednotlivými papilárními liniemi, jako jsou *křížení, zakončení, vidlice*, atd. (o jejich významu a využití je pojednáno v dalších kapitolách práce). Tato kresba je teoreticky jedinečná pro každý prst. Vzhledem k počtu různých typů markantů a jejich množství v řádech desítek na každém prstu je pravděpodobnost shody jediného otisku prstu u dvou lidí velmi nepravděpodobná. Pokud budeme uvažovat pouze 20 charakteristických znaků kresby na poslední článek prstu, pak teoreticky lze při možnosti různého natočení jednotlivých prvků takto dosáhnout počtu různých kombinací v řádech miliard. To by při současné velikosti lidské populace mohlo znamenat právě zmiňovanou možnost jedinečnosti u každé osoby.





**Obr. 2.2: Vybrané typy markantů v obraze otisku prstu**

Za těchto podmínek tedy můžeme konstatovat hledané unikátní vlastnosti otisku prstu, které jej do dnešní doby vynesly na první příčku v používaných biometrických identifikačních systémech.

- Relativně neodstranitelné
- Po celý život člověka neměnné
- Velmi malá pravděpodobnost shody otisku u dvou různých osob na světě

## 2.1 Snímání otisku prstu

Pro možnost zpracování otisku prstu metodami zahrnujícími výpočetní algoritmy je nezbytné převést otisk prstu do digitální podoby. Bylo nezbytné umožnit převod již získaných otisků bez nutnosti jejich opětovného získávání. Jednou z možností je tedy prosté načtení otisku pomocí obrazového scanneru z konvenčně získaného inkoustového obrazu. Tento postup se stále využívá v kriminalistické praxi při převádění klasických papírových daktyloskopických karet do počítačové databáze. Druhý možný postup je založen na elektronických snímačích, které otisk nasnímají přímo z prstu a uloží v digitální podobě. Tento postup ovšem vyžaduje vysokou míru spolupráce osoby, zejména její fyzickou přítomnost. To vylučuje použití kriminalisty při zajišťování stop na místě činu, ale pro identifikaci zadržené osoby je již volbou číslo jedna.

V praxi se využívají senzory rozdělené svým principem do dvou skupin:

- kontaktní
- bezkontaktní.

V případě kontaktních senzorů je technologie založena na různých fyzikálních metodách a poznacích v oblastech elektrických vlastností kůže. U bezkontaktních se jedná zejména o využití optiky nebo ultrazvuku. Podrobnější popis principů snímání obrazu těmito metodami není cílem ani v možnostech rozsahu této práce, zabývat se jimi tedy nebudeme. Je ovšem nezbytné zmínit, že výběr snímacího procesu má podstatný vliv na kvalitu získaného obrazového materiálu, se kterým musíme dále pracovat při následném zpracování. Pokud zvolíme nekvalitní systém, obraz může být prostorově zkreslen, často dochází k nezobrazení části otisku při umístění prstu mimo aktivní

---

plochu senzoru, případně k výraznému nárůstu šumu v celém obraze. Korektní snímání otisku závisí také na správném postupu a nezbytné míře spolupráce uživatele. Nejčastější komplikace, se kterými se můžeme setkat, jsou zmíněny v následující kapitole.

### **Chyby v procesu snímání**

Vznikají zejména při chybné interakci uživatele se snímacím systémem, někdy však i bez jeho přičinění vlivem samotné metody. Většinu těchto chyb dokážeme vhodnými algoritmy potlačit v průběhu procesu předzpracování. Některé modernější postupy porovnávání otisků dokonce dovedou pracovat i s takto poškozeným obrazem bez jakékoli úpravy, a to s uspokojivými výsledky. Každá taková chyba ale může způsobit chybnou identifikaci, nebo k rozpoznání otisku vůbec nedojde a proces snímání se musí opakovat [6].

### **Posunutí**

Přiložený střed bříška prstu pozičně nekoresponduje se středem snímacího senzoru. Muže tak dojít k posunutí znaků obrazu vůči vzoru o konstantní vzdálenost  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , nebo  $\Delta xy$ , v soustavě souřadnic  $Oxy$ .

### **Rotace**

V případě snímání otisku prstu přiloženého pod jiným úhlem než originální obraz by došlo při porovnávání k chybě z rotace. Všechny body obrazu jsou pootočeny o konstantní úhel vůči bodům v originále.

### **Částečné překrytí**

Prst byl přiložen částečně mimo aktivní zónu snímače. Přicházíme tak o část obrazu, která může nést důležité informace. Pokud je chybějící část obrazu velká, nemusí být použitý identifikační algoritmus ze zbytku obrazu schopen nalézt dostatek charakteristických dat pro porovnání se vzorem.

### **Nelineární distorze**

Při snímání obrazu došlo k deformaci povrchu prstu tahovými a tlakovými silami. Papilární linie by se z tohoto důvodu 100% neshodovaly ani v případě dvou obrazů sejmutých za naprosto totožných podmínek. Toto zkreslení je možné eliminovat použitím bezkontaktních snímacích technik.

### **Vliv tlaku a vlastností kůže**

Pokud je prst nedostatečně přiložen, nebo naopak přiložen příliš velkou silou. Takto vznikají místa, kde buď není část otisku zaznamenána, nebo poddajností papilárních linií dojde tlakem ke spojení více čar v jednu. Kůže také může svými okamžitými vlastnostmi být špatně čitelná pro některé typy snímačů (např. příliš suchá kůže bude problematicky snímána kapacitním snímačem).

### **Inkoustový snímek**

Pokud má být souhrn možných chyb celistvý, musíme zmínit i chyby analogového procesu snímání. Jeho kvalitu ovlivňují podobné vlivy jako u snímání digitálního (tlak, tah, rotace, atd.). Nejběžnější

---

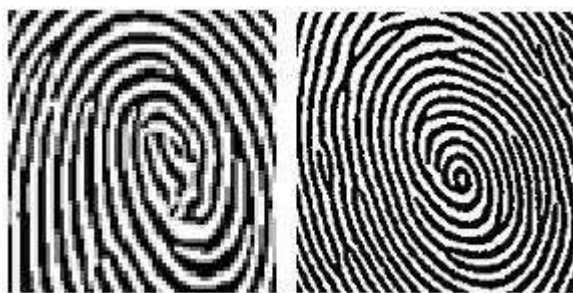
chybou je příliš „suchý“ nebo „mokrá“ snímek v důsledku množství použitého inkoustu. Dochází tak ke dvěma anomáliím:

- místní přerušování linií
- spojení dvou i více paralelně jdoucích linií můstky

Je na místě upozornit na možnost různých kombinací všech výše zmiňovaných chyb procesu snímání. Tím vzrůstá náročnost užitého algoritmu pro současné či postupné potlačení těchto anomálií. Může nastat situace, kdy se získaný obraz stává pro další zpracování nepoužitelným.

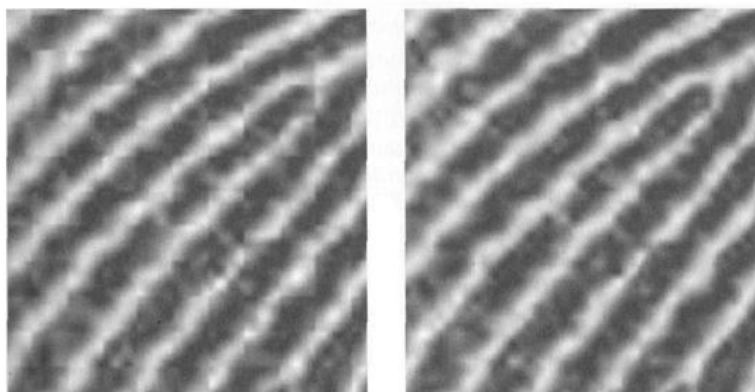
## 2.2 Komprimační metody

Po sejmutí otisku v digitální podobě je třeba takto získaný snímek uložit adekvátním postupem. Standardem se stalo rozlišení obrazu 500dpi (*bodů na palec; dots per inch*) používané v databázích amerického federálního úřadu pro vyšetřování, FBI. Převážně v komerčních aplikacích se však pracuje i s obrazy v nižším rozlišení. Vliv hodnoty rozlišení na proces identifikace bude rozebrán později.



**Obr. 2.3: Porovnání různých otisků sejmutých v nižším (vlevo) a vyšším rozlišení (vpravo)**

Uchování obrazu v tak vysokém rozlišení, by v originále stálo spoustu datového prostoru. Proto se obraz před samotným uložením do databáze zpracovává pomocí komprimačních metod. Tyto tzv. *bezeztrátové komprese* zajistí zmenšení požadovaného bitového prostoru za co nejnižší degradace kvality obrazu. Zvolen byl formát WSQ (*wavelet scalar quantization*), který na rozdíl od nejběžnějšího kompresního formátu JPEG využívaného pro práci s obrazovými daty netrpí na chybu šachovnicové textury, kdy je na obraze jasně patrná čtvercová síť hran, která se periodicky opakuje po celém obraze. Tento formát je založen, jak z názvu již vyplývá, na vlnkové transformaci. Výhodou je vysoký komprimační poměr (1:4 až 1:50) a vysoká rychlost komprimace s minimální ztrátou zpracovávané informace. Tento postup zpracování umožnil decentralizaci identifikačního pracoviště na jednotlivé stanice připojeny v intranetu systému AFIS využívaných bezpečnostními a kriminalistickými složkami mnoha států [2].



**Obr. 2.4:** Obrázek komprimovaný ve formátu JPEG se zřetelným šachovnicovým artefaktem (vlevo) a obrázek komprimovaný metodou WSQ (vpravo)

### 2.3 Předzpracování

Metody předzpracování byly vytvořeny v souvislosti s neuspokojivými výsledky klasifikačních algoritmů na originálním šedotónovém obraze. Nasnímaný obraz často obsahoval nežádoucí šum a docházelo tak ke vzniku falešných objektů. Jejich cílem je tyto rušivé elementy co nejvíce potlačit, usnadnit tak následné zpracování a zvýšit přesnost výstupu.

#### Segmentace

Pomocí segmentace získaného obrazu jsme schopni oddělit samotný obraz otisku od zarušeného pozadí snímku. Na pozadí se totiž mohou vyskytovat vady způsobené různými nečistotami na prstu, či snímači. Největší nepřesnosti tímto způsobem zanášejí do obrazu chaoticky orientované a náhodné nepřesnosti pod exaktně orientovanými papilárními liniemi. Tento poznatek nám umožňuje odfiltrout veškeré jinak orientované prvky než je hlavní směr orientace linií v nejbližším okolí. Pokud je ale pozadí obrázku vždy světlejší oproti oblasti představující otisk prstu, lze nežádoucí elementy na pozadí jednoduše odfiltrout od otisku použitím filtru na základě intenzity barvy [11].

#### Binarizace

Nebo také tzv. *Gray-scale konverze* je metoda transformující originální obraz ve stupních šedi do pouze binárního zobrazení. Černá barva pro vyvýšené papilární linie (*ridge pattern*), bílá pro mezery mezi nimi, tzv. údolí (*valleys*). Důvodem vzniku šedotónového obrazu bývají nepřesnosti snímacího zařízení nebo chyba postupu při snímání, jako je například nedokonalé přitisknutí prstu k senzoru, jeho znečištění, rotace v průběhu snímání, atd. Pomocí binarizace dojde ke zřetelnějšímu rozlišení jednotlivých struktur v obraze, zejména rozpoznání hran a následnou lepší detekci charakteristických bodů. Takto upravený obraz lze jednodušeji zpracovat pomocí dalších postupů. V praxi se osvědčila binarizační metoda založená na využití *Gaborova filtru*. Gaborovy filtry mají jak frekvenční (hustota rozložení) vlastnosti, tak i vlastnosti odpovídající orientaci. [11]. Funkce Gaborova filtru je podrobněji rozebrána v kapitole 3.3.



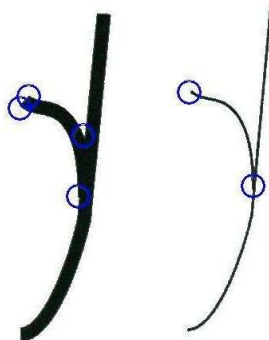
Obr. 2.5: Binarizace obrazu pomocí Gaborovy filtrace

## Matematická morfologie

Jedná se o samostatný směr analýzy obrazu. K vyhodnocení obrazu dochází pomocí procesu geometrizace. Hlavním oblastí zájmu v obraze je jeho tvar a transformace, které ho zachovávají. Tyto postupy vycházejí z vlastností bodových množin. Pro další aplikace nás bude z této oblasti zajímat proces eroze a skeletizace [3].

### Ztenčování linií

Originální obraz otisku prstu získaný libovolnou dostupnou snímací metodou je pro ideální nalezení markantů nevhodný. Šířka papilárních linií je větší než jeden obrazový bod (*pixel*). Každou papilární linii lze vlastně popsat jako dvě souběžné linie s výplní mezi nimi. Tím vznikají počítačovým zpracováním v obraze tzv. *falešné markanty*. Dochází k jejich zdvojení, nebo posunutí vzhledem ke skutečnosti. Proto byly vyvinuty postupy pro jejich ztenčení na šířku rovnu právě jednomu pixelu. Dojde tak k jednoznačné lokalizaci všech bodů použitých v dalším procesu.



