

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
ÚSTAV KYBERNETIKY A INFORMATIKY

Ing. Michal Dobeš

**ROZPOZNÁVÁNÍ OBRAZU SE ZAMĚŘENÍM NA
IDENTIFIKACI OSOB DLE OTISKU PRSTU**

**FINGERPRINT IMAGE RECOGNITION FOR THE
IDENTIFICATION OF INDIVIDUALS**

PhD Thesis

Obor: Kybernetika a informatika
Školitel: Doc. Ing. František Zbořil, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Jiří Jan, CSc.,
Doc. Ing. Václav Matoušek, CSc.,
Doc. Ing. Miroslav Šnorek, CSc.

Datum obhajoby: 11. 12. 2000

© 2001 M. Dobeš
ISBN 80-214-1820-6

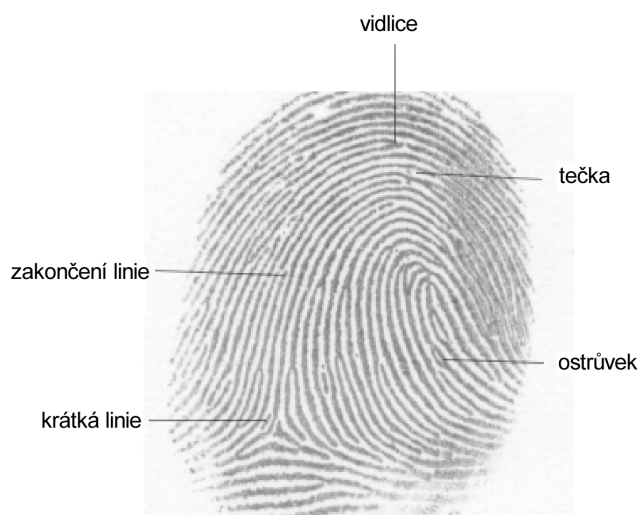
OBSAH

1 ÚVOD	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	7
3 CÍLE PRÁCE	9
4 NOVÁ METODA SESOUHLASOVÁNÍ OTISKŮ PRSTŮ Z NEUPRAVENÉHO ŠEDOTÓNOVÉHO OBRAZU	10
4.1 Teorie a vztahy	10
4.2 Kriterium sesouhlasení	12
4.3 Stručný popis metody	13
5 VÝSLEDKY PRÁCE	16
6 ZÁVĚR	19
7 ABSTRACT	21
7.1 The Method	22
7.2 Results	23
7.3 Conclusions	24
LITERATURA	25
ŽIVOTOPIS	27
CURRICULUM VITAE	29

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá rozpoznáváním otisků prstů, tzv. verifikací, kdy je jeden vzorový otisk z databáze porovnán s jedním (zkoumaným) otiskem. Verifikace spočívá v hledání míry shodnosti dvou obrazů otisků prstů.

Jako klasické metody rozpoznávání otisků prstů lze označit ty, kdy je obraz otisku prstu nejprve předzpracován a poté jsou teprve extrahovány některé charakteristické body nazývané markanty (obr. 1.1) pro rozpoznání, viz např. [16], [12]. Šedotónový obraz je nejprve předzpracován a je vytvořen dvouúrovňový snímek. Poté je získán skelet papilárních linií. Ze skeletu jsou získány charakteristické body a rozpoznávání se provádí na základě informací o poloze těchto bodů a dalších informací získaných z upraveného obrazu.



Obr. 1.1 Typy markantů v obraze otisku prstu.

Při předzpracování vznikají chyby, které znesnadňují následné rozpoznání. Mezi tyto chyby patří zejména odchýlení pozice markantu od předpokládané polohy a vznik falešných markantů. Vliv těchto chyb se autoři snaží omezit buď kvalitnějším předzpracováním [17], [23], [22] nebo dodatečnými úpravami viz např. [27], [13].

V literatuře byly publikovány i alternativní přístupy k rozpoznávání otisků prstů, které nepoužívají předzpracování. Mezi tyto metody patří např. rozpoznávání otisků prstů pomocí fraktálů [20], Fourierova spektra [24] apod. Bohužel, dle tvrzení autorů, tyto alternativní metody aplikované na obrazy otisků prstů nedosahují dostatečně dobrých výsledků.

Zde prezentovaná práce představuje nový úspěšný alternativní přístup k rozpoznávání otisků prstů metodou, která nevyžaduje předzpracování. Sesouhlasování a rozpoznávání obrazů otisků prstů je prováděno z nijak neupraveného šedotónového obrazu. Metoda je založena na postupném sesouhlasování oblastí v otiscích prstů na základě výpočtu vzájemné informace mezi těmito oblastmi. Navržená metoda dosahuje lepší výsledky než výsledky metody publikované v [16].

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Rozpoznáváním dvou otisků prstů, nebo-li verifikací, a s tím souvisejícími úkoly, se zabývá následující literatura.

V [20] se provádí způsob rozpoznávání otisků pomocí fraktálové analýzy. Primární charakteristikou fraktálů je odhad fraktálové dimenze (tzv. Mass Estimate of Fractal Dimension -EFD) a EFD mřížky. Dle autorky má uvedená metoda pouze teoretický význam a není příliš použitelná pro rozpoznávání otisků.

V [24] se provádí způsob rozpoznávání otisků pomocí Fourierova spektra. Obraz byl rozdělen do 32 radiálních a 32 angulárních složek Fourierova spektra a tyto složky byly porovnávány. Uváděnou nevýhodou metod založených na porovnávání Fourierova spektra je, že různé otisky mívají často velmi podobná Fourierova spektra, přestože se jejich fragmenty vzájemně liší. Důsledkem je falešné rozpoznání otisků, které si vzájemně neodpovídají. Z tohoto důvodu není tato metoda příliš vhodná pro rozpoznávání obrazů otisků prstů.

V [14] a [11] jsou popisovány optické systémy pro rozpoznávání otisků. Princip spočívá ve srovnávání hologramů přiloženého otisku a otisku na identifikační kartě. Uváděnou nevýhodou metody je velká citlivost na natočení, v [11] byla uváděna $\pm 1,5$ stupňů.

Ve [26] je popisována jednoduchá metoda porovnávání založená pouze na extrakci markantů včetně informace o orientaci markantů a jejich porovnávání. Metoda je popsána příliš stručně na to, aby mohla být použita pro srovnání. Podrobnější informace nebyly k dispozici.

Mezi nejvýznamnější práce zabývající se rozpoznáváním (z hlediska úspěšnosti) patří Hongova metoda [16] a [12]. Práce má hlubší pozadí - jde o soustředění výsledků dlouhodobějších projektů, na kterých zejména spolupracovali A.Jain, K.Karu, N. Ratha, Y.Wan, S. Chen, a L.Hong z Michigan State University a R.Boole a C.Watson z IBM. Metoda používá předzpracování. K předzpracování, tj. filtraci, ztenčování linií, extrakci linií a extrakci markantů, byly použity algoritmy, které pro otisky prstů navrhli a implementovali Ratha a Chen [22], [23].

