

UJEMANJE PRSTNIH ODTISOV NA PODLAGI GREBENOV

Jaka Pohar, Jernej Bule, Peter Peer

**Laboratorij za računalniški vid, Fakulteta za računalništvo in informatiko,
Univerza v Ljubljani, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: jakapohar@gmail.com, {jernej.bule, peter.peer}@fri.uni.lj.si**

POVZETEK: *V tem delu je predstavljena nadgradnja sistema za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa FingerIdent, ki v obstoječi obliki uporablja primerjanje na podlagi značilk. Z namenom izboljšanja varnosti sistema smo implementirali še algoritem za primerjanje na podlagi grebenov in ga integrirali v obstoječ sistem. Nadgrajen sistem smo preizkusili na štirih testnih množicah s tekmovanja FVC 2002. Rezultati kažejo, da je nadgrajen sistem, v katerem se končni rezultat ujemanja oblikuje kot utežena vsota stopnje ujemanja obstoječega primerjanja značilk in implementiranega primerjanja grebenov, zanesljivejši od sistema pred nadgradnjo.*

1 UVOD

Sistemi za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa običajno temeljijo na treh glavnih korakih: zajem prstnega odtisa, iskanje značilk in odločanje [4]. Kot zadnji korak v sistemu se izvede primerjanje prstnih odtisov. Algoritem primerja dva prstna odtisa in vrne rezultat, ki je v obliki stopnje ujemanja (angl. matching score). Obstajajo tri različne metode primerjanja: korelacijska metoda, primerjanje na podlagi značilk in metoda primerjanja grebenov [6].

Korelacijska metoda (angl. correlation-based matching) deluje tako, da sliki dveh prstnih odtisov položi eno na drugo, nato pa se za različne poravnave (npr. translacije in rotacije) izračuna korelacija med ustreznimi slikovnimi elementi.

Primerjanje na podlagi značilk (angl. minutiae based matching) deluje tako, da se najprej poišče značilke dveh prstnih odtisov in se jih shrani kot množici točk v dvodimenzionalnem prostoru. Nato se množici točk poravnava tako, da je število ujemanj značilk največje.

Metoda primerjanja grebenov (angl. ridge feature-based matching) deluje tako, da primerja prstna odtisa na podlagi značilnosti, pridobljenih iz vzorca grebenov (npr. lokalna orientacija in frekvenca, oblika grebenov). Tovrstne značilnosti so v splošnem manj razločujoče, vendar pa jih je možno iz slik prstnih odtisov, ki so slabe kvalitete, lažje in bolj zanesljivo izluščiti kot značilke.

Z namenom doseganja večje zanesljivosti sistemov je smiselna tudi hkratna uporaba več različnih načinov primerjanja [1].

Sistem FingerIdent je sistem za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa, ki je bil razvit v Laboratoriju za računalniški vid na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani [4]. Sistem smo nadgradili tako, da smo vanj integrirali algoritem za primerjanje na podlagi grebenov, ki se skupaj z obstoječim algoritmom za primerjanje na podlagi značilk uporablja pri ugotavljanju ujemanja dveh prstnih odtisov.

2 ALGORITEM ZA PRIMERJANJE GREBENOV

Predstavljen algoritem primerjanja je modificirana verzija algoritma opisanega v [3]. Največ podobnosti ima z metodami primerjanja grebenov, saj temelji na uporabi grebenov, vendar hkrati skuša združiti prednosti vseh treh različnih metod primerjanja. Tako kot korelacijske metode ohrani večino informacije v prstnih odtisih, je razločujoč in fleksibilen kot primerjanje na podlagi značilk in odporen protu šumu, kot metode primerjanja grebenov.

Algoritem za primerjanje grebenov ugotavlja kakšna je podobnost med grebeni dveh prstnih odtisov. Greben pomeni strukturo, ki povezuje dve značilki. Algoritem najprej poišče par grebenov, ki si je najbolj podoben. Ta par uporabi kot bazni par in primerja grebene, ki so sosednji baznemu paru. Vsakega izmed parov ujemajočih se grebenov uporabi kot nov bazni par in primerja grebene, ki so mu sosednji. Postopek se rekurzivno nadaljuje dokler ne uporabimo vseh parov, ki se ujemajo. Na koncu se izračuna stopnja ujemanja, ki odraža dolžino grebenov, ki se ujemajo. Možno je, da prvi bazni par ni pravi, zato se postopek ponovi večkrat, vsakič z drugim baznim parom. Za končno stopnjo ujemanja se uporabi maksimalno ujemanje.