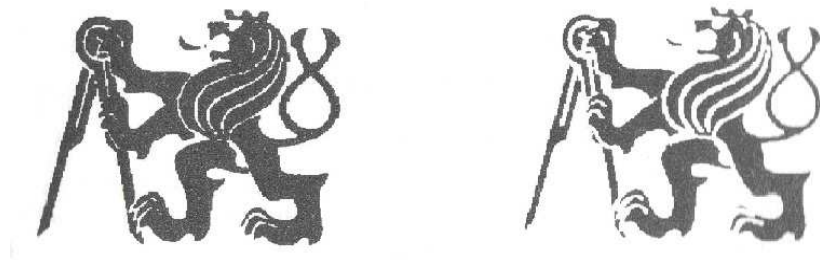
Obr. 2.6: Markant typu vidlice před a po provedení ztenčení linie

### Eroze obrazu

Skládá dvě bodové množiny s využitím rozdílu vektorů. Používá se pro zjednodušení struktury objektů. Složité objekty spojené čárami tloušťky 1 se rozloží na několik jednodušších objektů. Pomocí eroze jsme schopni snadno a rychle najít obrysy objektů v obraze. Výslednou síť linií o tloušťce jednoho pixelu získáme odečtením vytvořené eroze od původního obrazu [3].

Eroze je definována:

$$X \ominus B = \{d \in E^2 : d + b \in X \text{ pro } \forall b \in B\}. \quad (1)$$



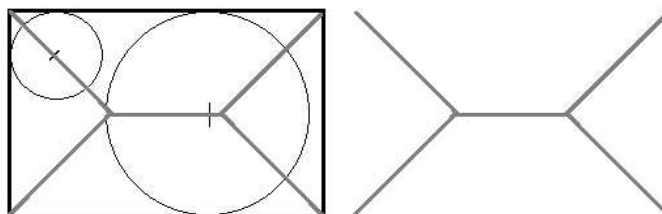
Obr. 2.7: Originální obraz (vlevo) a jeho eroze (vpravo)



Obr. 2.8: Obrysy obrazu

### ***Skeletizace***

Skelet obrazu je objektem složeným z tenkých čar nahrazující původní objekt se složitější strukturou. Skelet  $S(Y)$  množiny  $Y$  vzniká sjednocením středů  $x$  všech kružnic  $D(x)$ , které jsou obsaženy v  $Y$  a dotýkají se hranice množiny  $Y$  alespoň ve dvou bodech. Šířka čar skeletu ovšem nemusí být nezbytně právě jeden pixel [3].



Obr. 2.9: Tvorba skeletu (vlevo) a skelet obdélníku (vpravo)

### ***Rosenfeldova metoda***

Pracuje s maticí 3x3 obrazové body. Tato matice prochází sítí souřadnic definovaných obrazovými body a dochází k rozhodování, zda centrální pixel  $P_1$  bude bílý (pokud jde o bod mezi liniemi) nebo černý (jde o součást papilární linie). Tímto postupem lze lokalizovat i ukončení a rozdvojení papilární linie (další metody budou rozepsány níže). O ukončení se jedná v případě, že pouze jeden z bodů  $P_2$ - $P_9$  je černý. Jako rozdvojení je označena situace, kdy centrální pixel sousedí se třemi černými body.

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 |
| P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 |
| P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 |

**Obr. 2.10: Centrální pixel je na papilární linii**

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 |
| P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 |
| P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 |

**Obr. 2.11: Centrální pixel je ukončením papilární linie**

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 | P9 | P2 | P3 |
| P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 | P8 | P1 | P4 |
| P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 | P7 | P6 | P5 |

**Obr. 2.12: Centrální pixel je součástí rozdvojení papilární linie**

## 2.4 Detekce bodů singularity

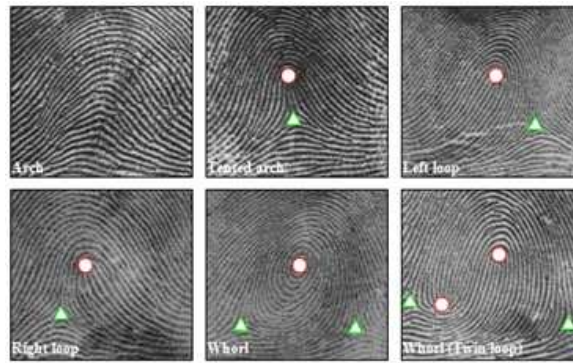
Každý otisk prstu je charakterizován hlavním obrazcem papilárních linií. Tyto obrazce jsou jasně rozlišitelné již při prvním zbežném pohledu na bříško posledního článku prstu, v jehož centru je lokalizován. Tento poznatek byl využit k jejich rozdělení do základních tříd:

- Oblouk (*arch*)
- Klenutý oblouk (*tented arch*)
- Závit (*whorl*)
- Levá smyčka (*left loop*)
- Pravá smyčka (*right loop*)
- Dvojitá smyčka (*Twin loop*)

Tyto obrazce jsou tvořeny *body singularity*. Jedná se o místa se zvýšeným výskytem výrazně zakřivených papilárních linií, větším počtem zakončení a často zde dochází ke zjevnému nahuštění papilárních linií na malém prostoru. Jejich vzájemné uspořádání tvoří dva charakteristické znaky: bod delta a jádro (*core*). V bodě delta dochází ke spojení papilárních linií ze tří různých směrů tvořících trojúhelník. Jádro je charakterizováno v bodě prudkého otočení směru papilární linie o 180° (smyčka) nebo ukončení v uzavřené spirálovité smyčce (závit).

Příslušnost do výše uvedených tříd se řídí právě různými kombinacemi a vzájemnou lokalizací těchto bodů na otiscích prstů. Oblouk nemá žádný singulární bod, klenutý oblouk je určen jedním bodem delta a jedním jádrem, stejně tak i pravá a levá smyčka, navzájem se však liší právě různým relativním umístěním. Závit je charakterizován dvěma body delta a jedním jádrem, kde delta body

bývají často umístěny souměrně vzhledem k jádru. Nejznámější metodou detekce bodů singularity je tzv. *Poincaré index*.



Obr. 2.13: Základní rozdělení typů otisků prstů podle bodů singularity

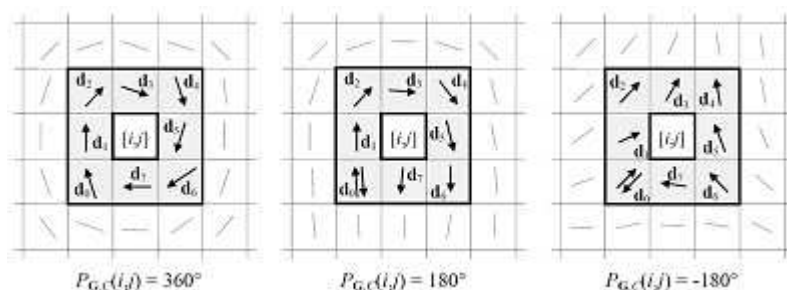
△ - bod delta, ○ - jádro

### Poincaré index

Jedná se o úhlovou sumarizaci linií, které přímo obklopují daný typ markantu. Pokud křivka  $C$  je uzavřená cesta definovaná jako postupná sekvence elementů z pole orientací na souřadnicích  $[i, j]$ , potom Poincaré index  $P_{G,C}(i, j)$  na  $[i, j]$  se vypočítá, jako algebraický součet rozdílů úhlů sousedních elementů z  $C$ . Ke sčítání rozdílů orientací potřebujeme přiřadit každé orientaci původní směr (máme dvě možnosti). Řešením tohoto problému je náhodný výběr směru prvního prvku a každému následujícímu prvku přiřazení směru, který je svému předchozímu prvku nejbližší [6].

Prakticky bylo dokázáno, že Poincaré index může nabývat pouze diskretních hodnot, a to v rozmezí:  $0^\circ, \pm 180^\circ$  a  $\pm 360^\circ$ . V případě singularity u otisků prstů může být  $P_{G,C}(i, j)$  rovno:

- $0^\circ$  pokud  $[i, j]$  neodpovídá žádnému singulárnímu bodu
- $360^\circ$  pokud  $[i, j]$  odpovídá singulárnímu bodu jádro u otisku typu závit (whorl)
- $180^\circ$  pokud  $[i, j]$  odpovídá singulárnímu bodu jádro u otisku typu smyčka (loop)
- $-180^\circ$  pokud  $[i, j]$  odpovídá singulárnímu bodu delta



Obr. 2.14: Detekce singularity pomocí Poincaré indexu

Výpočet Poincaré indexu probíhá dle rovnice:

$$P_{G,C}(i, j) = \sum_{k=0}^7 \text{úhel}(d_k, d_{(k+1) \bmod 8}). \quad (2)$$



## 2.5 Markantní body, markanty

Unikátnost každého otisku prstu je způsobena různým počtem, umístěním a vzájemnými kombinacemi individuálních znaků, *markantů*. Ve velkém statistickém souboru můžeme nalézt různé markanty, např. začátek a konec papilární linie, vidlice (*bifurcation*), očko, háček, můstek, zkřížení, krátká čárka, trojitá vidlice. Liší se nejen geometrickým tvarem, ale i četností výskytu v lidské populaci. Nejběžnějšími, a zároveň základními typy markantů jsou začátek/ukončení linie a jednoduchá vidlice, ze kterých se dají vytvořit všechny ostatní odvozené markantní body. Pro svou četnost však mají nejnižší identifikační hodnotu. Odvozené markanty se v procesu SW zpracování příliš nevyužívají



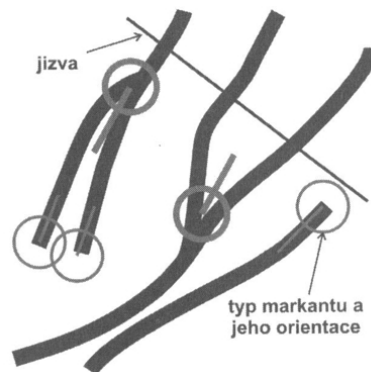
Obr. 2.15: vybrané typy markantních bodů

Tab. 1: Základní markantní body a jejich hodnota v procesu identifikace

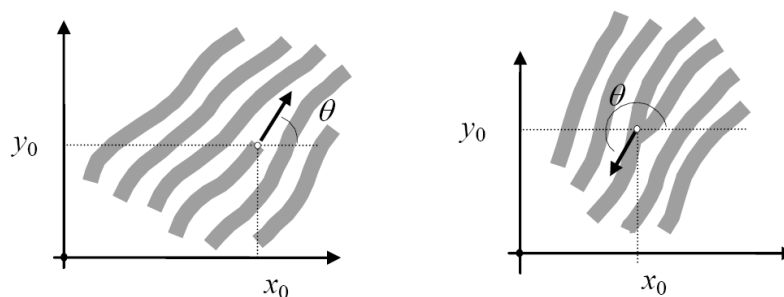
| markantní body    | identifikační hodnota |
|-------------------|-----------------------|
| Trojité vidlice   | 3,7                   |
| Křížení           | 3,1                   |
| Můstek            | 2,3                   |
| Zdvojení          | 2,6                   |
| Posunutí          | 2,4                   |
| Háček             | 2,1                   |
| Očko              | 2,4                   |
| Krátká linie      | 2,0                   |
| Tečka             | 1,7                   |
| Dvojitá vidlice   | 1,3                   |
| Začátek, ukončení | 1,0                   |

U nalezených markantních bodů je pozornost zaměřena na identifikaci typů markantů, jejich pozici v soustavě souřadnic a směrové orientaci v prostoru určené směrovým vektorem. Tento vektor vychází z vlastností tečny v bodě, kde je lokalizován zkoumaný markant.

Pro markant zakončení je pro tuto definici důležité, zda je markantní bod určen jako počátek linie, pak nabývá směrový vektor hodnoty do linie, pro markant zakončující linii je to naopak směr z linie. Obdobně závisí orientace směrového vektoru i u markantu vidlice.



Obr. 2.16: Označení jednotlivých typů markantů a jejich orientace



Obr. 2.17: Pozice v soustavě souřadnic a směrový vektor markantů typu zakončení (vlevo) a vidlice (vpravo)

## 2.6 Vliv rozlišení zpracovávaného obrazu

Využívané algoritmy pro zpracování otisků prstů jsou limitovány kvalitou sejmutého obrazu určeného ke zpracování. Kromě čistoty a ostroty snímku je na místě diskutovat i rozlišení získaného obrazu. To udává množství obrazové informace, které můžeme využít v procesu zpracování obrazu. Rozlišení obrazu můžeme vyjádřit dvěma způsoby:

- Buď rozlišení vyjádříme jako velikost obrazové matice pixelů,

*počet pix na šířku obrazu (horizontální rozlišení) X počet pix na výšku obrazu (vertikální rozlišení),*  
(např. standardní rozlišení pro počítačovou zobrazovací techniku ve VGA módu činí 640x480pix)

- nebo jako hodnotu v jednotce dpi, vyjádřena jako,

*počet obrazových bodů na jednotku délky jeden palec,*

(v diskutované problematice je toto vyjádření rozlišení upřednostňováno).

---

Jako standard v policejně-soudních aplikacích je stanoveno rozlišení zpracovávaného obrazu na hodnotu 500 dpi, avšak v běžné praxi jsou využívána zařízení pracující s rozlišením v intervalu <250 dpi; 625 dpi>. Hodnota rozlišení 500 dpi je využívána např. FBI. Obecně se dá říct, že čím vyšší je rozlišení zpracovávaného obrazu, tím přesnější je proces identifikace. Papírní linie jsou zobrazeny detailněji, markantní body jsou přesněji lokalizovány vzhledem ke skutečnosti (viz. Obr. 2.3). Nevýhodou tohoto postupu ovšem je vzrůst časové náročnosti používaných matematických operací vzhledem k adekvátnímu zvětšení obrazové matice. Například metoda korelace dvou obrazů o rozměrech 500x500 bodů je z časového hlediska nereálná. Některé algoritmy si v těchto situacích vypomáhají s určením prvotní orientace otisku vzájemnou polohou nalezených singulárních bodů. Tím se doba trvání diskutované matematické operace zkracuje [2].