Po předzpracování jsou ze ztenčeného obrazu a vzoru extrahovány papilární linie včetně informace o markantech, které se k papilární linii vztahují. Dále je prováděno rozpoznávání. Každá papilární linie je považována za jednodimenzionální diskretní signál s počátkem koincidenčním s markantem a osou x . Každá papilární linie ze vzoru je srovnána s každou linií z obrazu na základě výpočtu „korelačního“

koeficientu (podrobněji viz [12]). Z odpovídajících si linií ze vzoru a z obrazu jsou získávány přibližné parametry translace a rotace a také je získána množina markantů, které by si mohly v obraze a vzoru odpovídat. Jelikož polohy markantů nejsou určeny přesně a není známo, zda se mezi nimi nevyskytují falešné markanty, jsou markanty srovnávány pomocí algoritmu, který adaptuje i polohu tolerančních boxů obklopujících jednotlivé markanty. Adaptace je prováděna rekurzivně na základě minimalizace stanovené chybové funkce představující „nepřesnost“. Tato chybová funkce je určena vzdáleností představující sumu rozdílů poloh srovnávaných markantů.

Výsledné “Matching score” je určováno pro nalezené shodné markanty, pro které byla chybová funkce minimální jako:

$$M_{pq} = \frac{100N_{pair}}{\max(M, N)}, \text{ kde} \quad (2.1)$$

N_{pair} je počet nalezených společných markantů,

N je celkový počet markantů ve vzoru,

M je celkový počet markantů v obraze.

Hodnota “Matching score” M_{pq} určuje, zda bude otisk přijat či nikoli.

V závislosti na stanovené hodnotě prahu M_{pq} se v [16] uvádí 11%-27% nerozpoznaných shodných otisků (viz srovnání výsledků v závěru).

Z přístupu uvedeného v [12] je vidět nutnost kompenzace nepřesně získané polohy markantů, která vzniká vlivem předzpracování obrazů. Zejména při ztenčování dochází k odchýlení polohy markantu vlivem šumu v obraze otisku nazývaného „holes and speckles“ [12]. Další nepřesnosti polohy a deformace v otisku jsou způsobeny elasticitou kůže.

Nevýhody, které jsou způsobeny nepřesnou polohou markantů, jsem se nejdříve snažil řešit metodou používající poměrně jednoduché předzpracování. Na této metodě, která je v práci stručně uvedena, je také vidět některé nevýhody, které předzpracování přináší. Tato metoda byla založena na výpočtu parametrů geometrické transformace z nalezených markantů a následné korelaci segmentovaných obrazů otisků prstů. Přestože parametry geometrické transformace byly získávány iterativně z markantů typu vidlice, které bývají spolehlivější než markanty typu zakončení, nedosahovala tato metoda dostatečně dobré výsledky.

Proto jsem navrhl novou metodu rozpoznávání otisků prstů, která předzpracování nevyžaduje a nepoužívá srovnání pomocí markantů.

3 CÍLE PRÁCE

Na základě rozboru metod jsem se rozhodl vyzkoušet přístup, který by nebyl závislý na počtu a nepřesné poloze nalezených markantů způsobené předzpracováním (jako je tomu v [16], [12]) a případně by kompenzoval i deformace v otisku prstu způsobené elasticitou kůže.

Cílem práce je navržení a ověření metody vhodné k rozpoznávání obrazů otisků prstů, tj. verifikaci 1:1.

- Metoda by měla být schopná částečně postihnout nepřesné umístění otisku na snímacím zařízení (otočení a posunutí).
- Metoda by měla být schopná částečně postihnout deformace v otisku prstu způsobené elasticitou kůže.
- Metoda by měla umožňovat automatické zpracování, tj. rozpoznání probíhá bez cizího zásahu.
- Metoda by neměla být závislá na počtu nalezených markantů v obraze.

Za cíl jsem si také kladl rozpoznávat otisky prstů nějakým alternativním způsobem, tj. jinak než metodami používajícími předzpracování obrazu, extrakci a srovnávání markantů. Proto jsem se rozhodl navrhnout a ověřit metodu rozpoznávání neupravených šedotónových otisků pomocí vzájemné informace.

4 NOVÁ METODA SESOUHLASOVÁNÍ OTISKŮ PRSTŮ Z NEUPRAVENÉHO ŠEDOTÓNOVÉHO OBRAZU

4.1 Teorie a vztahy

Vzájemná informace bývá obvykle používána pro zjištění míry nezávislosti náhodných veličin [15]. Pokud jsou dva jevy vzájemně nezávislé, je jejich vzájemná informace nulová. Pro sesouhlasování dvou obrazů nás ovšem zajímá opak, tj. jaká je jejich vzájemná závislost, což je duální úloha. Místo hledání minima vzájemné informace je třeba hledat maximum. Vzájemná informace může posloužit nejen k upřesňování polohy bodů, ale také k posuzování míry shody.

Otisky prstů jsou vlivem elasticity kůže nerovnoměrně deformovány. Navržená metoda, při níž je obraz otisku prstu sesouhlasován po částech, tyto deformace do značné míry kompenzuje. Sesouhlasování spočívá v hledání optimálních parametrů β vhodné geometrické transformace T_β mezi vzorem **A** a obrazem **B**.

Podobné zobrazení, kde transformace T_β zahrnuje pouze translaci v souřadnicových osách, rotaci a změnu měřítka neřeší dostatečně deformace způsobené elasticitou kůže. Po praktickém ověření se potvrdila hypotéza, že by tyto deformace v obraze bylo možné postihnout afínními transformacemi. K sesouhlasování je využito vlastností afínních transformací – zachování paralelismu přímek a zachování proporcionality vzdálenosti bodů ležících na odpovídajících si přímkách [2]. Vlastnost zachování paralelismu je potřebná pro respektování směru papilárních linií, zatímco vlastnost zachování proporcionality je výhodná pro korigování deformací v obraze otisku prstu. V otisku prstu začínají deformace obvykle v určitém bodě a mají tendenci se postupně zvětšovat.

Na obsah šedotónového obrazu lze nahlížet jako na realizaci náhodné veličiny. Obsah právě zkoumané oblasti v šedotónovém obraze lze charakterizovat pomocí relativních četností jednotlivých jasových úrovní ve zkoumané oblasti.

Šedotónový obraz **A** je definován maticí $(x_{\min}, \dots, x_{\max}) \times (y_{\min}, \dots, y_{\max})$ obrazových bodů $f_A(x, y)$, kde bod s celočíselnými souřadnicemi (x, y) leží v oblasti $A = (x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max})$. $f_A(x, y)$ je intenzita jasu obrazového elementu (pixelu) v bodě (x, y) .

Analogicky šedotónovým obrazem **B** se rozumí obdélníková oblast $B = (x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max})$ s funkcí intenzity jasu f_B .

V práci jsou použity transformace, pro které jsou hodnoty souřadnic x, y také neceločíselné a definice šedotónového obrazu je rozšířena pro celou oblast A tak, že pro neceločíselné hodnoty souřadnic $(x, y) \in A$ je hodnota intenzity jasu $f_A(x, y)$ chápána jako hodnota získaná bilineární interpolací [25] z hodnot intenzit jasu čtyř okolních obrazových bodů s celočíselnými souřadnicemi.

Nechť i, j jsou diskrétní úrovně intenzity jasu f_A , resp. f_B ($i, j = 1, 2, \dots, \text{Maxlevel}$).