2.1 Predstavitev grebenov in strukturiranje podatkov

Algoritem kot vhod sprejme dva prstna odtisa, pri čemer je vsak predstavljen kot:

$$\begin{aligned} F &= \{R_1, R_2, \dots, R_n\} \\ R_i &= \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im}\} \\ P_{ij} &= (x_{ij}, y_{ij}) \end{aligned} \tag{1}$$

F pomeni prstni odtis oz. seznam vseh grebenov tega prstnega odtisa, R_i posamezen greben oz. seznam vseh vzorčenih točk na tem grebenu, P_{ij} pa posamezno točko s koordinatama x_{ij} in y_{ij} .

Koordinate točk na grebenih pridobimo iz skeleta prstnega odtisa, ki je vmesni rezultat obdelave prstnega odtisa v sistemu FingerIdent. V fazi primerjanja bi bilo nepotrebno in časovno potratno primerjati vse točke na grebenih, zato jih pred zapisom v seznam enakomerno vzorčimo.

Za nekatere operacije, ki jih algoritem izvaja, seznamski predstavitev prstnega odtisa ni primerna. Zato povsem na začetku za vsak prstni odtis ustvarimo še matrično predstavitev prstnega odtisa. Matrično predstavitev si lahko predstavljamo kot sliko prstnega odtisa, na kateri je ozadje predstavljeno z vrednostjo 0, grebeni pa z vrednostmi večjimi od 0. Točke, ki pripadajo istemu grebenu, so označene z isto vrednostjo. Vrednost je določena z indeksom grebena v seznamski predstavitvi prstnega odtisa.

2.2 Primerjanje para poravnanih grebenov

Algoritem primerja poravnana grebena $R_1 = \{A_i\}_{i=1}^m$ in $R_2 = \{B_j\}_{j=1}^n$. Najprej primerjamo vsako točko A_i z vsako točko B_j . Poljubni A_i in B_j se ujemata, če je evklidska razdalja med njima manjša ali enaka od praga ed_th (ed_th smo empirično nastavili na 5). Ujemanje točk predstavimo z dvodimenzionalno matriko $T(i, j)$, pri čemer $i = 1, \dots, m$ in $j = 1, \dots, n$. $T(i, j) = 1$ pomeni, da se točki A_i in B_j ujemata, $T(i, j) = 0$ pomeni, da ujemanja ni.

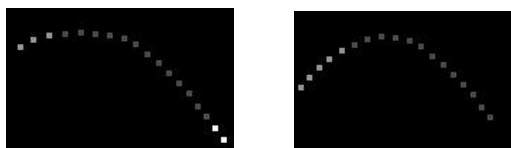
V T nato poiščemo najdaljši povezan seznam ujemajočih se točk (angl. longest point string), ki ga predstavljajo pari $\{(p_l, q_l)\}_{l=1}^k$, pri čemer sta p_l in q_l indeksa v R_1 oz. R_2 . Pari (p_l, q_l) morajo zadostiti naslednjim pogojem:

- $T(p_l, q_l) = 1$
- p_l in q_l monotonno naraščata oz. padata
- $|p_l - p_{l-1}| \leq 2, |q_l - q_{l-1}| \leq 2$, pri čemer $l = 2, \dots, k$

Za iskanje seznama smo uporabili podoben postopek opisanemu v [2]. Če najdaljši povezan seznam ujemajočih se točk vsebuje vsaj k_th parov točk, se ujemanje teh točk zabeleži (k_th smo empirično nastavili na 3).

Rezultat primerjanja dveh poravnanih grebenov je lahko neujemanje, ujemanje ali delno ujemanje. V primeru, da se dva grebena le delno ujemata, njune dele, ki se ne ujemajo in vsebujejo vsaj k_th točk, na sprednjem in/ali zadnjem koncu grebenov odcepimo. Tako omogočimo, da kot novi grebeni ostanejo na voljo za kasnejšo primerjavo.