### 3 Rozpoznávací metody

Pro porovnávání otisků prstů existuje mnoho algoritmů. Tyto algoritmy mohou být shrnuty do tří hlavních tříd:

- porovnávání založené na markantech.

Tato metoda bývá označována též jako technika založená na charakteristických rysech, oblastech zájmu. Dochází ke zjištění a následné extrakci množin markantů z obou porovnávaných otisků. Tyto množiny se porovnávají a hledá se většinou určitý počet markantů nalézajících se na stejné pozici. Dále také typy a umístění bodů jádro+delta a tvarování papilárních linií mezi spárovanými body singularity, to vše je využito pro klasifikaci do náležitých tříd.

- porovnávání založené na korelaci

Označována jako obrazová technika. Obrázky dvou otisků prstů jsou položeny přes sebe a je spočítána korelace mezi odpovídajícími pixely pro různé pozice (různé posunutí a natočení).

- porovnávání založené na tvarech papilárních linií

Porovnávají se tvary papilárních linií zahrnující jejich hustotu rozložení. Tato technika bývá také označována jako hybridní. Dochází ke kombinaci vybraných prvků obou předchozích postupů. Neuronové sítě, Gaborova filtrace

#### 3.1 Rozpoznávání otisků prstů pomocí extrakce a vzájemné lokalizace markantů

Většina dnešních softwarových řešení automatizace porovnávání podobnosti otisků prstů využívá metodu detekce markantů na skeletizovaném obraze papilárních linií. Na základě nalezených identifikačních prvků probíhá další zpracování na tzv. *biometrickou šablonu*. Jedná se o síť úseček navzájem propojujících lokalizace jednotlivých markantů. (Místo úseček některá řešení využívají síť polygonů). Samotný proces porovnávání probíhá právě mezi takto získanými šablonami. Ty už nenesou informaci o původním obraze. Nelze z nich tedy zpětně originální obraz rekonstruovat, což značně omezuje zneužitelnost těchto dat.



Obr. 3.1: Vytvoření šablony z lokalizovaných markantních bodů

---

### 3.2 Metoda korelace segmentů

Je nepraktické pracovat s celými obrazy. V problematice zpracování digitálního obrazu se tedy pochopitelně uplatňují techniky zpracovávající obraz po částech, které lze vizuálně izolovat od zbytku obrazu. Z možných přístupů segmentace je třeba zmínit zejména:

- přístup vycházející z detekce hran (*edge-based*),
- Přístup orientovaný na regiony v obraze (*region-based*).

Oba přístupy fungují principiálně podobně. Hranový detektor je orientován na vyhledávání výrazných hran v obraze, jako jsou linie a přechody gradientního charakteru mezi dvěma sousedními oblastmi. Naopak regiony jsou oblasti těmito liniemi uzavřeny, či obklopeny. Nelze však tyto dva přístupy uvažovat, že sloučením jejich výsledků bychom popsali celý obraz bez zbytku [12].

Pokud tyto postupy aplikujeme na dva různé otisky, můžeme výstupy jednotlivých segmentačních technik podrobit matematické operaci - *korelaci*.

Výhodnější pro tuto metodu je práce s malými segmenty a jejich uložení včetně informace o jejich vzájemné relativní pozici. Během korelace je každý segment porovnáván s otiskem s různou rotací a posunutím. Hledá se jeho pozice s nejvyšší hodnotou korelace vůči celému obrazu otisku. Segment musí být dostatečně velký, aby obsahoval několik identifikovatelných objektů, ale zase ne tolik, aby se projevila chyba v důsledku plasticity otisku způsobující distorzi. V našem případě se jedná buď o papírní linii, nebo plochu mezi nimi uzavřenou.

Skóre shody segmentů  $S_{S,i}$  udává hodnotu korelace pro každý segment  $i$  použitý v templátovém obraze. Tato metoda je schopná pracovat s binárními obrazy i s obrazy v původní šedotónové stupnici. Výsledné skóre shody kombinující všechny individuální skóre shody segmentů se vypočítá dle vztahu:

$$S_S = \left( \sum_{i=0}^{N_S-1} S_{S,i} \right) / N_S, \quad (3)$$

kde  $N_S$  je počet segmentů obrazu.

Výsledná hodnota  $S_S$  může nabývat hodnot  $\langle 0;1 \rangle$ , kde  $S_S = 1.0$  náleží maximální shodě porovnávaných obrazů [5].

### 3.3 Neuronová síť

V případě segmentačních technik je zpracování informace založeno na znalostech a zkušenosti o jejich průběhu. Zpracování pomocí Neuronových sítí (*Neural network*) tyto předpoklady nevyžaduje. Její učení probíhá předkládáním učebních dat (příkladů) [12].

Hlubší rozebrání problematiky Neuronových funkcí je mimo možnosti tohoto textu. Pro naši potřebu je postačující zmínit se o tzv. *Perceptronové síti*.

Tato síť porovnává přímo dva otisky proti sobě. Většinou se jedná o vícevrstevnou perceptronovou síť. Vstup je filtrovaný (dolní propustí) a zprůměrovaný centrální region dvou spárovaných otisků. Je sestaven charakteristický vektor orientací prvků v otisku a zařazen pomocí klasifikátorů neuronové sítě. Každý perceptron vícevrstevné sítě je trénován pro rozpoznání otisku náležícího do jiné třídy.

K-L transformace směrově normalizovaných vektorů jsou používány jako funkce. Třídy jsou pak tvořeny nekontrolovaným způsobem pomocí hierarchické struktury neuronové sítě skládající se z modifikované verze samoorganizované funkce mapy. Výsledky K-L transformovaných směrových vektorů jsou používány jako vstup do perceptronových sítí, které zařadí vstupní model do jedné z tříd rozdělení otisků. Výstup je pravděpodobnost, že patří stejnému prstu [8].

### 3.4 Gaborův filtr

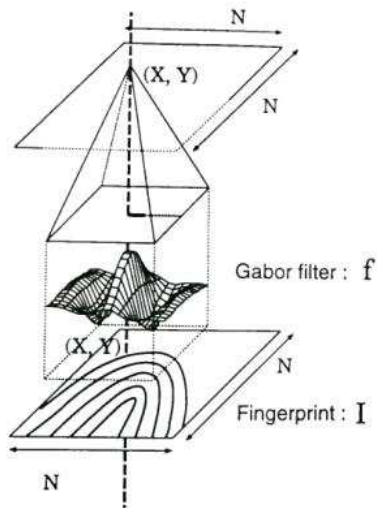
Využití Gaborovy filtrace je založeno na podobnosti zpracování informace v raných stádiích procesu lidského vnímání. Tento filtr byl sestaven tak, aby co nejpřesněji kopíroval funkci neuronů v centru zraku. Z těchto důvodů je využitelný v případech texturové analýzy, počítačového vidění a rozeznávání znaků. Tyto poznatky jej přinesly i na pole zpracování otisků prstů v procesech identifikace a verifikace osob. Nabízený přístup je unikátní v tom, že nepotřebuje pro svoji funkci pravé markanty nalezené v obraze otisku. Extrahuje prvky popsané hranami a liniemi v okolí jádra konkrétního zkoumaného otisku. Tento přístup tak lze aplikovat i na velmi nekvalitní obrazy, kde jiné metody selhávají.

2D Gaborův filtr je zobrazen jako sinusoidální plocha dílčích frekvencí a orientace, modulována Gaussiánskou obálkou. Je definován dle vztahu:

$$f(x, y, \theta_k, \lambda) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{(x \cos \theta_k + y \sin \theta_k)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(-x \sin \theta_k + y \cos \theta_k)^2}{\sigma_y^2} \right\} \right] \cdot \exp \left\{ \frac{2\pi(x \cos \theta_k + y \sin \theta_k)}{\lambda} \right\} \quad (4)$$

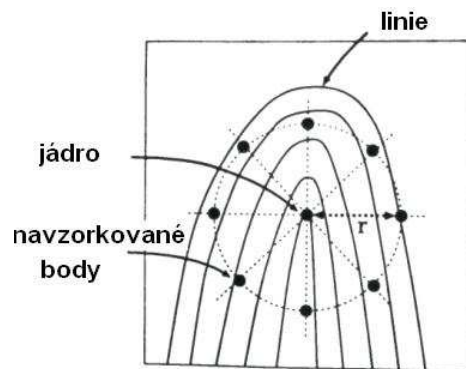
kde  $\sigma_x$  a  $\sigma_y$  jsou směrodatné odchylky Gaussiánské obálky vzhledem k ose x, respektive y,  $\lambda$  je vlnová délka a  $\theta_k$  je orientace filtru [11][5].

Charakteristické rysy Gaborovy filtrace jsou odpovědí Gaborova filtru lokalizovaného ve vzorkovacím bodě vztaheném k jádru otisku, které je rovněž využito jako vzorkovací bod. Samotnou odpověď získáme konvolucí filtru se zkoumaným obrazem



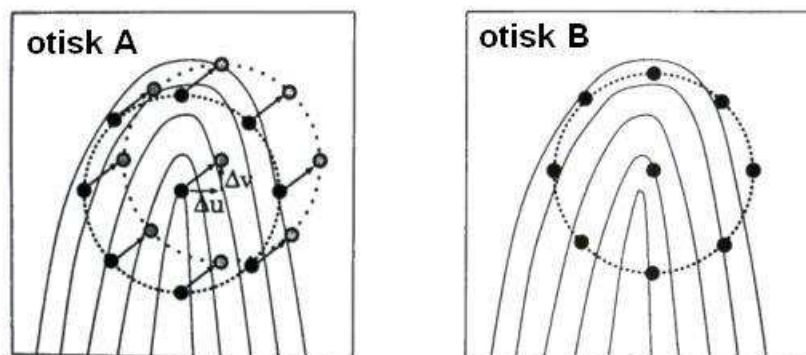
**Obr. 3.2: Filtrace ve vzorkovacím bodě X, Y**

V každém vzorkovacím bodě lze získat  $n$  výstupů Gaborovy filtrace vzhledem k různé orientaci filtru. Získáme tak vektor výstupů o  $n$  vzorcích pro každý vzorkovací bod zvlášť. v případě 9 vzorkovacích bodů tak získáme  $9n$  různých výstupů filtru.

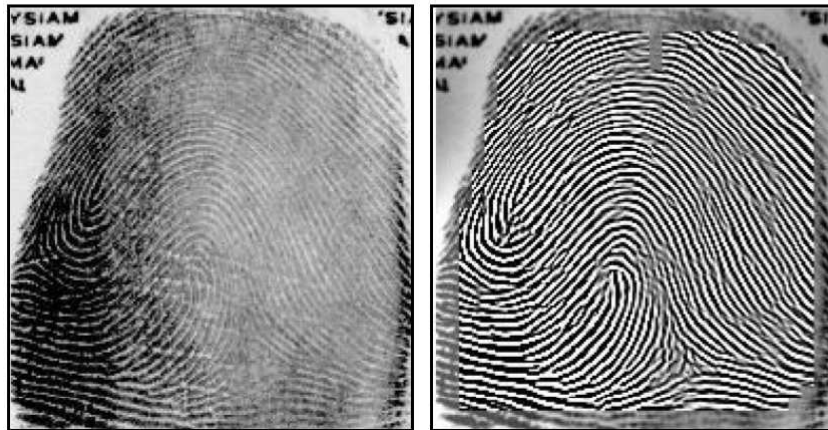
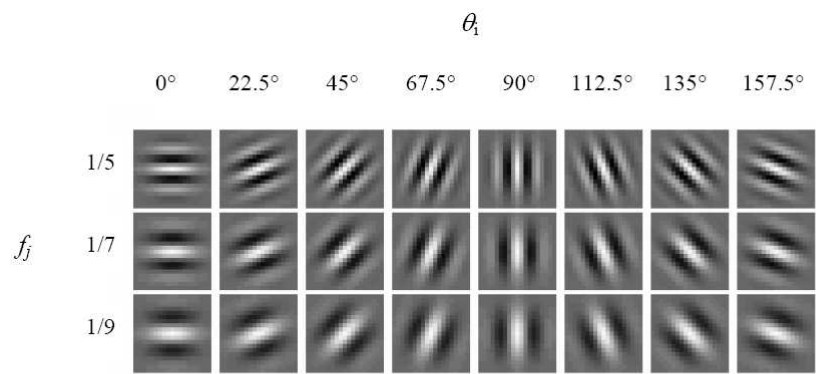


**Obr. 3.3: Vzorkovací body v okolí jádra otisku**

Pokud je jádro posunuto o  $\Delta u$  a  $\Delta v$  a současně i vzorkovací body v okolí, pak i výstup Gaborovy filtrace je posunut totožným způsobem.



**Obr. 3.4: Posunutí vzorkovacích bodů u dvou různých porovnávaných otisků**



**Obr. 3.5: Užití Gaborových filtrů pro binarizaci (24 různých filtrů)**



---

## 4 Vyhodnocení porovnání

Pro zhodnocení kvality a spolehlivosti vytvořeného systému a tudíž každého jeho výstupu je třeba se seznámit s několika kritériálními pojmy, které jsou pro systémy s rozhodovacím výstupem typu ANO/NE alfou a omegou. Chyby v procesu vyhodnocení totiž mohou, dle oblasti využití, způsobit nemalé potíže. V kriminalistice tímto způsobem může být poškozena nevinná osoba, nebo naopak pravý viník spravedlnosti vyklouzne. U přístupu k informacím strategického charakteru lze takto vyvolat ohrožení bezpečnosti, či vyzrazení citlivých informací běžných občanů. Hodnoty diskutovaných parametrů každé používané aplikace mají tudíž kardinální vliv na celkovou spolehlivost systému.