Relativní četnost p_i výskytu intenzity jasu i v oblasti $O_A \subset A$ a relativní četnost q_j výskytu intenzity jasu j v oblasti $O_B \subset B$ jsou definovány takto:

$$p_i(O_A) = \frac{n_i}{M}, \quad q_j(O_B) = \frac{n_j}{M}, \quad (4.1)$$

kde

n_i , resp. n_j , je počet výskytu intenzit jasu i v oblasti O_A , resp. j v oblasti O_B ,

M je velikost (celkový počet pixelů) v oblasti O_A (velikost O_B je stejná).

Sdružená relativní četnost $r_{i,j}$ mezi oblastmi O_A a O_B je definována jako relativní četnost dvojice (i, j) , kdy na pozici x, y v O_A se vyskytuje jas s intenzitou i a na stejné pozici x, y v O_B jas s intenzitou j . Jinými slovy, postupně je procházena celá oblast O_A a zároveň O_B a zkoumáno, kolikrát se vyskytl na pozici x, y v O_A jas i a na stejné pozici x, y v O_B jas j :

$$r_{i,j}(O_A, O_B) = \frac{n_{i,j}}{M}. \quad (4.2)$$

Šedotónové obrazy v oblastech O_A a O_B jsou srovnávány pomocí vzájemné informace. Pro výpočet entropií a vzájemné informace jsou použity výše definované relativní četnosti. Vzájemná informace I mezi oblastmi O_A a O_B je definována pomocí entropie jako (viz např. [15])

$$I = h(O_A) + h(O_B) - h(O_A, O_B), \quad (4.3)$$

kde

$$h(O_A) = - \sum_{i=1}^{\text{Maxlevel}} p_i(O_A) \log_2 p_i(O_A) \text{ je entropie šedotónového obrazu v oblasti } O_A,$$

$$h(O_B) = - \sum_{j=1}^{\text{Maxlevel}} q_j(O_B) \log_2 q_j(O_B) \text{ je entropie šedotónového obrazu v oblasti } O_B,$$

$$h(O_A, O_B) = - \sum_{i=1}^{\text{Maxlevel}} \sum_{j=1}^{\text{Maxlevel}} r_{i,j}(O_A, O_B) \log_2 r_{i,j}(O_A, O_B) \text{ je sdružená entropie mezi}$$

šedotónovými obrazy v oblastech O_A, O_B .

4.2 Kritérium sesouhlení

Nechť T_β je geometrická transformace z A do B , a β představuje vektor transformačních parametrů. Oblast O_A je transformována transformací T_β do B , (tj. na oblast $O_B = T_\beta(O_A)$) a výpočet vzájemné informace $I = I(O_A, O_B)$ je prováděn z hodnot šedotónového obrazu v těchto oblastech. Vzájemná informace je tak vyjádřena závislostí

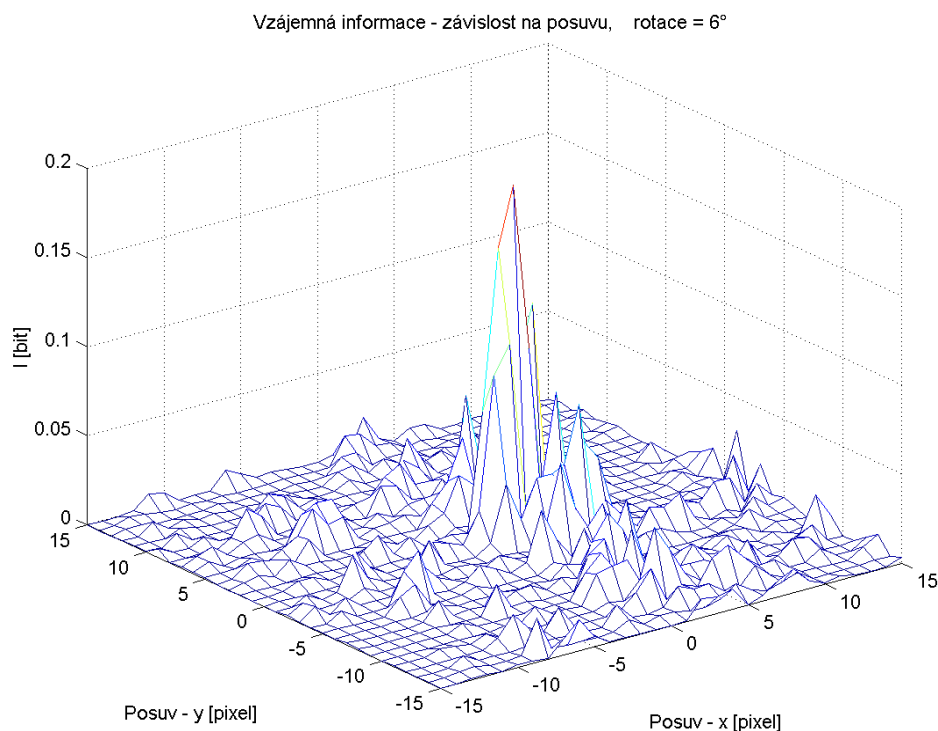
$$I = I(O_A, T_\beta(O_A)). \quad (4.4)$$

Smyslem sesouhlení obrazu a vzoru je nalézt optimálními transformační parametry β pro danou geometrickou transformaci T_β , pro které je hodnota vzájemné informace mezi obrazem a vzorem maximální:

$$\beta_{opt} = \arg \max_{\beta} I(\beta). \quad (4.5)$$

Uvedený vztah představuje kritérium sesouhlení obrazu a vzoru. Obrazy jsou sesouhlasovány ve smyslu maximalizace vzájemné informace. Z maximální velikosti $I_{max} = I(\beta_{opt})$ lze usuzovat, nakolik jsou si obraz a vzor podobné.

Před formulací algoritmu bylo vyšetřováno chování vzájemné informace v obrazech otisků prstů. Byla zjišťována citlivost vzájemné informace na posuv a rotaci, a dále zjišťována schopnost vzájemné informace postihnout pozici sesouhlení ve zmenšených obrazech majících nižší rozlišení. Byla zjištěna schopnost indikovat maximum vzájemné informace v obrazech otisků prstů s nižším rozlišením. Byla zjištěna jistá necitlivost na vzájemné natočení obrazů. Na druhé straně průběh závislostí není ani hladký ani monotónní ani konvexní (viz např. obr. 4.1). Výskyt mnoha lokálních maxim zabraňuje jednoduše postupovat ve směru gradientu vzájemné informace některou ze standardních gradientních metod.



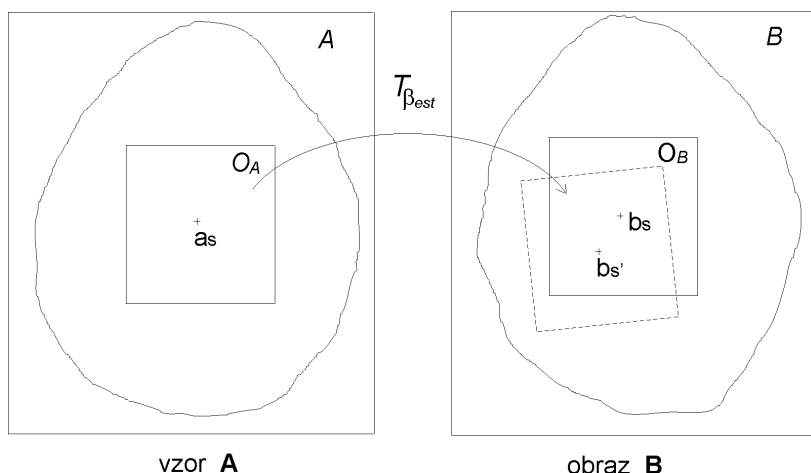
Obr. 4.1. Průběh vzájemné informace pro $\Delta x, \Delta y = -15, \dots, 0, \dots, +15$ při vzájemném natočení obrazů $\varphi = 6^\circ$.