Primerjanje poravnanih grebenov R_1 in R_2 je predstavljeno na sliki 1. Temno sive točke se ujemajo, bele točke se ne ujemajo, skupini svetlo sivih točk pa se prav tako ne ujemata in jih odcepimo ter predstavimo kot nova grebena.



Slika 1: Primerjanje poravnanih grebenov

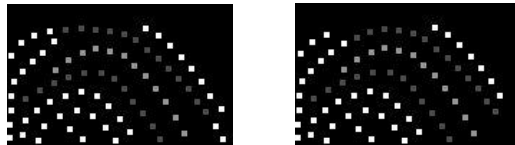
2.3 Iskanje začetnega baznega para grebenov

V tem koraku pripravimo seznam potencialnih začetnih baznih parov grebenov $I = \{(R_{1i}, R_{2i}) | R_{1i} \in F_1, R_{2i} \in F_2\}$ za prstna odtisa F_1 in F_2 . Začetne bazne pare naj bi sestavljali grebeni, ki se najbolje ujemajo, saj z njimi začnemo postopek primerjave prstnih odtisov. Pare poiščemo tako, da vsak R_{1i} primerjamo z vsakim R_{2i} . Najprej izračunamo transformacijo med R_{1i} in R_{2i} , ju poravnamo in izračunamo stopnjo ujemanja s po naslednji formuli:

$$s = \frac{m^2}{size} \quad (2)$$

m pomeni število ujemajočih se točk in *size* dolžino grebenov R_{1i} in R_{2j} . S kvadriranjem m dosežemo, da se pri uvrščanju (R_{1i}, R_{2i}) v I ne upošteva samo proporcionalno ujemanje grebenov, ampak tudi dejansko število ujemajočih se točk. V primeru, da transformacija med grebenoma presega 45%, para ne uvrstimo v I . Stopnji s za par (R_{1i}, R_{2i}) prištejemo še stopnji ujemanja dveh sosednjih parov grebenov, ki jih poravnamo glede na transformacijo med R_{1i} in R_{2i} . Z omenjenimi pravili poskušamo zagotoviti, da se na začetek seznama I uvrstijo pari grebenov, ki se dejansko ujemajo.

Na sliki 2 je prikazano računanje ujemanja za potencialni začetni bazni par. Svetlo sive točke predstavljajo ujemanje grebenov R_{1i} in R_{2i} , temno sive pa ujemanje sosednjih grebenov.



Slika 2: Računanje ujemanja za potencialni začetni bazni par

2.4 Primerjanje vseh grebenov

Ob podanem začetnem baznem paru grebenov, lahko izračunamo transformacijo med grebenoma tega para, poiščemo sosednje grebene, jih poravnamo in primerjamo. Vsak par ujemajočih se grebenov uporabimo kot nov bazni par in ponovimo računanje transformacije, iskanje, poravnavanje in primerjanje sosednjih grebenov za ta par. Postopek smo implementirali kot rekurzivno metodo, ki kot vhod sprejme ujemajoča se grebena R_1 in R_2 in ju uporabi kot bazni par. Ob prvem klicu metode kot bazni par uporabimo enega od potencialnih začetnih baznih parov grebenov.

2.4.1 Računanje transformacije

Pri računanju transformacije (translacija in rotacija) med dvema grebenoma $R_1 = \{(x_{11}, y_{11}), (x_{12}, y_{12}), \dots, (x_{1n}, y_{1n})\}$ in $R_2 = \{(x_{21}, y_{21}), (x_{22}, y_{22}), \dots, (x_{2n}, y_{2n})\}$ smo uporabili podoben postopek kot je opisan v [7]. Za grebena R_1 in R_2 , ki sta enake dolžine, v idealni situaciji velja:

$$\begin{bmatrix} \cos(\Delta\alpha) & -\sin(\Delta\alpha) \\ \sin(\Delta\alpha) & \cos(\Delta\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{2i} \\ y_{2i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1i} \\ y_{1i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