### 4.1 Identifikace a verifikace

Tyto dva významově velmi podobné procesy je nutné v případě biometrických aplikací bezpodmínečně rozlišovat z pohledu jejich podstaty. Ta totiž vymezuje jejich možnost využití v předkládané problematice [2].

#### Identifikace

Jinak též porovnávání typu *one-to-many*. Existuje-li již vytvořená databáze zkoumaných dat a pokusíme-li se jakýmkoliv prvkem této databáze porovnat neznámý nový prvek, hledáme případnou shodu, ale ne nezbytně ji systém očekává, jedná se o proces identifikace. Slouží ke snaze pojmenovat a zařadit neznámý vzorek. Pokud ke shodě nedojde ani v jednom z případů porovnání, prvek je stále označen jako neznámý. Identifikace je typická využitím u policejně-soudních aplikací.

#### Verifikace

Porovnání typu *one-to-one*. Ke shodě může dojít pouze v případě, kdy je systému předložen jediný konkrétní vzorek, totožný s jedinou uloženou šablonou. Nový prvek se nesnažíme zařadit, ale ověřit, zda-li se skutečně jedná o vzorek s oprávněním k autentizaci. Verifikace je typická v bezpečnostně-komerční sféře.

### 4.2 Porovnávací skóre

K vyhodnocení možnosti shody dvou porovnávaných otisků prstů se používá tzv. *porovnávací skóre (match score)*. Udává se nejčastěji v intervalu, buď  $\langle 0;1 \rangle$ , nebo  $\langle 0;100 \rangle$ . Vyšší hodnota čísla v užitém intervalu znamená vyšší pravděpodobnost shody porovnávaných otisků. Za shodné jsou dva otisky označeny, když porovnávací skóre překročí předem definovanou *prahovou hodnotu, práh (threshold)*. Uživatel svým zásahem může ovlivnit pouze hodnotu prahu, zbytek porovnávacího procesu je plně automatizován. Tento uživatelský přístup nastavení je označován jako zpětné přizpůsobení (back-end adjustment). Práh se totiž nastavuje až po vypočtení samotného skóre [2].

---

### 4.3 Senzitivita a specificita

Termín *Senzitivita* vyjadřuje pravděpodobnost, že osoba s oprávněním k přístupu (je uložena v databázi), bude identifikačním algoritmem vyhodnocena jako pokus o identifikaci osobou s pozitivním povolením k přístupu. Vyhodnocuje se ze vztahu:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

TPR (True Positive Rate) – pravděpodobnost přijetí oprávněné osoby

TP (True Positive) – počet přístupů s povolením vyhodnocených jako oprávněné

FN (False Negative) – počet přístupů s povolením vyhodnocených jako neoprávněné

Termín *Specificita* vyjadřuje pravděpodobnost, že osoba bez oprávnění k přístupu (není uložena v databázi), bude identifikačním algoritmem vyhodnocena jako pokus o identifikaci osobou s negativním povolením k přístupu. Vyhodnocuje se ze vztahu:

$$TNR = \frac{TN}{TN + FP} \quad (6)$$

TNR (True Negative Rate) – pravděpodobnost odmítnutí neoprávněné osoby

TN (True Negative) – počet přístupů bez povolení vyhodnocených jako neoprávněné

FP (False Positive) – počet přístupů bez povolení vyhodnocených jako oprávněné

### 4.4 FRR a FAR

*False rejection rate (FRR)* a *false acceptance rate (FAR)*, jinak též pravděpodobnost falešného odmítnutí/přijmutí, jsou koeficienty definující míru spolehlivosti a přesnosti daného rozpoznávacího algoritmu [5].

Pravděpodobnost chybného vyhodnocení shody nebo neshody biometrického vzoru a šablony nelze teoreticky vypočítat. Veškeré biometrické metody jsou založeny na statistickém vyhodnocení míry shody porovnávaných obrazů, jinak tzv. *skóre*. Skóre dvou po sobě sejmutých šablon stejného otisku při porovnání vůči vzoru se vždy bude lišit. Biometrické systémy totiž nikdy nezaznamenají stejnou informaci při několikanásobném předložení snímaného objektu zájmu [2].

Bod protnutí křivek FRR a FAR se nazývá *Equal Error Rate (EER)*, slouží k orientačnímu porovnání dvou aplikací, kdy pro stejný práh citlivosti vykazují oba dva parametry stejnou hodnotu chyby. Jinak nemá bod ERR žádný fyzikální význam. Platí pro něj rovnost:

$$FRREER = FAREER \quad (7)$$

---

## Pravděpodobnost chybného odmítnutí (False Rejection Rate – FRR)

V případě oprávněných uživatelů, kteří jsou odmítnuti, nastává nutnost podstoupit další identifikační proces, což působí velmi nekomfortně a vzbuzuje nedůvěru k danému identifikačnímu zařízení. V praxi je tedy velmi nevhodné, aby systém vykazoval vysoký počet falešných odmítnutí, ale tento druh chyby nepředstavuje žádné bezpečnostní riziko. Neidentifikované osoby nejsou přijaty.

- FRR též bývá označováno jako *Chyba 1. Typu (Type I error rate)*,

$$FRR = \frac{N_{FR}}{N_{EIA}} = \frac{N_{FR}}{N_{FR} + N_{TA}} \quad (7)$$

## Pravděpodobnost chybného přijetí (False Acceptance Rate – FAR)

V případě, kdy jsou jako pozitivní ověřeny neoprávněné osoby, již vzniká vysoké bezpečnostní riziko. V praxi je tedy velmi nevhodné, aby systém vykazoval vysoký počet falešných přijetí, zejména v situacích vyžadující vysoký stupeň identifikační bezpečnosti pro přijetí.

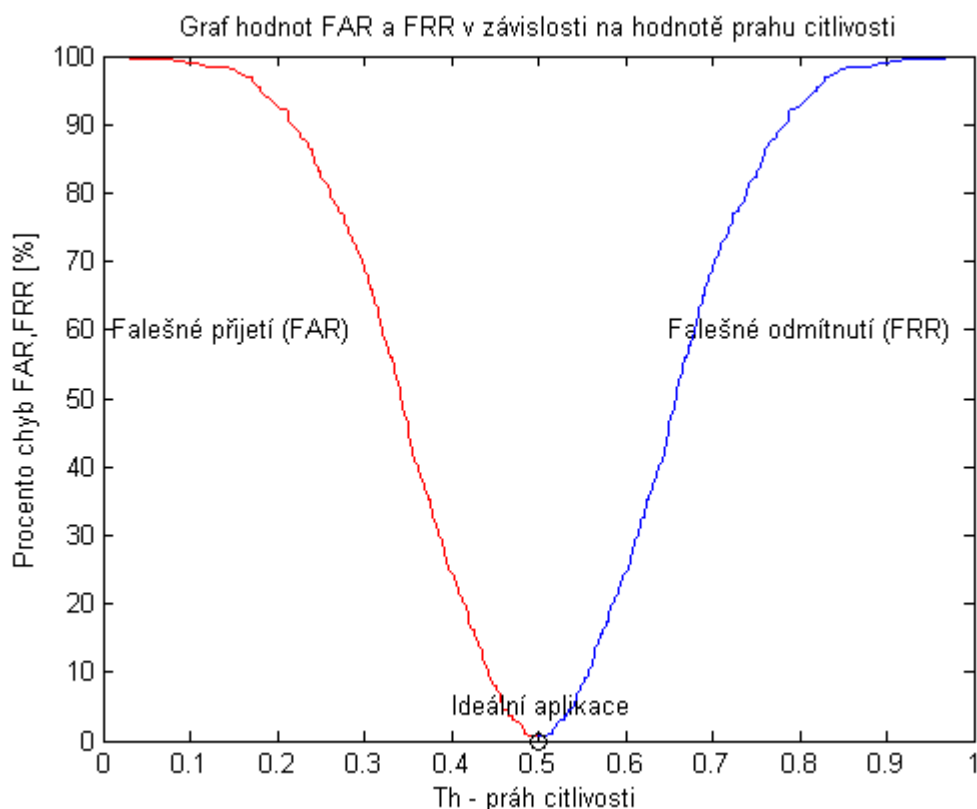
- FAR též bývá označováno jako *Chyba 2. Typu (Type II error rate)*.

$$FAR = \frac{N_{FA}}{N_{IIA}} = \frac{N_{FA}}{N_{FA} + N_{TR}} \quad (8)$$

Rozhodovací práh algoritmu se nastavuje dle požadavků uživatele, jak velká chyba je pro aplikaci ještě přijatelná. Posouváním prahové hodnoty se pravděpodobnost obou chyb závisle na sobě mění. Pokud jedna z nich klesá, druhá vzrůstá a naopak.

Pro ideální aplikaci platí, že křivky FAR a FRR se navzájem neprotínají a vhodným zvolením *prahu citlivosti (Th)* je lze bezchybně oddělit a současně dosáhnout nulové chybovosti jak 1., tak 2. druhu. Všechny osoby podstupující identifikační proces jsou tak 100% rozpoznány [2].

$$FRR = FAR = 0 \quad (9)$$



**Obr. 4.1: Ideální biometrická aplikace**

#### 4.5 Receiver Operating Characteristics (ROC křivka)

Výše uvedené pravděpodobnostní charakteristiky zvyšují svůj statut hodnotících kritérií spolehlivosti při vzájemném porovnání vynesemím do tzv. ROC křivky (aplikováno v kapitole 6). Věrněji vyjadřuje neoklamatelnou závislost těchto jednotlivých kriteriálních parametrů na svém významovém protějšku (FRR na FAR a opačně, Senzitivity na Specificitě a opačně.) Pokud se budeme změnou hodnoty prahu citlivosti  $T_h$  - nefiguruje v grafu přímo, ale je zohledněn v zobrazovaných funkčních hodnotách tvořících křivku grafu, neboť na něm závisí chyba každého uvažovaného parametru zvlášť, snažit minimalizovat chybu jednoho z těchto parametrů, chyba druhého se bude naopak adekvátně zvyšovat. Míra růstu chyby druhého parametru je odvislá od robustnosti diskutovaného biometrického systému a u každého takového produktu se liší.

---

## 5 Realizace algoritmického řešení identifikace osoby v programovém prostředí MATLAB

Prezentovaný identifikační postup je založen na metodě rozpoznávání otisků prstů pomocí extrakce a lokalizace markantů v obraze (kapitola 3.1). Posléze dochází k porovnávání masky originálního obrazu, který chceme podrobit procesu identifikace, s maskami uloženými v databázi zpracovaných otisků. Tyto masky jsou sestaveny právě ze vzájemné unikátní lokalizace a orientace markantních bodů každého otisku. V případě, že se snažíme najít shodu s jediným konkrétním vzorem, jedná se o proces verifikace. Cílem představovaného algoritmu byl ale realizace a aplikace identifikačního procesu. Dochází tedy k porovnávání nového neznámého vstupního vzoru se všemi maskami vzorů uložených v procesní databázi. Hledáme takto možnou totožnost obou vzorů, a tak se snažíme určit majitele předkládaného otisku za předpokladu, že se již nalézá v databázi. V opačném případě by, s mírnou idealizací problému, ke ztotožnění neznámého vzoru s jakýmkoliv vzorem z databáze nemělo v žádném případě dojít.

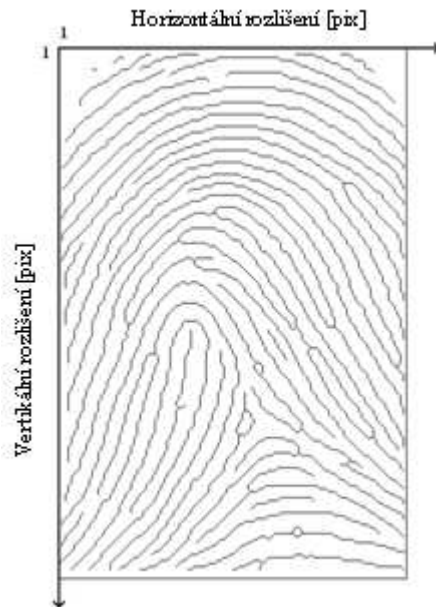
Algoritmus byl kompletně vytvořen a testován v prostředí Matlab, verze 7.5.0 (R2007b).

### 5.1 Definice soustavy souřadnic obrazu

Pro maticové operace, které jsou hlavními operátory zvoleného řešení problematiky, je nezbytné definovat soustavu souřadnic, ve které se, vzhledem ke zpracovávanému obrazu, pohybujeme.

Jelikož MATLAB indexuje importovaná obrazová data do matice od levého horního rohu (hodnota indexu  $i=1$ ,  $j=1$ ), kde každá buňka matice reprezentuje jeden pixel, jevílo se mi pro potřeby algoritmu jako ne nezbytně nutné transformovat data do klasické souřadné soustavy  $Oxy$ . Veškeré souřadnice jsou tak udávány právě v souřadnicích obrazové matice. Je tak definována pozice každého markantního a singulárního bodu v prostoru.

