

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Jaka Pohar

Ujemanje prstnih odtisov na podlagi grebenov

DIPLOMSKO DELO
UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: doc. dr. Peter Peer

ASISTENT: as. Jernej Bule

Ljubljana 2013

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil $\text{\LaTeX}$.



Št. naloge: 00064/2013

Datum: 02.04.2013

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **JAKA POHAR**

Naslov: **UJEMANJE PRSTNIH ODTISOV NA PODLAGI GREBENOV**
RIDGE-BASED FINGERPRINT MATCHING

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija prve stopnje

Tematika naloge:

Obstoječi sistem FingerIdent za verifikacijo ljudi na podlagi prstnega odtisa razširite tako, da bo delal primerjavo tudi na osnovi grebenov prstnih odtisov. Verifikacijska odločitev naj bo na koncu sprejeta kot kombinacija stopenj ujemanja obstoječega primerjanja značilk in implementiranega primerjanja grebenov. Sistem testirajte nad množicami slik s tekmovanja FVC 2002.

Mentor:

doc. dr. Peter Peer

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Jaka Pohar, z vpisno številko **63090101**, sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Ujemanje prstnih odtisov na podlagi grebenov

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Petra Peera in as. Jerneja Buleta,
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela,
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, 26.8.2013

Podpis avtorja:

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Petru Peeru in as. Jerneju Buletu za pomoč, nasvete in potrpežljivost pri izdelavi diplomskega dela. Zahvaljujem se Špeli Anžin za lektoriranje. Zahvaljujem se staršem za moralno in finančno podporo tekom študija. Zahvaljujem se tudi sestri, starim staršem in prijateljem za vzpodbudne besede.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
1.1	Identifikacija oseb na podlagi prstnega odtisa	3
1.1.1	Zgodovina	3
1.1.2	Osnovna dejstva in definicije	5
1.1.3	Zgradba prstnega odtisa	8
1.2	Koraki sistema za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa	11
1.2.1	Zajem prstnega odtisa	11
1.2.2	Segmentacija	12
1.2.3	Izboljšanje kvalitete prstnega odtisa	12
1.2.4	Binarizacija	13
1.2.5	Tanjšanje grebenov	13
1.2.6	Iskanje značilk	13
1.2.7	Klasifikacija	14
1.2.8	Primerjanje	14
1.3	Metode primerjanja prstnih odtisov	15
1.3.1	Korelacijska metoda	15
1.3.2	Primerjanje na podlagi značilk	16
1.3.3	Metoda primerjanja grebenov	16
1.4	Opis problema in cilji	16

2	Primerjanje na podlagi grebenov	19
2.1	Splošen opis in koraki algoritma	19
2.2	Predstavitev grebenov in predobdelava	20
2.3	Strukturiranje podatkov	21
2.4	Primerjanje para poravnanih grebenov	22
2.4.1	Iskanje najdaljšega povezanega seznama ujemajočih se točk	23
2.4.2	Razcepljanje grebenov	24
2.5	Iskanje začetnega baznega para grebenov	25
2.6	Primerjanje vseh grebenov	27
2.6.1	Računanje transformacije	27
2.6.2	Poravnavanje grebenov	29
2.6.3	Iskanje sosednjega grebena	31
2.7	Računanje stopnje ujemanja	32
2.8	Konsistentne omejitve	34
2.9	Uporabljena orodja	38
3	Integracija v sistem FingerIdent	39
3.1	Metodologija zlivanja	39
3.2	Pretvorba posamičnih stopenj ujemanja	40
3.3	Zlitje v skupno stopnjo ujemanja	41
4	Rezultati	43
4.1	Potek testiranja	43
4.2	Rezultati pred nadgradnjo	44
4.3	Rezultati po nadgradnji	47
4.4	Pomanjkljivosti in možne izboljšave	54
5	Zaključek	55

Povzetek

V tem delu je predstavljena nadgradnja sistema za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa FingerIdent. Sistem v obstoječi obliki za primerjavo dveh prstnih odtisov uporablja primerjanje na podlagi značilk. Z namenom izboljšanja varnosti sistema smo implementirali še algoritem za primerjavo prstnih odtisov na podlagi grebenov in ga integrirali v obstoječ sistem.