Na základě vyšetřování chování vzájemné informace v otiscích prstů bylo sesouhlasování rozděleno do dvou fází, které jsou zde zjednodušeně popsány.

4.3 Stručný popis metody

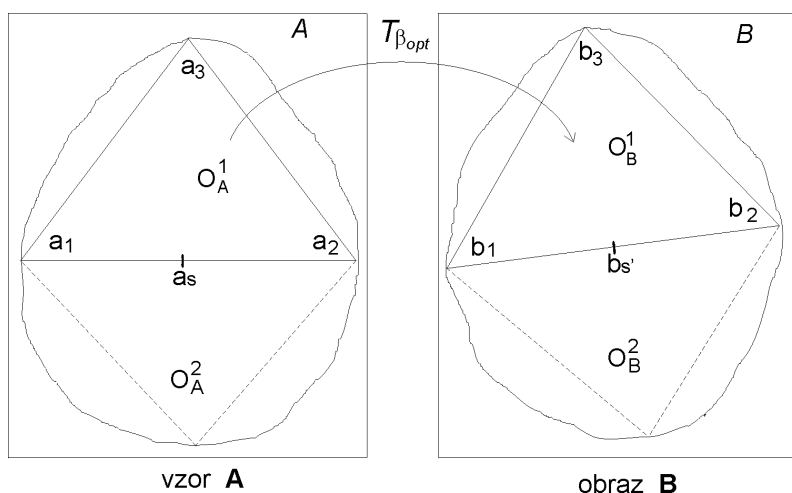
V první fázi je v obrazech s nižším rozlišením hledána přibližná pozice sesouhlasení. Smyslem první fáze je přiblížit se pozici hlavního maxima vzájemné informace tak, aby při iteracích v další fázi nehrozilo zachycení některého falešného lokálního maxima. V první fázi je získán odhad úhlu vzájemného natočení a přibližná pozice jednoho bodu, v jehož okolí se obraz a vzor pravděpodobně shodují. Vzhledem k charakteru závislostí vzájemné informace byla přibližná pozice hledána pomocí pravoúhlých oblastí O_A, O_B (obr. 4.2) ve zmenšených obrazech (s nižším rozlišením). Bylo provedeno „vzorkování“ – vzájemná informace byla vyhodnocena pro $N_x \times N_y$ parametrů vzájemného posuvu $\Delta x, \Delta y$ oblastí O_A, O_B a N_φ daných úhlů φ vzájemného natočení. Přibližná pozice sesouhlasení odpovídá parametrům $\Delta x, \Delta y, \varphi$, pro které bylo nalezeno maximum vzájemné informace. Tomu odpovídá předběžný odhad transformačních parametrů β_{est} . Bod a_s (střed oblasti O_A ve vzoru) a jemu odpovídající opěrný bod b_s v obraze slouží ke generování

dalších opěrných bodů a vytvoření trojúhelníkových oblastí v druhé fázi sesouhlasování.



Obr. 4.2. Předběžný odhad transformačních parametrů β_{est} transformace T_β .

Druhá fáze je prováděna na nezmenšených obrazech. Je určen konvexní obal ohraničující část, v níž se vyskytuje otisk ve vzoru **A**, a konvexní obal, ohraničující část, v níž se vyskytuje otisk v obraze **B**. Předpokládaná společná část obou otisků je určena jako průnik částí vzoru a obrazu ohraničených konvexními obaly. Tento průnik je v obraze a ve vzoru určen na základě znalosti přibližných transformačních parametrů β_{est} .



Obr. 4.3. Vytváření trojúhelníkových oblastí a hledání optimálních transformačních parametrů.

Je vytvořena (horní) trojúhelníková oblast O_A^1 ve vzoru tak, že obsahuje část oblasti použité k nalezení přibližných transformačních parametrů – bodem a_s je

vedena přímka paralelní s osou x a polopřímka kolmá na osu x , které protínají konvexní obal v bodech a_1, a_2, a_3 a určují oblast O_A^1 . Na základě znalosti přibližných transformačních parametrů β_{est} je vytvořena jí odpovídající trojúhelníková oblast O_B^1 v obraze (obr. 4.3). Obraz uvnitř trojúhelníkové oblasti O_B^1 je iterativně transformován (adaptován) vzhledem k O_A^1 tak, aby byla maximalizována vzájemná informace mezi oběma oblastmi a jsou hledány optimální transformační parametry β_{opt} , jak je uvedeno dále.

Souřadnice vrcholů trojúhelníka vymežující oblast O_A^1 a souřadnice vrcholů trojúhelníka O_B^1 jednoznačně definují 6 parametrů $\beta = \beta_1 \dots \beta_6$ určující afinní transformaci. Vzájemná informace mezi oblastmi $I = I(O_A^1, T_\beta O_B^1)$ je maximalizována tak, že poloha třech vrcholů trojúhelníka O_B^1 je měněna a všechny obrazové body uvnitř oblasti O_B^1 jsou adaptovány vzhledem k O_A^1 . Jedná se o úlohu nediferencovatelné vícerozměrné optimalizace – optimalizaci vektoru šesti souřadnic určující parametry afinní transformace. K maximalizaci funkce $I = I(O_A^1, T_{\beta^*}(O_B^1))$ byl použit Nelder-Meadův algoritmus [19].

Po adaptaci první dvojice oblastí O_A^1, O_B^1 je vytvořena a adaptována další dvojice oblastí O_A^2, O_B^2 . Tato další dvojice oblastí je adaptována jinak než první dvojice oblastí. Je využito toho, že první dvojice již byla sesouhlasena a ve vektoru souřadnic vrcholů oblasti O_B^2 , který ovlivňuje parametry afinní transformace, stačí optimalizovat již pouze souřadnice jednoho vrcholu (dolního) trojúhelníka (dvourozměrná optimalizace).

Pozn. Odchýlení výsledné polohy adaptovaných bodů od původní polohy o hodnotu přesahující danou toleranci indikuje nalezení falešného maxima a v takovém případě jsou otisky prohlášeny za nesesouhlasitelné.

Výše uvedený popis metody je zjednodušen; pro detailní popis algoritmu a podrobnosti týkající se tvorby adaptovaných vektorů odkazují na vlastní práci.

Vyšetřování chování vzájemné informace a programová realizace navržené metody byla provedena pomocí programového balíku MATLAB.

5 VÝSLEDKY PRÁCE

Metoda rozpoznávání otisků prstů z neupraveného šedotónového obrazu byla testována na 150 otiscích prstů – po 3 otiscích stejného prstu od 50 osob (tj. třech sadách, každá sada obsahovala 50 otisků). Pro test stejných otisků byl vždy otisk z první sady 50-ti otisků prstů testován se stejným otiskem v druhé a třetí sadě. Otisk byl označen za rozpoznáný, pokud byl nalezen mezi dvěma ostatními. Pro test různých otisků bylo náhodně vybráno 200 navzájem různých otisků.