Výsledná matice dat určená k porovnávání, je již na typu použité soustavy nezávislá. Údaje o vzdálenostech jsou totiž převedeny z počtu obrazových bodů na jednotky vzdálenosti – palce (*inches*). Jako základní rozměr o délce jeden palec jsem definoval výšku zobrazované oblasti v programu, ať má jakékoliv použité rozlišení.



Obr. 5.1: Definovaná soustava souřadnic v obraze

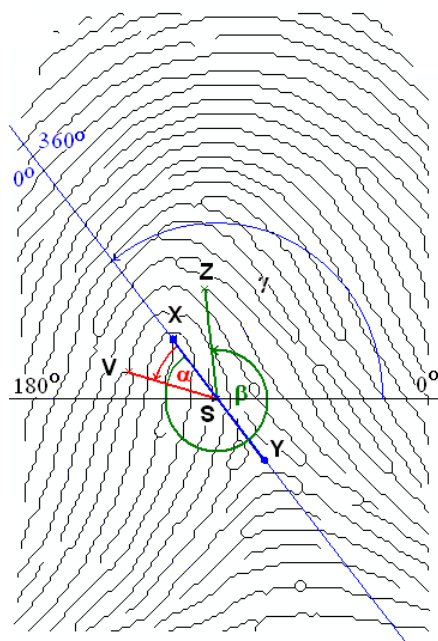
## 5.2 Vytvoření vztažné soustavy

Klasická metoda identifikace založená na lokalizaci markantů pracuje s maskou tvořenou vzájemnou lokalizací jednotlivých markantů, kde dochází k jejich pospojování buďto sítí úseček, nebo polygonů (viz. kap. 3.1).

Zvolená a v prezentovaném algoritmu aplikovaná metoda však využívá vytvoření masky dle lokalizace jednotlivých nalezených markantních bodů zakončení [Z] a vidlic [V] vzhledem k nalezeným singulárním bodům [X, Y] otisku. Tyto body volí v obraze operátor manuálně. Třídou otisku již rozpozná algoritmus automaticky s možností manuální korekce operátorem v případě sporného vyhodnocení. Takto je možné vytvořit až 6 různých souřadných systémů - v případě maximálního množství singulárních bodů v otisku:  $2 \cdot \text{jádro} + 2 \cdot \text{delta}$ . Každá soustava je pak tvořena spojnici dvou různých singulárních bodů

### Využití dvou singulárních bodů

Pomyslná spojnice každých dvou singulárních bodů (se středem úsečky [XY] v bodě [S]) v otisku tvoří novou osu, od které se odečítá úhel úsečky [VS] svíraný s osou [XY] v intervalu  $\langle 0^\circ; 360^\circ \rangle$ . Natočení této vztažné osy v rovině je definováno vůči horizontální rovině obrazu a je vyjádřeno úhlem  $\gamma$ , který může nabývat hodnot  $\langle 0^\circ; 180^\circ \rangle$ . Tento úhel je definován pro tu část vztažné osy, která se nachází nad horizontální přímkou procházející bodem [S]. Kromě úhlu dále dochází k výpočtu délky úseček [VS] a [ZS]. Veškeré úhly odpovídají rotaci ve směru proti chodu hodinových ručiček.



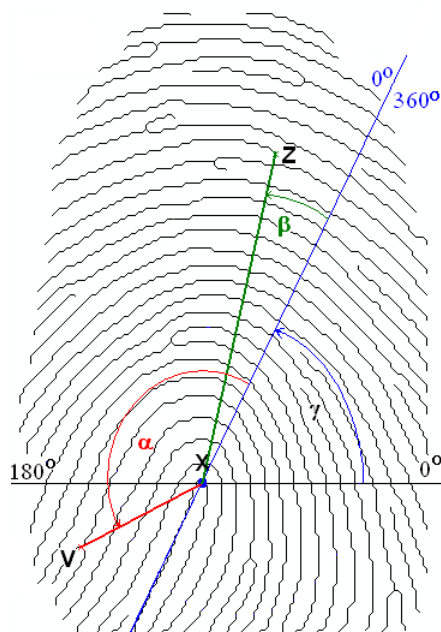
**Obr. 5.2: Formátování vztažné soustavy použité pro stanovení geometrických údajů o tisku**

Pokud dojde k porovnání dvou takto zpracovaných souhlasných otisků, měla by tak být velmi omezena chyba z posunutí, a také chyba z rotace, při snímání, protože vztažná soustava, od které se počítají úhly a vzdálenosti se posouvá (rotuje) spolu s obrazem. Pokud dojde k výpadku obrazové informace v určité oblasti, dojde tak ke korespondující ztrátě některých markantů. Výpadek tohoto rozsahu však nezpůsobí nijak závažné zkreslení matice dat, protože informace jednotlivých markantů je v tomto uspořádání na sobě prakticky nezávislá. Výpadek jednoho, či skupiny markantů neovlivní geometrická data ostatních. Závažnější chyba nastane v případě, kdy v obraze otisku lze bezpečně identifikovat pouze jeden singulární bod.

### **Využití jediného singulárního bodu**

V tomto případě nelze definovat vztažnou osu jako přímku protínající dva singulární body obrazu současně. Dochází k tomu zejména u vícedeltových vzorů. (Třídy otisku Závít a Dvojitá smyčka.) Singulární body delta se u těchto vzorů často nacházejí mimo detekční oblast snímacího prvku. Pokud neproběhne proces snímání korektně, může vzniknout výpadek části obrazu i ve větším rozsahu, a znemožnit tak lokalizaci singulárních bodů i u jednodušších vzorů.

Jako řešení této situace se nabízí postup založený na nezbytné přítomnosti jednoho singulárního bodu typu jádro. Osa vztažné soustavy pak odpovídá ose průběhu papilárních linií v oblasti přítomného jádra. Středový bod [S] předchozího případu je nahrazen samotným nalezeným jádrem, bodem [X]. Postup odečítání vzdáleností a svíraných úhlů úsečkami s osami se již poté neliší od postupu za přítomnosti dvou singulárních bodů.



**Obr. 5.3: Formátování vztahné soustavy v případě jediného singulárního bodu**

Z výše uvedeného je zřejmé, že otisky zpracované těmito odlišnými způsoby budou v procesu porovnávání navzájem zcela nekompatibilní. Řešením by se mohlo jevit využití osy procházející jediným jádrem i v případě přítomnosti více jak jednoho singulárního bodu v obraze.

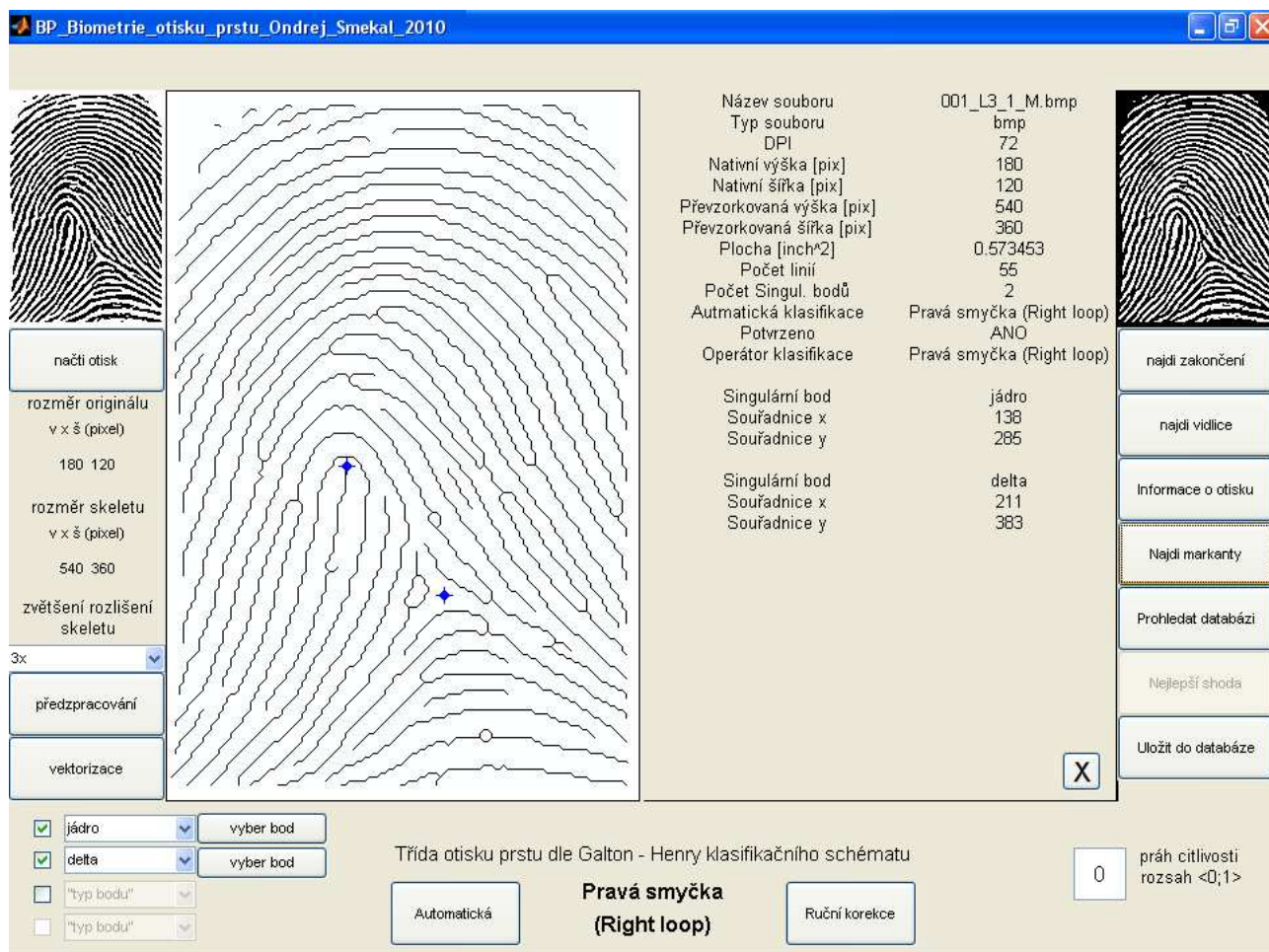
### **Žádný singulární bod**

Tato situace se týká otisků typu oblouk s nevýrazným vzorem, nebo otisků sejmutých ve velmi nízké kvalitě. Důvodem nemožnosti bezpečného identifikování singulárního bodu může být nízký kontrast otisku, nebo výpadky zobrazovaného pole vlivem nesprávného postupu při procesu snímání obrazu. V obou případech si vytvořený algoritmus nedokáže poradit. A otisk není připuštěn k porovnání se vzory uloženými v databázi, ani jej nelze do databáze uložit. Proces zpracování otisku totiž nelze dokončit a získaná data jsou tak jednak neúplná, a hlavně, nedostatečná.

## **5.3 Grafické uživatelské rozhraní programu**

K vytvoření grafického prostředí uživatele jsem využil rozhraní GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) vývojového prostředí MATLAB. Uživatel je veden vzhledem prostředí a ovládacích prvků ke správně volené posloupnosti po sobě následujících příkazů. Funkce programu, které nemohou být v aktuální fázi zpracování obrazu použity, mají neaktivní procesní tlačítka. Ty se uvedou do stavu aktivace až po splnění všech nezbytných kritérií, definovaných v předcházejících krocích. (Nejdříve je nutné vstupní data pro zvolenou funkci získat, až poté je můžete dále zpracovávat.)





Obr. 5.4: Uživatelské prostředí programu

## 5.4 Zpracovávaná databáze otisků

Pro účely ověření funkčnosti a výkonnosti prezentovaného řešení byla vytvořena databáze o počtu přes 130 unikátních otisků jednotlivých prstů 16 dobrovolníků. Každý z otisků se navíc v databázi vyskytuje ve 3 různých exemplářích (každý prst prošel procesem snímání třikrát). Dohromady to tak činí přes 400 vizuálně odlišných vzorů. V takto sestavené databázi je nízká pravděpodobnost, že nastane shoda mezi jinými otisky, než právě zmiňovanými 3 exempláři totožného vzoru. Některé obrazy však byly pro další zpracování vyřazeny vzhledem ke své nevyhovující kvalitě sejmutých dat. Jednalo se převážně o nepřijatelně rozsáhlé výpadky zobrazované oblasti.

Obrazy otisků byly získány na standardním snímacím zařízení, běžně instalovaným jako integrovaný prvek notebooků, které je založeno na kapacitní metodě. Konkrétně se jednalo o zařízení *TouchChip Fingerprint Coprocessor* implementované v notebooku *IBM ThinkPad R60*. Obrazová data měla rozlišení 120x180pixelů, 71dpi a disponovala 256 odstíny šedi.