α je kot rotacije in $[\Delta x \ \Delta y]^T$ translacija. Translacijo izračunamo po naslednji formuli:

$$[\Delta x \ \Delta y]^T = [x_{11} - x_{21} \ y_{11} - y_{21}]^T \quad (4)$$

Nadaljujemo z računanjem rotacije, pri čemer želimo translacijo izločiti. Od vsakega (x_{1n}, y_{1n}) odštejemo (x_{11}, y_{11}) , podobno naredimo za (x_{2n}, y_{2n}) . Spremenljivkama a_1 in a_2 pripišemo vrednosti $a_1 = \cos(\Delta\alpha)$ in $a_2 = \sin(\Delta\alpha)$. Enačba (3) se poenostavi v:

$$\begin{bmatrix} x'_{2i} & -y'_{2i} \\ y'_{2i} & x'_{2i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{1i} \\ y'_{1i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Za izračun kota orientacije α izvedemo (5) nad vsemi vzorčenimi točkami. Rešitev metode najmanjših kvadratov za parameter $a = [a_1 \ a_2]^T$ lahko določimo z reševanjem naslednje enačbe:

$$a = [A^T A]^{-1} A^T b \quad (6)$$

kjer
$$A^T = \begin{bmatrix} x'_{21} & y'_{21} & \cdots & x'_{2n} & y'_{2n} \\ -y'_{21} & x'_{21} & \cdots & -y'_{2n} & x'_{2n} \end{bmatrix}$$

in
$$b^T = [x'_{11} \ y'_{11} \ \cdots \ x'_{1n} \ y'_{1n}]$$

Kot rotacije α ocenimo iz (6) po naslednji enačbi:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{a_2}{a_1}\right) \quad (7)$$

2.4.2 Poravnavanje grebenov

Grebena R_1 in R_2 poravnamo tako, da premaknemo R_2 glede na dano translacijo $[\Delta x \ \Delta y]^T$, kot rotacije α in bazno točko ($base_x, base_y$). Bazna točka predstavlja točko okoli katere zavrtimo greben. Določimo jo kot prvo točko grebena trenutnega baznega para.

Za premikanje grebena R_2 izvedemo naslednje enačbe za vsako točko R_2 :

$$x_i = x_{2i} - base_x \quad (8)$$

$$y_i = y_{2i} - base_y \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x'_{2i} \\ y'_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & -y_i \\ y_i & x_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\Delta\alpha) \\ \sin(\Delta\alpha) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x + base_x \\ \Delta y + base_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.4.3 Iskanje sosednjega grebena

Pri iskanju sosednjega grebena želimo najti greben, ki se nahaja poleg grebena R . Za to potrebujemo dve poljubni sosednji točki $P_1 = (x_1, y_1)$ in $P_2 = (x_2, y_2)$, ki se nahajata na grebenu R , in matrično predstavitev prstnega odtisa M . Iskanje sosednjega grebena poteka tako, da pregledujemo celice matrike M . Če $|x_2 - x_1| \geq |y_2 - y_1|$ pregledamo celice v vertikalni liniji med P_1 in P_2 , sicer celice v horizontalni liniji. Če naletimo na celico, ki vsebuje vrednost večjo od 0, pomeni, da smo našli sosednji greben. Vrednost celice predstavlja indeks grebena v seznamski predstavitvi prstnega odtisa.

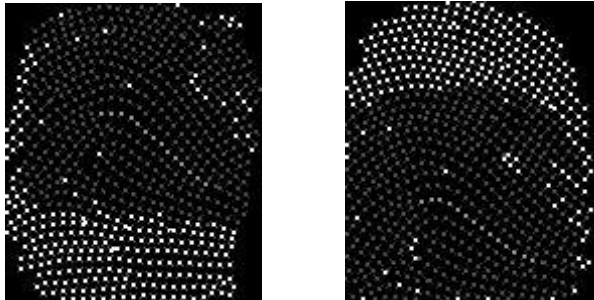
2.5 Računanje stopnje ujemanja

Pri računanju stopnje ujemanja dveh prstnih odtisov upoštevamo le območje, kjer se prstna odtisa prekrivata. Prekrivno območje (angl. overlapped region) obeh prstnih odtisov izračunamo kot presek območij posameznih prstnih odtisov, ki sta poravnana glede na transformacijo izračunano za začetni bazni par grebenov. Stopnjo ujemanja izračunamo po naslednji formuli:

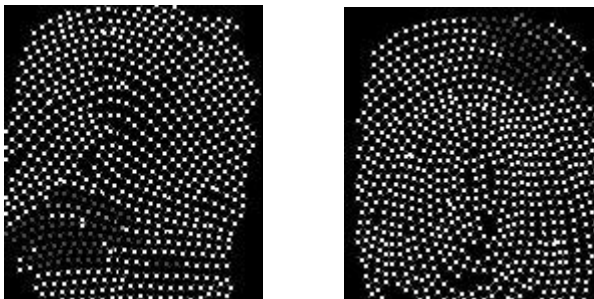
$$score_i = \frac{N_{im}^2}{N_{i1} \cdot N_{i2}} \quad (11)$$

N_{i1} in N_{i2} sta števili vzorčenih točk na grebenih dveh prstnih odtisov na prekrivnem območju, N_{im} pa je število vseh vzorčenih točk, ki se ujemanjo. Postopek računanja stopnje ujemanja in s tem tudi postopek primerjanja vseh grebenov, ponovimo za n najboljših potencialnih začetnih baznih parov grebenov, pri čemer $score_i$ predstavlja stopnjo ujemanja za i -to iteracijo (n smo empirično nastavili na 3). Za končno stopnjo ujemanja dveh prstnih odtisov uporabimo maksimalno vrednost $score_i$.

Na sliki 3 je prikazano ujemanje prstnih odtisov istega prsta, pri čemer stopnja ujemanja znaša 0,87. Na sliki 4 je prikazano ujemanje prstnih odtisov dveh različnih prstov, za katera je stopnja ujemanja 0,19.



Slika 3: Ujemanje prstnih odtisov istega prsta



Slika 4: (Ne)ujemanje prstnih odtisov različnih prstov

2.6 Konsistentne omejitve

Razcepljanje grebenov ima lahko za posledico, da se grebeni prstnih odtisov različnih prstov dobro ujemanjo. Z uporabo konsistentnih omejitev poskušamo to preprečiti.

Za vsako iteracijo primerjanja dveh prstnih odtisov z množicama grebenov R_1 in R_2 ustvarimo množico konsistentnih omejitev C , ki je na začetku prazna. Vsakič, kadar pride do razcepljanja grebena iz R_1 ali R_2 , dodamo v množico C novo omejitev, ki pove s katerim grebenom se novonastali greben sme primerjati.

Če novonastali greben nastane z odcepom prednjega oz. zadnjega dela grebena r_{1i} iz R_1 , se sme primerjati samo z grebenom, ki je nastal z odcepom prednjega oz. zadnjega dela grebena r_{2j} iz R_2 , pri čemer se morata r_{1i} in r_{2j} ujemati. V primeru, da do odcepa

prednjega oz. zadnjega dela r_{2j} ne pride, se novonastali greben ne sme primerjati z nobenim grebenom. V primeru, da novonastali greben nastane z odcepom prednjega ali zadnjega grebena iz R_2 , zgornje pravilo ustrezno prilagodimo.

Vsakič ob primerjanju poljubnih grebenov r_{1i} iz R_1 in r_{2j} iz R_2 za vsakega od njiju preverimo tudi ustreznost konsistentnim omejitvam C . S spremenljivko c štejemo kolikokrat je v iteraciji primerjanja dveh prstnih odtisov prišlo do neupoštevanja omejitev. Pričakujemo lahko, da bo vrednost c ob primerjanju prstnih odtisov istega prsta ostala majhna oz. enaka 0, če primerjamo dva identična prstna odtisa. Z namenom pohitritve delovanja algoritma vrednost c preverjamo sproti. Ko c preseže vrednost c_{th} , prekinemo izvajanje iteracije in stopnjo ujemanja dveh prstnih odtisov nastavimo na 0 (c_{th} smo empirično nastavili na 90).

3 REZULTATI

Sistem FingerIdent smo pred in po integraciji algoritma za primerjanje grebenov testirali na štirih množicah slik prstnih odtisov s tekmovanja FVC2002 [5]. Vsaka množica je vsebovala 800 slik. Slike so bile pridobljene z optičnim (DB1, DB2) in kapacitivnim (DB3) čitalcem, zbirka DB4 pa je vsebovala sintetično generirane prstne odtise. Z uporabo protokola iz FVC2002 smo merili naslednje parametre:

- EER (angl. equal error rate): vrednost FMR in FNMR, kadar velja $FMR = FNMR$,
- ZeroFMR: najnižja vrednost FNMR za $FMR = 0\%$,
- ZeroFNMR: najnižja vrednost FMR za $FNMR = 0\%$,
- FMR100: najnižja vrednost FNMR za $FMR \leq 1\%$,
- FMR1000: najnižja vrednost FNMR za $FMR \leq 0,1\%$.