Při posuzování kvality dané metody je posuzována schopnost separovat od sebe obrazy otisků prstů patřící téže osobě od otisků patřících různým osobám. Je vhodné, aby metoda měla možnost dobře nastavit práh, určující, kdy bude otisk přijat nebo zamítnut. V tomto případě jde o práh daný velikostí vzájemné informace. Jak je možné množiny stejných a různých otisků prstů od sebe separovat, se obvykle vyjadřuje grafem závislosti chybných rozpoznání různých otisků FAR (False Acceptance Rate) a chybných odmítnutí stejných otisků FRR (False Reject Rate) na daném prahu. FAR a FRR se obvykle vyjadřují v procentech.

FAR značí počet otisků od různých osob, které byly falešně rozpoznány (prohlášeny za shodné ačkoliv patřily různým osobám) vzhledem k celkovému počtu provedených testů různých otisků.

$$FAR = \frac{N_{diff_accept}}{N_{diff_total}} \cdot 100 [\%] \quad , \text{ kde} \quad (5.1)$$

N_{diff_accept} je počet falešně rozpoznáných otisků, tj. patřících různým osobám.

N_{diff_total} je celkový počet testovaných otisků patřících různým osobám.

$100\% - FAR$ je v [16] označeno jako *Recognition Rate* a znamená počet různých správně odmítnutých otisků.

FRR značí počet otisků od stejné osoby, které nebyly rozpoznány (vzhledem k celkovému počtu testovaných stejných otisků):

$$FRR = \frac{N_{same_reject}}{N_{same_total}} \cdot 100 [\%] = \frac{1 - N_{same_accept}}{N_{same_total}} \cdot 100 [\%], \text{ kde} \quad (5.2)$$

N_{same_reject} je počet falešně rozpoznáných otisků, tj. patřících stejným osobám.

N_{same_accept} je počet správně rozpoznáných otisků, tj. patřících stejným osobám.

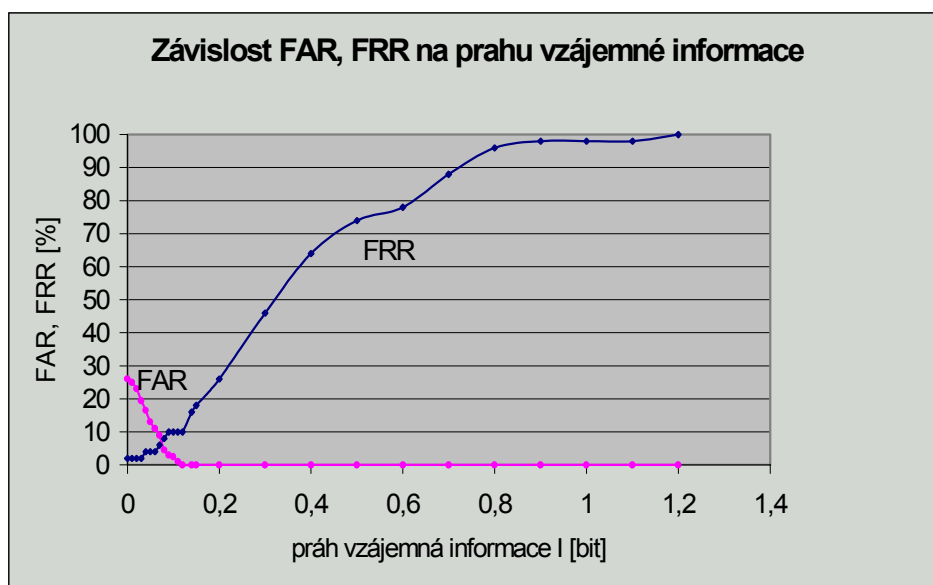
N_{same_total} je celkový počet testovaných otisků patřících vždy stejné osobě.

Přehled výsledků počtu správného rozpoznání stejných otisků prstů a výsledků počtu falešného rozpoznání různých otisků prstů v závislosti na nastaveném prahu vzájemné informace I je uveden v tabulce 5.1. Šedě je vyznačena hodnota, kdy je FAR=0, tj. od které již není falešně rozpoznán žádný otisk patřící různým osobám.

Práh vzájemné informace I [bit]	Různé otisky - nesprávně přijato FAR	Stejné otisky - nerozpoznáno Reject Rate FRR	Tj. stejné otisky - rozpoznáno
0,05	13%	4%	96%
0,08	4,5%	8%	92%
0,1	2,5%	10%	90%
0,11	1%	10%	90%
0,12	0%	10%	90%
0,14	0%	16%	84%

Tab. 5.1 Závislost počtu nesprávných rozpoznání různých otisků (FAR) a závislost počtu nerozpoznaných stejných otisků (FRR) na volbě prahu vzájemné informace I .

Následný graf ukazuje schopnost metody dobře separovat různé otisky od stejných. Při testu otisků od různých osob, kdy bylo náhodně vybráno 200 navzájem různých otisků prstů, bylo vyloučeno 148 jako nesouhlasitelných, tj. správně prohlášených za různé. U zbývajících 52 (tj. u 26% z 200) byly nalezeny nízké hodnoty falešných maxim. Proto počet falešně rozpoznávaných různých otisků začíná v grafu závislosti FAR na hodnotě 26% a nikoliv 100%.



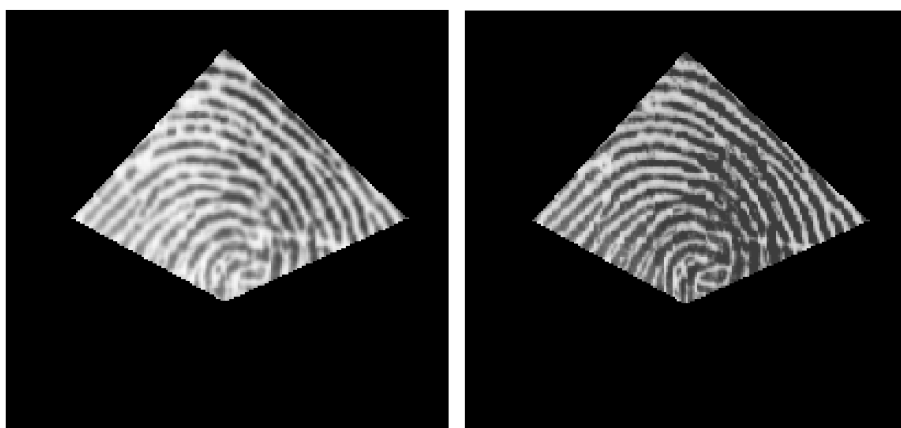
Obr. 5.2 Závislost počtu nesprávně přijatých patřících různým osobám FAR a nesprávně odmítnutých otisků (patřících stejným osobám) FRR na zvoleném prahu I .

Mezi výhody této metody patří také schopnost obrazy nejen rozpoznat, ale i sesouhlasit nijak neupravené šedotónové obrazy. Tuto schopnost ukazuje obr. 5.3. Obrazy jsou vzájemně posunuty i natočeny. Obrazy mají i zřetelně odlišnou střední úroveň jasu. Z papilárních linií je vidět, že síla přítlaku byla také různá. Spodní dvojice obrázků ukazuje sesouhlasené oblasti po 50-ti iteracích.