## 6 Hodnocení výsledných parametrů řešení

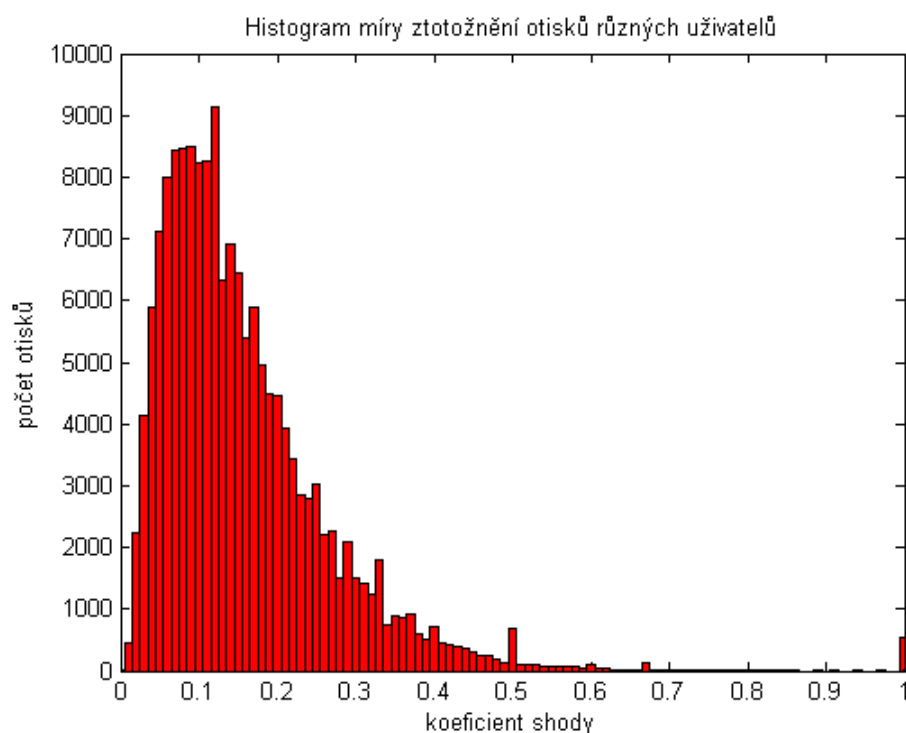
Pro hodnocení výsledných parametrů řešení je nezbytné nejprve zmínit kritéria ztotožnění nejen celých otisků (viz. kapitola 4), ale také míru ztotožnění na úrovni jednotlivých porovnávaných markantů. Pro potřeby programu byly dva markanty různých otisků označeny za shodné v případě, že došlo ke splnění těchto podmínek současně:

- Stejný typ markantu (hodnotily se pouze typy *zakončení* a *vidlice*).
- Koeficient shody ve vzdálenosti od vztažné soustavy větší než 0,9 (90% shoda).
- Koeficient shody v úhlu, svíraném spojnicí markantu se středem vztažné soustavy vůči ose soustavy větší než 0,9 (90% shoda).

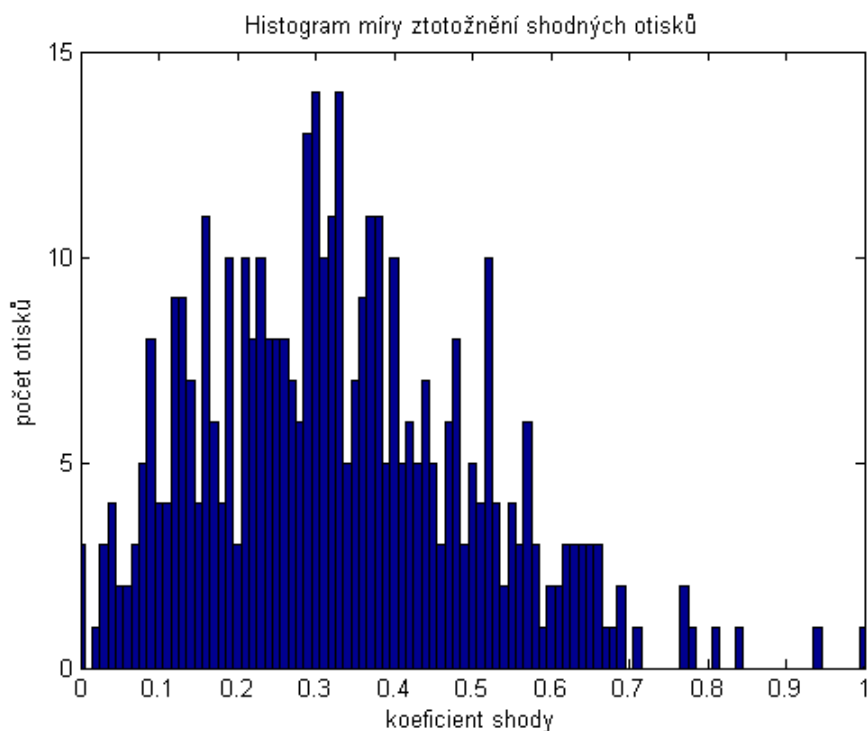
Koeficient shody celého otisku se pak vyjádřil výsledným poměrem počtu ztotožněných markantů a počtem celkovým.

$$\text{koeficient shody} = \frac{N_{shoda}}{N_{celkem}} \quad (10)$$

Tato hodnota byla vypočítána pro všechny možné kombinace matic dat zpracovaných otisků uložených v databázi. Hodnoty byly vyneseny do následujících grafů vzhledem k počtu porovnávaných dvojic otisků.

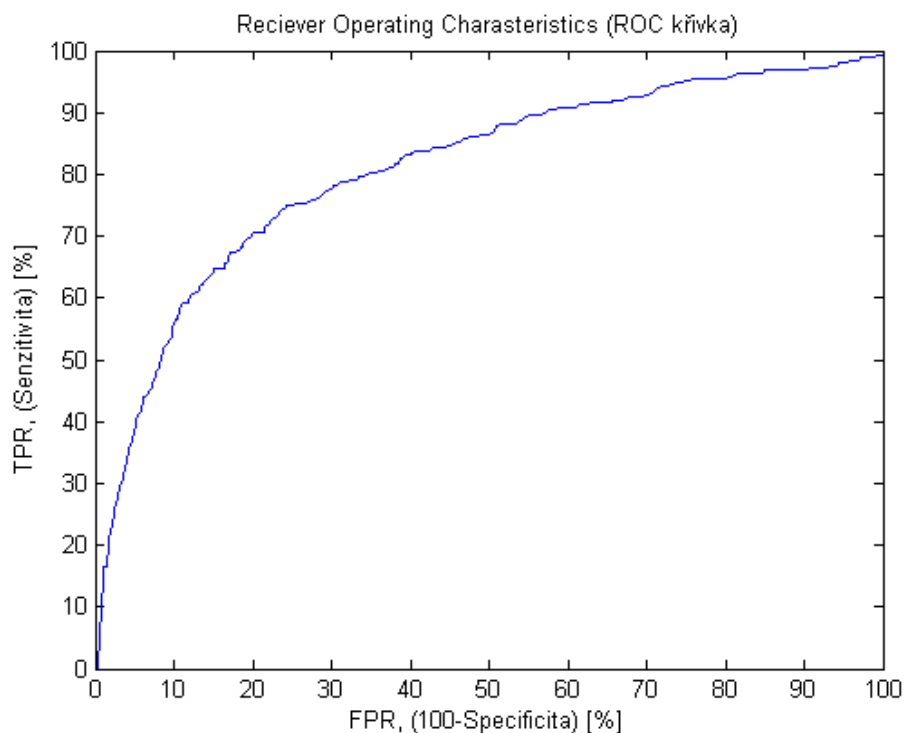


**Obr. 6.1:** Graf koeficientů shody a odpovídajícího počtu neoprávněných pokusů o identifikaci



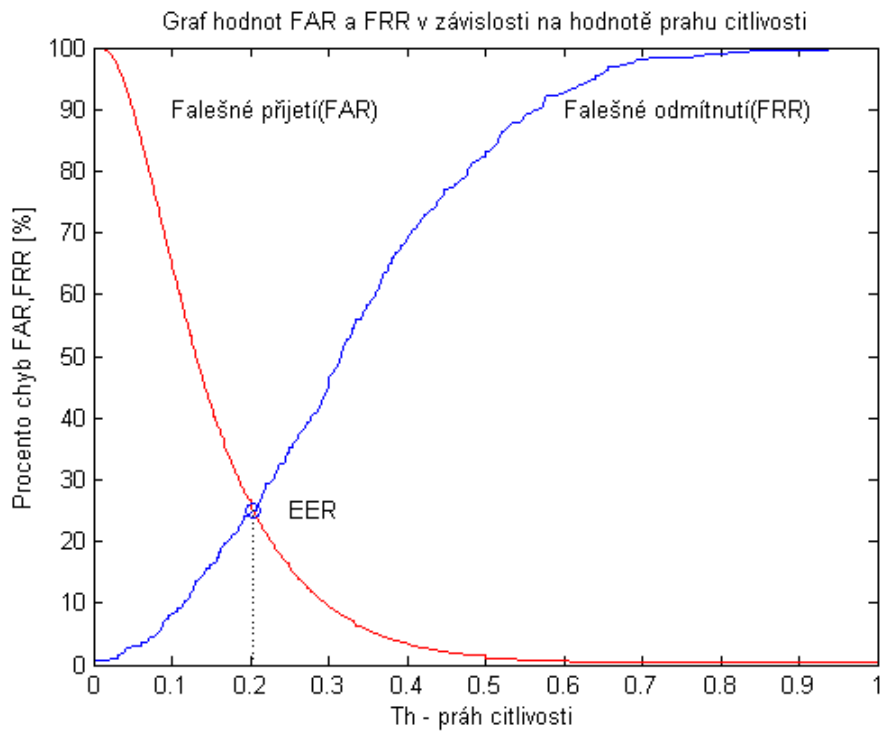
**Obr. 6.2: Graf koeficientů shody a odpovídajícího počtu oprávněných pokusů o identifikaci**

Z grafů je jasně patrná chybovost algoritmu při pokusu ztotožnit dva stejné otisky (různě nasnímané). Senzitivita systému je dle výsledků nízká. Lepší výsledky vykazuje systém při odmítnutí neoprávněné osoby. I v tomto případě ale z grafu vyčteme vysoký počet apriorně neshodných otisků s koeficientem shody rovno jedné. Systém je vyhodnotil chybně.

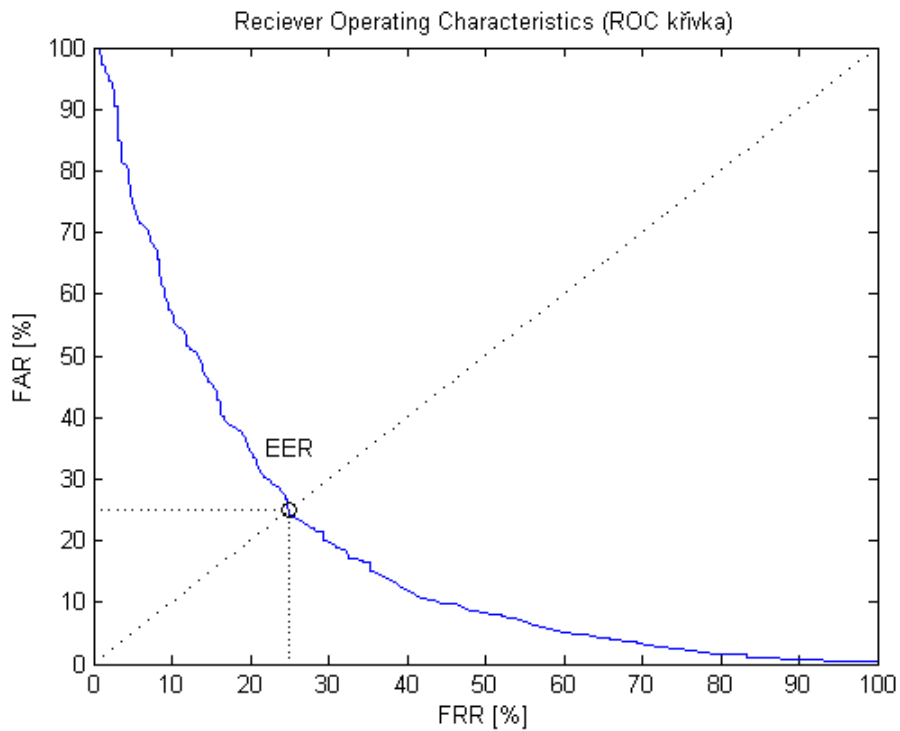


**Obr. 6.3: Senzitivita a Specificita systému**

Pokud výsledky vyjádříme v parametrech FRR, FAR (kapitola 4.4), získáme následující grafy:



**Obr. 6.4:** Graf FRR a FAR pro vytvořený porovnávací algoritmus v závislosti na hodnotě prahu citlivosti  $Th$



**Obr. 6.5:** ROC křivka s vnesenými parametry FRR a FAR

---

## 6.1 Možné příčiny chyb výsledků

Objektivnost hodnocení identifikačního procesu je ovlivněna několika zásadními skutečnostmi. Zaprvé, mnoho otisků v databázi vykazovalo nízkou obrazovou kvalitou. Docházelo ke značným výpadkům zobrazované oblasti, jednotlivé papilární linie byly na mnoha místech uměle přerušeny, což ovlivňovalo hodnocení markantů zakončení.

Zadruhé, do hodnocení shody nebyl zařazen vysoce diskriminativní činitel, a to třída otisku určená dle Galton-Henry klasifikačního schématu. K porovnávání shody tak docházelo i mezi otisky na první pohled naprosto odlišnými. Hodnocení tedy probíhalo pouze na základě lokalizace markantů.

A konečně zatřetí, v případě apriorně shodných otisků se dvěma singulárními body, bylo mnoho z nich nasnímáno s takovou lokalizací, že druhý singulární bod (většinou bod delta) se nacházel již mimo aktivní oblast snímače. To způsobilo zařazení těchto otisků do kategorie s pouze jedním singulárním bodem a následně jinou volbu vztažné soustavy. Evidentně v těchto případech nemohlo být dosaženo očekávané shody, i když se jednalo o otisky jinak naprosto totožné.