Stopnja FNMR (angl. false non-match rate) označuje neujemanje dveh vzorcev istega osebk, stopnja FMR (angl. false match rate) pa ujemanje dveh vzorcev različnih osebkov [6].

V tabeli 1 so prikazani rezultati testiranja sistema FingerIdent pred nadgradnjo.

Tabela 1: Parametri sistema FingerIdent pred nadgradnjo

	EER	ZeroFMR	ZeroFNMR	FMR100	FMR1000
DB1	1,89%	5,18%	99,09%	2,29%	3,57%
DB2	1,65%	3,29%	93,80%	1,82%	2,75%
DB3	7,33%	29,96%	99,90%	12,21%	18,32%
DB4	3,72%	14,54%	96,91%	5,36%	9,00%

Algoritem za primerjanje grebenov smo integrirali tako, da se končni rezultat ujemanja dveh prstnih odtisov oblikuje kot utežena vsota stopnje ujemanja obstoječega primerjanja značilk in implementiranega primerjanja grebenov:

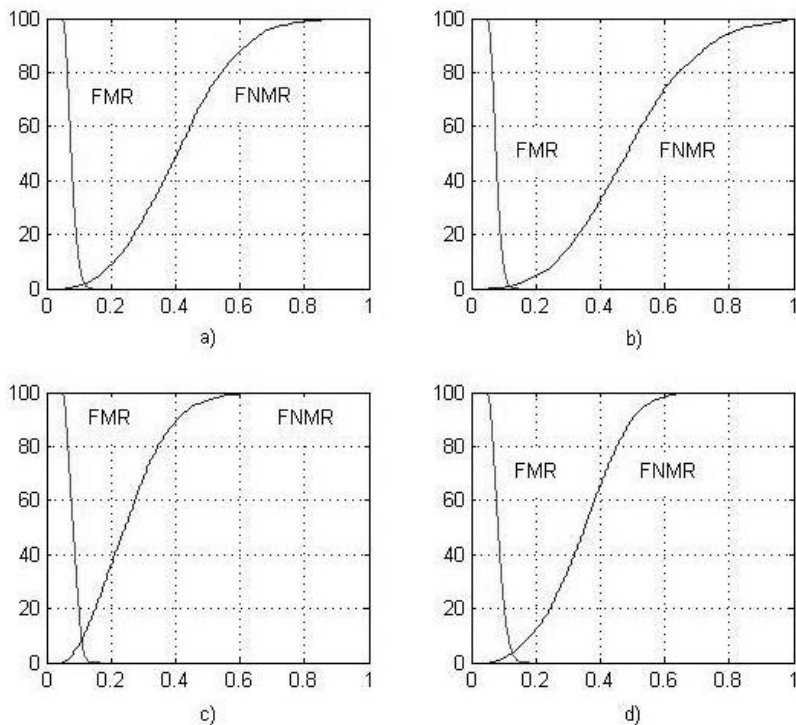
$$s = (1 - w) \cdot s_m + w \cdot s_r \quad (12)$$

Stopnja ujemanja je na intervalu [0,1], večja kot je, bolj se prstna odtisa ujemata.

Največje izboljšanje večine parametrov smo v nadgrajenem sistemu FingerIdent dosegli, ko smo parameter w nastavili na 0,1. Rezultati testiranja za omenjeno nastavitvev so prikazani v tabeli 2. Vrednosti v oklepajih povejo za koliko odstotkov se je zmanjšala vrednost posameznega parametra glede na parameter sistema pred nadgradnjo. Na sliki 5 so prikazane še ROC krivulje nadgrajenega sistema.