Obraz

Vzor



Obr. 5.3 Výsledek sesouhlasení dvou oblastí po 50-ti iteracích.

6 ZÁVĚR

Přínosem této práce je nová metoda pro rozpoznávání otisků založená na postupné adaptaci oblastí na základě výpočtu vzájemné informace mezi těmito oblastmi.

Metoda byla testována na sadě 150 obrazů otisků a vykazuje lepší výsledky než výsledky Hongovy metody publikované v [16], kde byl test prováděn na 180-ti otiscích (po 10-ti otiscích od 18 osob). Pro srovnání uvádím výsledky mnou navržené metody a výsledky metody publikované v [16].

Pozn. V [16] je počet různých otisků, které byly správně odmítnuty, označen jako Recognition Rate, (což značí $100\% - FAR$) a počet stejných otisků, které nebyly rozpoznány jako Reject Rate (FRR). V následujících tabulkách je proto užitá stejná terminologie. Šedě jsou označeny hodnoty, od kterých nastává stoprocentní odmítnutí různých otisků (nežádoucí osoby).

Práh vzájemné informace I [bit]	Různé otisky - správně odmítnuto (Recognition Rate tj. $100\% - FAR$)	Stejné otisky - nerozpoznáno Reject Rate FRR	Tj. stejné otisky - rozpoznáno
0,1	97,5%	10%	90%
0,11	99,0%	10%	90%
0,12	100%	10%	90%
0,14	100%	16%	84%

Tab. 6.1 Výsledky testu mnou navržené metody rozpoznávání otisků prstů z neupraveného šedotónového obrazu.

Prahová hodnota M_{pq}	Různé otisky - správně odmítnuto (Recognition Rate tj. $100\% - FAR$)	Stejné otisky - nerozpoznáno Reject Rate FRR	Tj. stejné otisky - rozpoznáno
20	99,8%	11,2%	88,8%
24	99,9%	16,5%	83,5%
28	99,9%	25,2%	74,8%
32	100%	27,7%	72,3%

Tab. 6.2 Výsledky Hongovy metody [16].

Z uvedených výsledků je vidět, že mnou navržená metoda rozpozná 90 % stejných otisků prstů při prahu odpovídajícímu 100 % odmítnutí různých otisků. V Hongově metodě je při tomto prahu rozpoznáno pouze 72,3 % stejných otisků, viz tabulka 6.2.

Výhodou je dobrá separovatelnost tříd otisků náležejících stejné osobě a otisků náležejících různým osobám, viz graf na obrázku 5.2. Metoda přirozeně umožňuje volbou prahu vzájemné informace ovlivnit, zda půjde o tzv. „vysoce bezpečný systém“ nebo zda se naopak „povolí přístup“.

Výhodou navržené metody je také schopnost rozpoznávat otisky prstů přímo z nijak neupraveného šedotónového obrazu, tedy bez nutnosti jakéhokoli předzpracování obrazu. Protože metoda je schopna sesouhlasit a rozpoznat obrazy otisků prstů bez předchozí filtrace, segmentace a ztenčení, nevznikají zde chyby způsobené metodami předzpracování, viz např. [16], [12]. Nutnost kompenzace odchýlení polohy markantu, které vzniká vlivem šumu při ztenčování, tak odpadá.

Výhodou navržené metody je nejen schopnost rozpoznat daný obraz, ale zároveň možnost vrátit adaptovaný sesouhlasený obraz, který může být předmětem další analýzy.

Otisky prstů jsou vlivem elasticity kůže deformovány. Metoda pro sesouhlasování obrazů otisků prstů, kterou jsem navrhl, tyto deformace velmi dobře kompenzuje (obr. 5.1).

Metoda se neomezuje pouze na obrazy otisků prstů, ale je aplikovatelná i na jiné typy obrazů. Speciálně u obrazů, které by vykazovaly hladké monotónní závislosti vzájemné informace na některé geometrické transformaci, by bylo možné již v první fázi sesouhlasování použít gradientních metod pro hledání maxima a tím proces sesouhlasení urychlit.

Ve studované literatuře jsem z alternativních (ne klasických) přístupů k rozpoznávání otisků prstů našel např. metodu rozpoznávání pomocí fraktálů [20], kde autorka sama přiznává, že rozpoznávání pouze pomocí fraktálů by nebylo dostatečné.

Ve studované literatuře jsem nenašel metody, ve kterých by autoři rozpoznávali otisky prstů pomocí vzájemné informace. V tom vidím také přínos této práce.

7 ABSTRACT

Fingerprint image recognition is often based on an extraction of characteristic features (called minutiae) from pre-processed images. Pre-processing of the fingerprint images usually includes filtration, segmentation, smoothing, thinning and the extraction of characteristic features. Extracted characteristic features are subsequently compared. Unfortunately pre-processing introduces errors – false minutiae can appear, the minutiae are shifted off the expected position, etc. These errors influence the efficiency of the subsequent recognition. Different methods are suggested to perform better pre-processing [17], [13], [22] or to compensate the errors [16]. A question is whether two fingerprint images can be recognized without pre-processing. The recognition of fingerprint images by means of fractal analysis [20] or Fourier spectra [24] were not very successful.

The presented method uses mutual information to find the best alignment of two fingerprint images and to decide whether the two images belong to the same finger.

Assume to have two fingerprint images, a template A and an image B. Fingerprint images are usually rotated, shifted and also distorted due to an elasticity of a skin. In the method proposed here, the images are geometrically transformed and a distortion is compensated with a sub-pixel precision. The images A and B are divided into triangles and the image inside each triangle is transformed so that the mutual information between the two corresponding triangles is maximized. Properties of affine transformations are used to achieve the best geometrical alignment of the image inside each triangle.

Images are characterized by the gray level intensity content of the images. Let $i = \{1, \dots, N_L\}$ represent the gray level intensity in the image A and $j = \{1, \dots, N_L\}$ the gray level intensity in the image B, where N_L is the maximal number of gray levels.

Let $O_A \subset A$ and $O_B \subset B$ be compared areas from images A, B. The relative frequencies of intensity levels i, j in the areas $O_A \subset A$ and $O_B \subset B$ are defined:

$p_i(O_A)$ is the relative frequency of the intensity level i in the explored area O_A of image A, e.g. the number of times that the i -th intensity of the gray level appears in the explored area O_A divided by the total number of pixels in the area O_A .

$q_j(O_B)$ is the relative frequency of the intensity level j in the explored area O_B of the image B.

$r_{i,j}(O_A, O_B)$ is defined as the relative frequency of the couples (i,j) , where the pixel with intensity i is found on the position x,y in O_A and the pixel with the intensity j is found on the same position x,y in O_B when searching through all x,y positions in O_A and O_B . $r_{i,j}(O_A, O_B)$ is called the joint distribution between O_A and O_B .