---

## 7 Závěr

Biometrie otisků prstů je velmi rozsáhlým tématem. Tato problematika prošla již více jak stoletým obdobím vývoje. S exponenciálním nárůstem výpočetního výkonu současné výpočetní techniky přestalo být prohledávání stále se rozrůstajících databází problémem. Z kriminalistických aplikací, které byly kolébkou této identifikační techniky, se využití rozšířilo do komerčních i státních bezpečnostních systémů. Z důvodu teroristických hrozeb v posledním desetiletí se rychlost rozmachu ještě zvýšila, zejména v bezpečnostní politice států, včetně přítomnosti otisku prstu na osobních identifikačních průkazech a cestovních pasech osob.

Ke zdokonalování identifikačních algoritmů a vývoji nových dochází neustále, v praxi je však stále nejběžnějším a nejrozšířenějším systémem algoritmus založený na analogii s běžným kriminalistickým postupem. Nalezení singularit a markantních bodů s vytvořením identifikační šablony a její konfrontací s databází porovnávaných otisků. Zachování tohoto postupu podpořilo zdokonalení snímacích postupů v popředí s ultrazvukovým snímačem, jehož kvalita obrazu usnadňuje přesnost identifikace i staršími metodami.

Tato práce měla za úkol prezentovat současné aplikované algoritmy určené pro proces identifikace osob podle jejich otisků prstů. Došlo k popisu struktury otisku a jeho charakteristických znaků, právě využívaných k požadovanému účelu. Všechny algoritmy přistupovaly k problematice odlišným způsobem, ale také se v některých oblastech překrývaly.

Prezentované řešení identifikačního algoritmu v současné podobě nedosahuje požadavků pro možnost využití v praxi, avšak v případě použití obrazových dat ve vyšší kvalitě by se dal očekávat mírný posun kvalitativního hodnocení o něco výše.

---

## Seznam literatury

- [1] STRAUS, Jiří. *Kriminalistická daktyloskopie*. 1. vyd. Praha: Policejní akademie ČR, 2005. 285 s. ISBN 80-7251-192-0.
- [2] RAK, Roman, et al. *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. Praha: Grada Publishing, 2008. 664 s. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [3] HLAVÁČ, Václav - ŠONKA, Milan. *Počítačové vidění*. Praha: Grada Publishing, 1992. 272 s. ISBN 80-85424-67-3.
- [4] JAN, Jiří. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. 2. upr. a rozš. vyd. Brno: VUTIUM, 2002. 427 s. ISBN 80-214-2911-9.
- [5] JAIN, L. C., et al. *Intelligent biometric techniques in Fingerprint and Face recognition*. 1. vyd. New York: CRC Press, 1999. 463 s. ISBN 0-8493-2055-0.
- [6] WAYMAN, J., et al. *Biometric systems: Technology, Design and Performance Evaluation*. London: Springer, 2005. 370 s. ISBN 1-85233-596-3.
- [7] BOLLE, R. M., et al. *Guide to Biometrics*. New York: Springer, 2004. 364 s. ISBN: 0-387-40089-3.
- [8] MALTONI, Davide, et al. *Handbook of Fingerprint recognition*. London: Springer, 2009. 494 s. ISBN: 978-1-84882-253-5.
- [9] GÖRNER, Vladimír - NEDOMA Petr. *Programový systém MATLAB*. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00580-1.
- [10] BALDA, Miroslav. *Úvod do MATLABu*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-404-2.
- [11] CHALOUPKA, Radek. *Generátor otisků prstů*. Brno, 2007. 51 s. Diplomová práce na FIT VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Dražanský, Ph.D.
- HORÁK, Karel, et al. *Počítačové vidění [online]*. Učební texty kurzu Počítačové vidění, Brno, 2007. FEKT VUT v Brně. (Vyžaduje oprávnění k přístupu do IS VUT).
- URL: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=18414&lang=0](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=18414&lang=0)>.
- [12] ŠPANĚL, Michal - BERAN, Vítězslav: *Obrazové segmentační techniky: Přehled existujících metod [online]*. Brno, 2006. FIT VUT v Brně.
- URL: <<http://www.fit.vutbr.cz/~spanel/segmentace/.cs.iso-8859-2>>.
- [13] PANKARTI, S. – PRABHAKAR, S. – JAIN, A. K. *On the Individuality of Fingerprints*. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, August 2002, Vol. 24, No. 8, s. 1010-1025.
- [14] WANG, Y. – HU, J. – PHILLIPS, D. *A Fingerprint Orientation Model Based on 2D Fourier Expansion (FOMFE) and Its Application to Singular-Point Detection and Fingerprint Indexing*. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, April 2007, Vol. 29, No. 4, s. 573-585.

---

## Seznam obrázků a tabulek

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>OBR. 2.1:</b>  | SCHÉMA STAVBY KŮŽE S PAPILÁRNÍMI LINIEMI _____   | 8  |
| <b>OBR. 2.2:</b>  | VYBRANÉ TYPY MARKANTŮ V OBRAZE OTISKU PRSTU _____  | 9  |
| <b>OBR. 2.3:</b>  | POROVNÁNÍ RŮZNÝCH OTISKŮ SEJMUTÝCH V NIŽŠÍM (VLEVO) A VYŠŠÍM ROZLIŠENÍ (VPRAVO) _____  | 11 |
| <b>OBR. 2.4:</b>  | OBRAZ KOMPRIMOVANÝ VE FORMÁTU JPEG SE ZŘETELNÝM ŠACHOVNICOVÝM ARTEFAKTEM (VLEVO) A OBRAZ KOMPRIMOVANÝ METODOU WSQ (VPRAVO) _____ | 12 |
| <b>OBR. 2.5:</b>  | BINARIZACE OBRAZU POMOCÍ GABOROVY FILTRACE _____   | 13 |
| <b>OBR. 2.6:</b>  | MARKANT TYPY VIDLICE PŘED A PO PROVEDENÍ ZTENČENÍ LINIE _____  | 13 |
| <b>OBR. 2.7:</b>  | ORIGINÁLNÍ OBRAZ (VLEVO) A JEHO EROZE (VPRAVO) _____   | 14 |
| <b>OBR. 2.8:</b>  | OBRYSY OBRAZU _____  | 14 |
| <b>OBR. 2.9:</b>  | TVORBA SKELETU (VLEVO) A SKELET OBDÉLNÍKU (VPRAVO) _____   | 14 |
| <b>OBR. 2.10:</b> | CENTRÁLNÍ PIXEL JE NA PAPILÁRNÍ LINII _____  | 15 |
| <b>OBR. 2.11:</b> | CENTRÁLNÍ PIXEL JE UKONČENÍM PAPILÁRNÍ LINIE _____   | 15 |
| <b>OBR. 2.12:</b> | CENTRÁLNÍ PIXEL JE SOUČÁSTÍ ROZDVOJENÍ PAPILÁRNÍ LINIE _____   | 15 |
| <b>OBR. 2.13:</b> | ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ TYPŮ OTISKŮ PRSTŮ PODLE BODŮ SINGULARIT _____   | 16 |
| <b>OBR. 2.14:</b> | DETEKCE SINGULARIT POMOCÍ POINCARÉ INDEXU _____  | 16 |
| <b>OBR. 2.15:</b> | VYBRANÉ TYPY MARKANTNÍCH BODŮ _____  | 17 |
| <b>OBR. 2.16:</b> | OZNAČENÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ MARKANTŮ A JEJICH ORIENTACE _____   | 18 |
| <b>OBR. 2.17:</b> | POZICE V SOUSTAVĚ SOUŘADNIC A SMĚROVÝ VEKTOR MARKANTŮ TYPY ZAKONČENÍ (VLEVO) A VIDLICE (VPRAVO) _____                            | 18 |
| <b>OBR. 3.1:</b>  | VYTVOŘENÍ ŠABLONY Z LOKALIZOVANÝCH MARKANTNÍCH BODŮ _____  | 20 |
| <b>OBR. 3.2:</b>  | FILTRACE VE VZORKOVACÍM BODĚ X, Y _____  | 23 |
| <b>OBR. 3.3:</b>  | VZORKOVACÍ BODY V OKOLÍ JÁDRA OTISKU _____   | 23 |
| <b>OBR. 3.4:</b>  | POSUNUTÍ VZORKOVACÍCH BODŮ U DVOU RŮZNÝCH POROVNÁVANÝCH OTISKŮ _____   | 23 |
| <b>OBR. 3.5:</b>  | UŽITÍ GABOROVÝCH FILTRŮ PRO BINARIZACI (24 RŮZNÝCH ORIENTACÍ FILTRU) _____   | 24 |
| <b>OBR. 5.8:</b>  | IDEÁLNÍ BIOMETRICKÁ APLIKACE _____   | 28 |
| <b>OBR. 5.5:</b>  | DEFINOVANÁ SOUSTAVA SOUŘADNIC V OBRAZE _____   | 30 |
| <b>OBR. 5.1:</b>  | FORMÁTOVÁNÍ VZTAŽNÉ SOUSTAVY POUŽITÉ PRO STANOVENÍ GEOMETRICKÝCH ÚDAJŮ O TISKU _____   | 31 |
| <b>OBR. 5.2:</b>  | FORMÁTOVÁNÍ VZTAŽNÉ SOUSTAVY V PŘÍPADĚ JEDINÉHO SINGULÁRNÍHO BODU _____  | 32 |
| <b>OBR. 5.4:</b>  | UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ PROGRAMU _____   | 33 |



---

|                  |  |    |
|------------------|--|----|
| <b>OBR. 6.1:</b> | GRAF KOEFICIENTŮ SHODY A ODPOVÍDAJÍCÍHO POČTU NEOPRÁVNĚNÝCH POKUSŮ O IDENTIFIKACI _____                  | 34 |
| <b>OBR. 6.2:</b> | GRAF KOEFICIENTŮ SHODY A ODPOVÍDAJÍCÍHO POČTU OPRAVNĚNÝCH POKUSŮ O IDENTIFIKACI _____                    | 35 |
| <b>OBR. 6.3:</b> | SENZITIVITA A SPECIFICITA SYSTÉMU _____  | 35 |
| <b>OBR. 6.4:</b> | GRAF FRR A FAR PRO VYTVOŘENÝ POROVNÁVACÍ ALGORITMUS V ZÁVISLOSTI NA HODNOTĚ PRAHU CITLIVOSTI $T_H$ _____ | 36 |
| <b>OBR. 6.5:</b> | ROC KŘIVKA S VYNESENÝMI PARAMETRY FRR A FAR _____  | 36 |
| <b>TAB. 1:</b>   | ZÁKLADNÍ MARKANTNÍ BODY A JEJICH HODNOTA V PROCESU IDENTIFIKACE _____                                    | 17 |

---

## Seznam použitých zkratek

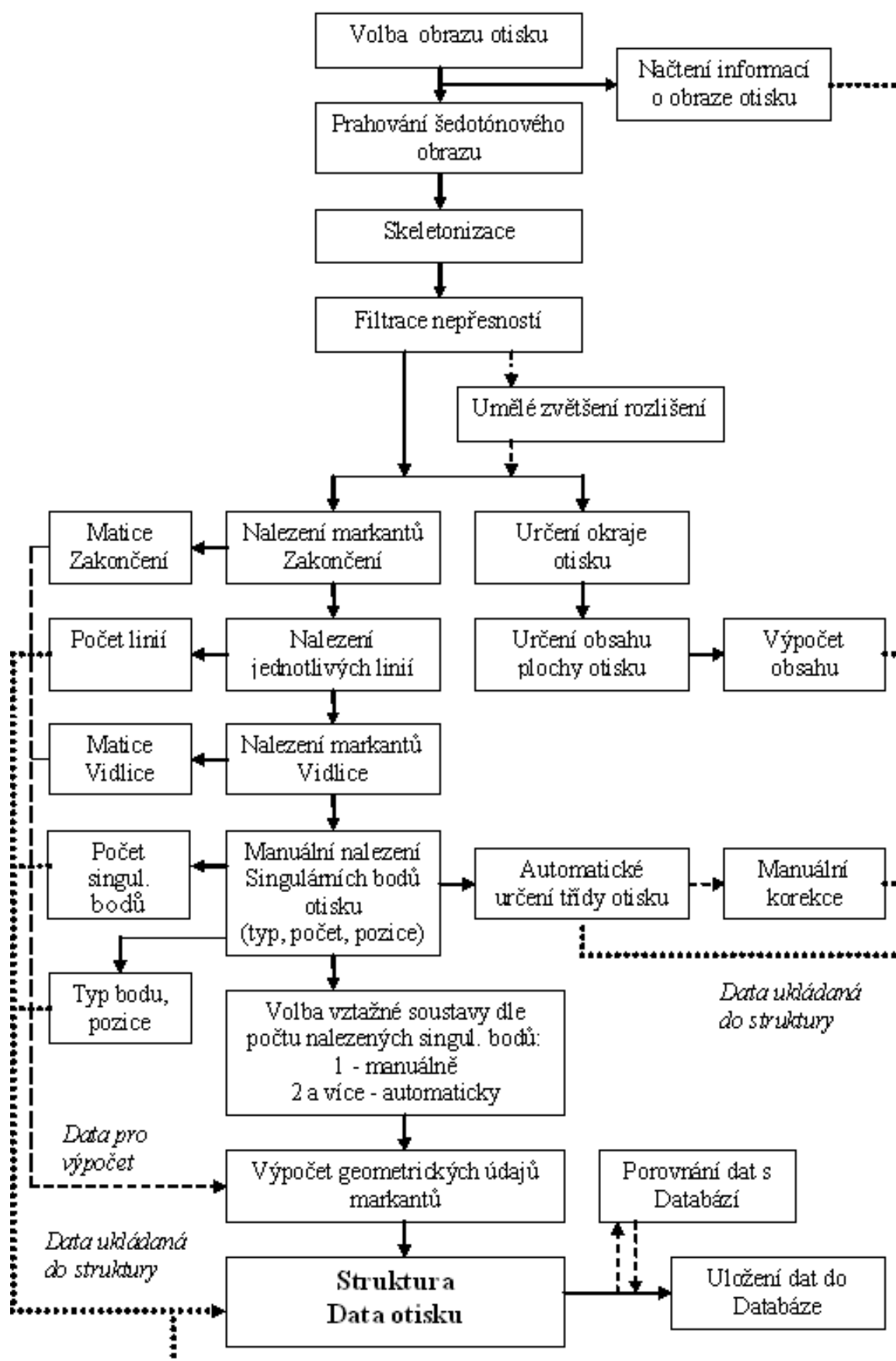
- AFIS *Automated Fingerprint Identification System*, produkt americké firmy Printark sloužící pro potřeby kriminalistických ústavů policejních složek států.
- DPI *Dots Per Inch*, počet bodů (pixelů) na palec (jednotka délky), využíváno pro definici rozlišení obrazu.
- FAR *False Acceptance Rate*, míra falešného přijetí, parametr hodnocení spolehlivosti identifikace. Poměr počtu chybně přijatých a počtu všech přijatých
- FPR *False Positive Rate*, míra falešné pozitivivity, viz. FAR.
- FRR *False Rejection Rate*, míra falešného odmítnutí, parametr hodnocení spolehlivosti identifikace. Poměr počtu chybně odmítnutých a počtu všech odmítnutých.
- JPEG *Joint Photographic Experts Group*, formát zpracování obrazu, využíváný zejména pro potřeby fotografie.
- ROC *Receiving Operating Characteristics*, křivka pro zhodnocení robustnosti použité biometrické aplikace
- TPR *True Positive Rate*, parametr hodnocení spolehlivosti identifikace. Poměr počtu správně odmítnutých a počtu všech odmítnutých.
- VGA *Video Graphics Array*, je počítačový standard pro počítačovou zobrazovací techniku, vydaný roku 1987 společností IBM. VGA patří do rodiny starších IBM video standardů. Definuje hodnoty náležitých vlastností obrazu, jako je rozlišení, bitová hloubka, atd.
- WSQ *Wavelet Scalar Quantization*, komprimační metoda zpracování obrazových dat využívaná jako standard FBI pro kompresi obrazových dat otisků prstů díky svým jedinečným výsledkům (žádný šachovnicový efekt jako u JPEG, vysoký komprimační poměr 1:4 až 1:50).