Tabela 2: Parametri sistema FingerIdent po nadgradnji

	EER	ZeroFMR	ZeroFNMR	FMR100	FMR1000
DB1	1,85% (2,02%)	3,04% (41,38%)	94,22% (4,91%)	1,93% (15,62%)	2,89% (19,00%)
DB2	0,93% (43,69%)	1,82% (44,57%)	98,38% /	0,93% (49,02%)	1,54% (44,16%)
DB3	8,44% /	25,39% (15,25%)	98,79% (1,11%)	13,07% /	20,36% /
DB4	3,38% (8,95%)	9,61% (33,91%)	95,07% (1,90%)	4,89% (8,67%)	8,86% (1,59%)



Slika 5: ROC krivulje nadgrajenega sistema za testne množice a)DB1, b)DB2, c)DB3 in d)DB4

Izboljšanje sistema je najbolj izrazito pri DB1 in DB2, ki vsebujeta kvalitetnejše slike kot DB3 in DB4. Sklepamo lahko, da je delovanje algoritma za primerjanje grebenov na slikah dobre kvalitete zanesljivejše.

Glavna pomanjkljivost algoritma za primerjanje grebenov se nahaja v delu za iskanje potencialnih začetnih baznih parov grebenov, saj se je večkrat zgodilo, da so se na začetek seznama potencialnih začetnih baznih parov grebenov uvrstili pari, ki so se kasneje izkazali za neustrezne. Pomanjkljivost je tudi čas izvajanja algoritma (407 ms), ki je precej daljši od časa algoritma za primerjanje značilk (18 ms). Relativna počasnost algoritma za primerjanje grebenov je delno posledica tega, da je implementiran v programskem jeziku Matlab, medtem ko je algoritem za primerjanje značilk implementiran v C#. Pomembno je tudi dejstvo, da prvi algoritem v postopek primerjanja zajame približno 10-krat več točk prstnega odtisa kot drugi. Čas primerjanja dveh prstnih odtisov v nadgrajenem sistemu FingerIdent je enak vsoti obeh časov (425 ms).

4 ZAKLJUČEK

Implementiran algoritem primerja prstna odtisa na podlagi grebenov. Glavni posebnosti algoritma sta razcepljanje grebenov in sprotno izračunavanje transformacije. S tem smo omogočili, da se tolerirajo tudi morebitne nelinearne deformacije prstnih odtisov. Zanesljivost sistema FingerIdent smo z integracijo algoritma za primerjanje grebenov izboljšali. Izboljšanje parametrov je najbolj opazno pri testiranju nad množico DB2, kjer smo stopnjo EER zmanjšali za 43,69%, ZeroFMR za 44,57%, FMR100 za 49,02% in FMR1000 za 44,16%. Težava je daljši čas, ki ga sistem zdaj porabi za primerjavo dveh prstnih odtisov. V nadaljnjem delu bi zato veljalo pohitriti celoten algoritem za primerjanje grebenov in odpraviti težave pri iskanju potencialnih začetnih baznih parov grebenov.

LITERATURA

1. J. Fierrez-Aguilar, L. Nanni, J. Ortega-Garcia, R. Cappelli, D. Maltoni (2005), Combining multiple matchers for fingerprint verification: a case study in FVC2004, *Proceedings ICIAP 2005*, Cagliari: str. 1035-1042.
2. T.H. Cormen, E.C. Leiserson, L.R. Rivest, C. Stein (2009), *Introduction to Algorithms*, Cambridge (Massachusetts); London: The MIT Press.
3. J. Feng, Z. Ouyang, F. Su, A. Cai (2005): An Exact Ridge Matching Algorithm for Fingerprint Verification, *Proceedings IWBRIS 2005*, Beijing, str. 103-110.
4. U. Klopčič, P. Peer (2010), Fingerprint-based human verification system, *Proceedings IWSSIP 2010*, Rio de Janeiro, str. 150-153.
5. D. Maio, D. Maltoni, R. Cappelli, J.L. Wayman, A.K. Jain (2002), FVC2002: Second Fingerprint Verification Competition, *Proceedings 16th International Conference on Pattern Recognition*, Québec City: str. 811-814.
6. D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, S. Prabhakar (2005), *Handbook of Fingerprint Recognition*, New York: Springer.
7. X. Zheng, Y. Wang (2008), Fingerprint matching based on ridge similarity, *Proceedings ICASSP 2008*, Las Vegas: str. 1701-1704.