The above relative frequencies are used to calculate the mutual information. The mutual information is defined [15] in the terms of entropy as

$$I = h(O_A) + h(O_B) - h(O_A, O_B), \quad (7.1)$$

where

$$h(O_A) = - \sum_{i=1}^{Maxlevel} p_i(O_A) \log_2 p_i(O_A) \text{ is the entropy in the explored area } O_A \subset A,$$

$$h(O_B) = - \sum_{j=1}^{Maxlevel} q_j(O_B) \log_2 q_j(O_B) \text{ is the entropy in the explored area } O_B \subset B,$$

$$h(O_A, O_B) = - \sum_{i=1}^{Maxlevel} \sum_{j=1}^{Maxlevel} r_{i,j}(O_A, O_B) \log_2 r_{i,j}(O_A, O_B) \text{ is the joint entropy.}$$

Let T_β be a geometric transformation from A do B, and β be a vector of the transformation parameters. The area O_A is transformed to $O_B = T_\beta(O_A)$ and the mutual information $I = I(O_A, O_B)$ is then given by the relation $I = I(O_A, T_\beta(O_A))$. The aim is to find the optimal transformation parameters β for those the mutual information between two transformed parts of A and B is maximal i.e. $\beta_{opt} = \arg \max_{\beta} I(\beta)$.

7.1 The Method

The behavior of mutual information in fingerprint images was investigated and the alignment was divided into two stages.

First, an approximate alignment position is found between the template image A and the image B. To found the approximate position and the estimate of the transformation parameters sub-sampled images are used. The position is supposed to be near of the position where the maximum of the mutual information is expected.

Then three points a_1, a_2, a_3 define one triangle area in A (see figure 4.3) and the estimated transformation parameters are used to calculate three corresponding points b_1, b_2, b_3 that define the triangle area in B. The affine transformation is uniquely defined by three points from A and three points from B. The image inside the triangle in B is adapted iteratively towards the image inside the triangle in the

template A, so that the mutual information between the two triangle areas is maximized. The three points in B are used to control parameters of the affine transformation between A and B and the function $I = I(O_A, T_B(O_A))$ of six parameters is maximized to achieve the best geometrical alignment of the images inside the triangles. The Neelder-Mead algorithm [19] was used to solve this six-dimensional optimization. After adapting the first triangle area the second triangle area is generated and adapted.

7.2 Results

The tests were done on 150 images (3 images from the 50 people). The results of the presented method are better than the results of Hong's method published in [16] where the test was done on 180 fingerprints (10 fingerprint per finger from 18 individuals). The results are shown in the following tables. Recognition Rate is the number of different images that were correctly rejected. Reject Rate is the number of the same images that were not recognized. The value of the threshold when 100 % of different images are rejected is marked gray.

Threshold of Mutual information I [bit]	Recognition Rate (different correctly rejected)	Reject Rate (Same not recognized)	e.g. same recognized
0,1	97,5%	10%	90%
0,11	99,0%	10%	90%
0,12	100%	10%	90%
0,14	100%	16%	84%

Tab. 7.1 Results of the proposed recognition method

Threshold value M_{pq}	Recognition Rate (different correctly rejected)	Reject Rate (Same not recognized)	e.g. same recognized
20	99,8%	11,2%	88,8%
24	99,9%	16,5%	83,5%
28	99,9%	25,2%	74,8%
32	100%	27,7%	72,3%

Tab. 6.2 Results of Hong's method [16].

M_{pq} is the number of corresponding minutiae in images A,B divided by the maximum of minutiae found in images A,B.

7.3 Conclusions

A new approach of fingerprint image recognition by means of mutual information has been presented.

It can be seen that the achieved results are better than those achieved by Hong and published in [16]. In the presented method 90 % of the same fingerprint images were recognized at the threshold when 100 % of different images were rejected, while in Hong's method only 72,3 % when 100 % of different images were rejected.

The advantage of the presented method is the ability to align and to recognize two fingerprint images from grayscale images directly. No pre-processing is needed. There is, therefore, no need to compensate errors as it is in [16].

The method is able not only to decide whether two images belong to the same finger, but also to return adapted and aligned images. Such images can be consequently analyzed. Another advantage is that the method is general and it can be applied to other types of images, not only to fingerprint images.

LITERATURA

- [1] Batůšek, R., Dobeš, M. Object Oriented Design in the Image Filtration, *Proceedings of 12. Spring Conference on Computer Graphics*. Comenius University, Bratislava, Slovakia, 1996, p.15. ISBN 80-223-1032-8.
- [2] Boček, L., Kočandrlé M., *Geometrie I*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 1980
- [3] Darbellay, G.A., "Predictability: an Information-Theoretic Perspective." In: Prochazka, A., Uhlir, J., Rayner, P.J.W., and Kingsbury N.G. (Eds), *Signal Analysis and Prediction*, pp. 249-262, Birkhauser, Boston, 1998.
- [4] Darbellay, G.A., Vajda, I., "Estimation of the Information by an Addaptive Partitioning of the Observation Space," *IEEE Trans. Information Theory*. 1999, Vol. 45, no. 4, pp.1315-1321.
- [5] Dobeš, M. Pre-processing of the Fingerprint Image. In *The Fourth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization 96*. WSCG'96, Plzeň, 1996, pp. 65-70. ISBN 80-7082-238-4.
- [6] Dobeš, M. Comparison of Different Thinning Algorithms for a Fingerprint Image. In *Sborník prací studentů a doktorandů*. Brno: VUT, 1996, pp. 59-61.
- [7] Dobeš, M., Batůšek, R. Software pro zpracování obrazu. In *Pedagogický software '97, sborník přednášek a programů*, České Budějovice, 1997, pp. 9-10. ISBN 80-85645-26-2.
- [8] Dobeš, M., Snášel, V. Využití signatur pro realizaci databáze otisků prstů. In *Informační systémy a jejich aplikace*. Brno: FAST VUT, Ruprechtov, 1997, pp. 15-23. ISBN 80-214-0894-4.
- [9] Dobeš, M., Zbořil, F. Přístupový systém založený na otiscích prstů. In *Informační systémy a jejich aplikace*. Brno: FAST VUT, Ruprechtov, 1998, pp. 36-41. ISBN 80-214-1205-4.
- [10] Dobeš, M. Modeling Transformation in Matlab. In *Proceedings on ASIS'98 International Conference*. Krnov: MARQ, 1998, pp. 51-56. ISBN 80-85988-26-7.
- [11] Gamble, F. T., Frye, L. M., Grieser, D. R., Real-time Fingerprint Verification System. *Applied Optics*. 1992, Vol. 31, No. 5.
- [12] Hong L. Automatic Personal Identification using Fingerprints. *PhD Thesis*. Michigan State University, East Lansing, 1998. 227 p.
- [13] Hung, D. C. D. Enhancement and Feature Purification of Fingerprint Images. *Pattern Recognition*. 1993, Vol. 26, No. 11, pp. 1661-1671.
- [14] Igaki, S., Eguchi, S., Yamagishi, F., Ikeda, H., and Inagaki, T., Real-Time Fingerprint Sensor Using a Hologram. *Applied Optics*. 1992, Vol. 31, No. 11, pp. 1794-1802.