## Seznam příloh

PŘÍLOHA 1: DIAGRAM FUNKCE VYTVOŘENÉHO PROGRAMU

PŘÍLOHA 2: ČÁST ZDROJOVÉHO KÓDU

## Příloha 1: Diagram funkce vytvořeného programu



---

## Příloha 2: Část zdrojového kódu

```
function maticedat=geometrickeudaje(souradnice,markantvidlice,markantzakonceni)
%maticedat=geometrickeudaje(souradnice,markantvidlice,markantzakonceni)

%funkce pro vytvoření matice dat (proměnná "maticedat") zahrnující vzdálenosti a úhly jednotlivých
nalezených markantních bodů (vstupní proměnné "markantvidlice", "markantzakonceni")
%proměnná "souradnice" obsahuje souřadnice dvou zvolených singulárních bodů,
%od jejichž spojnice se počítají úhly svírající spojnice středu této úsečky
%a markantu.
%-----
global nasobek
global rozmeroriginal
global rozmer_x

% Transformace souřadnic z maticových řádek/sloupec na souřadnou soustavu 0xy
souradnice(1,1)=rozmer_x-souradnice(1,1);
souradnice(2,1)=rozmer_x-souradnice(2,1);
souradnice(1,2)=souradnice(1,2)-1;
souradnice(2,2)=souradnice(2,2)-1;

markantzakonceni(:,1)=rozmer_x-markantzakonceni(:,1);
markantzakonceni(:,2)=markantzakonceni(:,2)-1;
markantvidlice(:,1)=rozmer_x-markantvidlice(:,1);
markantvidlice(:,2)=markantvidlice(:,2)-1;
%-----

%hraniční přímka, parametry
k=(souradnice(1,1)-souradnice(2,1))/(souradnice(1,2)-souradnice(2,2));
q=souradnice(2,1)-(k*souradnice(2,2));
%-----

%určení středového bodu (střed úsečky spojující dva zvolené singulární body)
%vůči jeho pozici v obraze se počítají vzdálenosti jednotlivých markantů
a=abs(souradnice(1,1)-souradnice(2,1));
b=abs(souradnice(1,2)-souradnice(2,2));
if souradnice(1,2)~=souradnice(2,2) && souradnice(1,1)~=souradnice(2,1)

    if souradnice(1,1)>souradnice(2,1) && souradnice(1,2)<souradnice(2,2)
        stredovybod(1,1)=souradnice(1,1)-ceil(a/2);
        stredovybod(1,2)=souradnice(1,2)+ceil(b/2);

    elseif souradnice(1,1)>souradnice(2,1) && souradnice(1,2)>souradnice(2,2)
        stredovybod(1,1)=souradnice(1,1)-ceil(a/2);
        stredovybod(1,2)=souradnice(1,2)-ceil(b/2);

    elseif souradnice(1,1)<souradnice(2,1) && souradnice(1,2)<souradnice(2,2)
        stredovybod(1,1)=souradnice(1,1)+ceil(a/2);
        stredovybod(1,2)=souradnice(1,2)+ceil(b/2);

    elseif souradnice(1,1)<souradnice(2,1) && souradnice(1,2)>souradnice(2,2)
        stredovybod(1,1)=souradnice(1,1)+ceil(a/2);
        stredovybod(1,2)=souradnice(1,2)-ceil(b/2);
    end

elseif souradnice(1,2)==souradnice(2,2) && souradnice(1,1)~=souradnice(2,1) &&
souradnice(1,1)>souradnice(2,1)
    stredovybod(1,1)=souradnice(1,1)-ceil(a/2);
    stredovybod(1,2)=souradnice(1,2);

elseif souradnice(1,2)==souradnice(2,2) && souradnice(1,1)~=souradnice(2,1) &&
souradnice(1,1)<souradnice(2,1)
    stredovybod(1,1)=souradnice(1,1)+ceil(a/2);
    stredovybod(1,2)=souradnice(1,2);

elseif souradnice(1,2)~=souradnice(2,2) && souradnice(1,1)==souradnice(2,1) &&
souradnice(1,2)>souradnice(2,2)
    stredovybod(1,1)=souradnice(1,1);
    stredovybod(1,2)=souradnice(1,2)-ceil(b/2);

elseif souradnice(1,2)~=souradnice(2,2) && souradnice(1,1)==souradnice(2,1) &&
souradnice(1,2)<souradnice(2,2)
    stredovybod(1,1)=souradnice(1,1);
    stredovybod(1,2)=souradnice(1,2)+ceil(b/2);
end
%-----
```

---

```

%Markant zakončení
for d=1:length(markantzakoncení)
vzdalenostz(d)=(1/(nasobek*rozmeroriginal(1,1)))*sqrt(((stredovybod(1,1)-
markantzakoncení(d,1))^2)+((stredovybod(1,2)-markantzakoncení(d,2))^2));
y=k*markantzakoncení(d,2)+q;
%-----
%výpočet úhlu svírajícího spojnice stredovybod-markant s úsečkou mezi dvěma
%zvolenými singulárnými body
%-----
% kladná směrnice
if (souradnice(1,1)>souradnice(2,1) && souradnice(1,2)>souradnice(2,2)) ||
(souradnice(1,1)<souradnice(2,1) && souradnice(1,2)<souradnice(2,2))
    uhelodzakladny=(atand(a/b));

    %I kvadrant pod přímkou
    if markantzakoncení(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)>stredovybod(1,2) &&
markantzakoncení(d,1)<y
        uhelz(d)=360-uhelodzakladny+(atand((abs(stredovybod(1,1)-
markantzakoncení(d,1)))/(abs(stredovybod(1,2)-markantzakoncení(d,2)))));

    %I kvadrant nad přímkou
    elseif markantzakoncení(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)>stredovybod(1,2) &&
markantzakoncení(d,1)>y
        uhelz(d)=90-uhelodzakladny-(atand((abs(stredovybod(1,2)-
markantzakoncení(d,2)))/(abs(stredovybod(1,1)-markantzakoncení(d,1)))));

    %I kvadrant na přímce
    elseif markantzakoncení(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)>stredovybod(1,2) &&
markantzakoncení(d,1)==y
        uhelz(d)=0;

    %shoda indexu sloupce
    elseif markantzakoncení(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)==stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=90-uhelodzakladny;

    elseif markantzakoncení(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)==stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=270-uhelodzakladny;

    %II kvadrant
    elseif markantzakoncení(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)<stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=90-uhelodzakladny+(atand((abs(stredovybod(1,2)-
markantzakoncení(d,2)))/(abs(stredovybod(1,1)-markantzakoncení(d,1)))));

    %shoda indexu řádku
    elseif markantzakoncení(d,1)==stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)>stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=360-uhelodzakladny;

    elseif markantzakoncení(d,1)==stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)<stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=180-uhelodzakladny;

    %III kvadrant nad přímkou
    elseif markantzakoncení(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)<stredovybod(1,2) &&
markantzakoncení(d,1)>y
        uhelz(d)=180-uhelodzakladny+(atand((abs(stredovybod(1,1)-
markantzakoncení(d,1)))/(abs(stredovybod(1,2)-markantzakoncení(d,2)))));

    %III kvadrant na přímce
    elseif markantzakoncení(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)<stredovybod(1,2) &&
markantzakoncení(d,1)==y
        uhelz(d)=180;

    %III kvadrant pod přímkou
    elseif markantzakoncení(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)<stredovybod(1,2) &&
markantzakoncení(d,1)<y
        uhelz(d)=270-uhelodzakladny-(atand((abs(stredovybod(1,2)-
markantzakoncení(d,2)))/(abs(stredovybod(1,1)-markantzakoncení(d,1)))));

    %IV kvadrant
    elseif markantzakoncení(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakoncení(d,2)>stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=360-uhelodzakladny-(atand((abs(stredovybod(1,1)-
markantzakoncení(d,1)))/(abs(stredovybod(1,2)-markantzakoncení(d,2)))));
    end
%-----
% záporná směrnice
elseif (souradnice(1,1)>souradnice(2,1) && souradnice(1,2)<souradnice(2,2)) ||
(souradnice(1,1)<souradnice(2,1) && souradnice(1,2)>souradnice(2,2))
    uhelodzakladny=180-atand(a/b);

```

---

```

%I kvadrant
    if markantzakonceni(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)>stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=360-uhelodzakladny+(atand((abs(stredovybod(1,1)-
markantzakonceni(d,1)))/(abs(stredovybod(1,2)-markantzakonceni(d,2)))));

        %shoda indexu sloupce
    elseif markantzakonceni(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)==stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=450-uhelodzakladny;

    elseif markantzakonceni(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)==stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=270-uhelodzakladny;

        %shoda indexu řádku
    elseif markantzakonceni(d,1)==stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)>stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=360-uhelodzakladny;

    elseif markantzakonceni(d,1)==stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)<stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=180-uhelodzakladny;

        %II kvadrant nad přímkou
    elseif markantzakonceni(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)<stredovybod(1,2) &&
markantzakonceni(d,1)>y
        uhelz(d)=450-uhelodzakladny+(atand((abs(stredovybod(1,2)-
markantzakonceni(d,2)))/(abs(stredovybod(1,1)-markantzakonceni(d,1)))));

        %II kvadrant na přímce
    elseif markantzakonceni(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)<stredovybod(1,2) &&
markantzakonceni(d,1)==y
        uhelz(d)=0;

        %II kvadrant pod přímkou
    elseif markantzakonceni(d,1)>stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)<stredovybod(1,2) &&
markantzakonceni(d,1)<y
        uhelz(d)=180-uhelodzakladny-(atand((abs(stredovybod(1,1)-
markantzakonceni(d,1)))/(abs(stredovybod(1,2)-markantzakonceni(d,2)))));

        %III kvadrant
    elseif markantzakonceni(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)<stredovybod(1,2)
        uhelz(d)=180-uhelodzakladny+(atand((abs(stredovybod(1,1)-
markantzakonceni(d,1)))/(abs(stredovybod(1,2)-markantzakonceni(d,2)))));

%IV kvadrant pod přímkou
    elseif markantzakonceni(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)>stredovybod(1,2) &&
markantzakonceni(d,1)<y
        uhelz(d)=270-uhelodzakladny+(atand((abs(stredovybod(1,2)-
markantzakonceni(d,2)))/(abs(stredovybod(1,1)-markantzakonceni(d,1)))));

        %IV kvadrant na přímce
    elseif markantzakonceni(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)>stredovybod(1,2) &&
markantzakonceni(d,1)==y
        uhelz(d)=180;

        %IV kvadrant nad přímkou
    elseif markantzakonceni(d,1)<stredovybod(1,1) && markantzakonceni(d,2)>stredovybod(1,2) &&
markantzakonceni(d,1)>y
        uhelz(d)=360-uhelodzakladny-(atand((abs(stredovybod(1,1)-
markantzakonceni(d,1)))/(abs(stredovybod(1,2)-markantzakonceni(d,2)))));

    end

end
maticedat(d,1)=vzdalenostz(d);
maticedat(d,2)=uhelz(d);
end
%-----
% Markant vidlice
...
...
...

```