- [15] Jaglom, A. M., Jaglom, I. M. *Pravděpodobnost a informace*. Nakladatelství ČSAV, Praha 1964.
- [16] Jain A., Hong L. On-Line Fingerprint Verification. In *IEEE Proceedings of ICPR'96*. IEEE 1996, 1015-4651/96, pp. 596-600.
- [17] Krile, T. F., Walkup, J. F. Enhancement of Fingerprints Using Digital and Optical Techniques. In Kasturi, R., Trivedi, M. M. *Image Analysis Applications*. Marcel Decker Inc., 1990.
- [18] Mehtre, B. M. Fingerprint Image Analysis for Automatic Identification. *Machine Vision and Applications*. Springer Verlag, 1993, Vol. 6, pp. 124-139.
- [19] Nelder, J. A., Mead, R. A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal*, 1965, Vol. 7, No. 4, pp. 308-313.
- [20] Polikarpova, N. On the Fractal Features in Fingerprint Analysis. In *IEEE Proceedings of ICPR'96*. 1996, 61015-4651/96, pp. 591-595.
- [21] Ratha, N. K., Karu, K., Chen, S., Jain, A. K. A Real-Time Matching System for Large Fingerprint Databases. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1996, Vol. 18, No. 8, pp. 799-813.
- [22] Ratha N. K. Computer Vision Algorithms on Reconfigurable Logic Arrays. *PhD Thesis*. Michigan State University, East Lansing, 1996. 164 p.
- [23] Ratha, N.K., Chen, S.Y., Jain, A.K., Adaptive Flow OrientationBased Feature-Extraction in Fingerprint Images, *Pattern Recognition* 1995, Vol. 28, No. 11, pp. 1657-1672.
- [24] Soifer, V.A., Kotlyar, V.V., Khonina, S.N., Skidanov R.V. Fingerprint Identification Using the Directions Fields. In *IEEE Proceedings of ICPR'96*. 1996, 61015-4651/96, pp. 586-590.
- [25] Vernon, D. *Machine Vision, Automated Visual Inspection and Robot Vision*. Prentice Hall International (UK) Ltd., 1991.
- [26] Wahab A., Chin, S.H. and Tan, E.C., Novel approach to automated fingerprint recognition. *IEEE Proceedings of VISIP98*. 1998, Vol. 145, No. 3, pp.160-167.
- [27] Xiao, Q., Raafat, H. Fingerprint Image Postprocessing: A Combined Statistical and Structural Approach. *Pattern Recognition*. 1991, Vol. 24, No. 10, pp. 985-992.

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Michal DOBEŠ
Titul: Ing.
Narozen: 3. dubna 1963 v Olomouci
Bydliště: Werichova 23, 779 00 Olomouc
Státní občanství: občan České Republiky

Vzdělání

Střední průmyslová škola elektrotechnická, Olomouc 1982
České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Praha 1987

Základní školu jsem absolvoval v Olomouci. V roce 1982 jsem maturoval s vyznamenáním na Střední průmyslové škole elektrotechnické v Olomouci. V roce 1982 jsem začal studovat na Elektrotechnické fakultě Českého vysokého učení technického v Praze. V roce 1985 jsem absolvoval dvouměsíční stáž u firmy Hispano Olivetti v Barceloně ve Španělsku. Studium na ČVUT jsem ukončil v roce 1987 s vyznamenáním. Základní vojenskou službu jsem vykonával v letech 1987 – 1988. V letech 1987 – 1990 jsem pracoval jako vývojový pracovník v podniku Tesla Hloubětín v Praze.

Od roku 1991 pracuji na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci. Zde působím jako odborný asistent na katedře matematické analýzy a aplikací matematiky, kde přednáším objektově orientované programování, základy operačních systémů a sítí a základy databázových systémů. Dříve jsem vedl cvičení z formálních jazyků a gramatik. V roce 1993 jsem zahájil doktorandské studium na Fakultě elektrotechniky a informatiky Vysokého učení technického v Brně. V roce 1996 jsem úspěšně složil rigorózní zkoušku.

Znalost jazyků:

angličtina – dobře (Státní zkouška v roce 1991, TOEFL test 580 bodů),
francouzština, španělština, ruština – pasivně.

Vědeckovýzkumná a odborná činnost:

Po nástupu na PřF UP Olomouc jsem se ve své odborné činnosti orientoval zejména na zpracování a rozpoznávání obrazu, počítačový hardware, operační systémy a sítě. Mezi mé další aktivity na katedře patří také správa sítě pod operačním systémem Windows NT.

V roce 1993 jsem se zúčastnil projektu Tempus JEP 1191-92/93 jako student. Jsem řešitelem doktorandského grantu „Rozpoznávání otisků prstů“ FEI VUT Brno v r.1994/95.

Aktivní účast na mezinárodních vědeckých konferencích:

1996 - Winter School of Computer Graphics and Visualization,

1996 – Spring Conference on Computer Graphics,

1998 – Advanced Simulation of Systems,

dále aktivní účast na konferencích:

Informační systémy a jejich aplikace v r. 1997 a 1998,

Pedagogický software v r. 1997 a 1998,

Olomoucké dny aplikované matematiky 1998.

Jsem autorem nebo spoluautorem celkem devíti publikací na vědeckých konferencích, z toho šesti mezinárodních.

V Olomouci 20. června 2000

CURRICULUM VITAE

Name: Michal DOBEŠ,
Title: Ing.
Born: April 3th, 1963 in Olomouc, Czech Republic
Address: Werichova 23, 779 00 Olomouc
Nationality: Czech

Education:

Electrotechnical Highschool, Olomouc 1982.

Faculty of Electrical Engineering of the Czech Technical University (CVUT), Prague.

From 1978 to 1982 I studied at the Electrotechnical Highschool in Olomouc. I passed the examinations with honours. From 1982 to 1987 I studied at the Faculty of the Electrical Engineering of the Czech Technical University (CVUT) in Prague - branch Radioengineering. During my studies I have got a practical experience at the company Hispano Olivetti in Barcelona, Spain, for two months (June and July 1985). I graduated with honors from the CVUT in 1987. From 1987 to 1990 I worked in the research of TV transmitter and satellite communication technologies at the factory Tesla Hloubětín in Prague.

Since 1991 I am employed as an assistant professor at the Faculty of Sciences of the Palacký University Olomouc at the Department of Applied Mathematics. Formerly I taught the courses of Formal Grammars and Languages. Now I teach courses of Object Oriented Programming, basics of Operating Systems and Networks and basics of Database Systems. I am interested in the image processing. I have a practical knowledge of the computer hardware, operating systems and computer networks and I am the Windows NT network administrator at our department.

Since 1993 I study PhD at the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science of the Technical University (VUT) of Brno as a part time student. I passed the state rigorous examination in 1996.

Knowledge of languages:

English - good (State Examination in English in 1991, TOEFL score 580)

French, Spanish, Russian – average.

Scientific activities.

I am interested in the image processing, computer hardware, operating systems and networks. I am a Windows NT network administrator at our department.

I participated in the Tempus project JEP 1191-92/93 as a student in 1993.

I am a holder of the VUT doctoral grant in 1994/95.

I presented my papers on several international conferences:

1996 - Winter School of Computer Graphics and Visualization,

1996 – Spring Conference on Computer Graphics,

1998 – Advanced Simulation of Systems

further at conferences:

Information Systems and the Applications in 1997 and 1998,

Pedagogical Software in 1997 and 1998,

The Days of Applied Mathematics in Olomouc, 1998.

I am the author of nine publications at the conferences, six of them were international ones.

Olomouc, June 20, 2000