Algoritem kot vhod sprejme seznama točk grebenov dveh prstnih odtisov in najprej poišče začetni par grebenov. Nato začetni par grebenov primerja, izračuna kolikšno je prekrivanje prstnih odtisov in rekurzivno primerja še ostale grebene. Za vsak par ujemajočih se grebenov sproti izračuna transformacijo, s čimer tolerira tudi morebitne nelinearne deformacije. Postopek ponovi še za druge pare začetnih grebenov in na koncu uporabi najboljše ujemanje.

Integracijo algoritma v sistem FingerIdent smo izvedli na način, da se končni rezultat ujemanja dveh prstnih odtisov oblikuje na podlagi primerjanja, ki se že uporablja ter na podlagi na novo implementiranega primerjanja.

Nadgrajen sistem FingerIdent smo preizkusili na štirih testnih množicah s tekmovanja FVC 2002. Vsaka testna množica je vsebovala 800 slik prstnih odtisov različnih kvalitet in velikosti. Preizkusili smo več različnih scenarijev ujemanja. Primerjava med rezultati je pokazala, da je sistem, v katerem se končni rezultat ujemanja oblikuje kot utežena vsota stopenj ujemanja obstoječega primerjanja značilk in implementiranega primerjanja grebenov, zanesljivejši od sistema pred nadgradnjo.

Ključne besede:

računalniški vid, prstni odtisi, samodejno razpoznavanje, primerjanje grebenov, fuzija

Abstract

The diploma thesis presents an upgrade of the FingerIdent fingerprint verification system. The current version of the system uses a minutia matching procedure for comparison of two fingerprints. In order to improve the security of the system we have implemented an additional matching procedure which is based on the use of fingerprint ridges.

Algorithm inputs are lists of ridge points of two fingerprints. At the beginning the algorithm searches the initial base ridge pair and matches it. Then it calculates the overlapping region of the fingerprints and recursively matches all the other pairs of ridges. In order to tolerate non-linear distortion it calculates the transformation for each matching pair separately. It repeats the procedure for the other base ridge pairs and uses the best matching score.

We have carried out the integration of the algorithm with the FingerIdent system in a way that the final matching score of two fingerprints is formed as a combination of the existent matching procedure and the newly implemented matching procedure.

We have tested the upgraded FingerIdent system on four test sets from the FVC 2002 competition. Each test set contains 800 fingerprint images of different qualities and sizes. We have tested different matching scenarios. Comparison of the results shows that the system which calculates the final matching score as a weighted sum of scores of the current minutia matching procedure and the newly implemented ridge matching procedure achieves better reliability.

Key words:

computer vision, fingerprints, automated recognition, ridge matching, fusion

Poglavje 1

Uvod

Ugotavljanje identitete posameznika je velik izziv, s katerim se ljudje pogosto srečujemo. Dvig denarja na bankomatu, dostop v prostore in prijava v računalnik so le nekateri izmed primerov, ki zahtevajo identifikacijo uporabnika. Tradicionalni sistemi za identifikacijo oseb običajno uporabljajo gesla, PIN kode, ključe ali vstopne kartice. Tovrstni sistemi so danes sicer razširjeni, vendar v primerjavi s sistemi, ki temeljijo na biometrični razpoznavi, zagotavljajo nižjo raven varnosti, učinkovitosti in udobnosti uporabe.

Biometrična razpoznavna, ali preprosto biometrija, pomeni uporabo razločevalnih anatomskih (npr. prstni odtisi, obraz, šarenica, geometrija rok, DNK) in vedenjskih (npr. ritem tipkanja, glas, podpis) karakteristik ali identifikatorjev za avtomatsko razpoznavo oseb. Za biometrične identifikatorje velja empirično dejstvo, da so unikatni, zato v primerjavi s tradicionalnimi identifikatorji nudijo nekatere bistvene prednosti in veljajo za zanesljivejše. Za razliko od njih namreč niso podvrženi kraji, ponarejanju ali posojanju med uporabniki. Dodatna prednost je tudi, da jih ne moremo izgubiti ali pozabiti, saj so vedno prisotni. Te prednosti so povod, da se biometrični sistemi v vse večjem številu uporabljajo tako na državnem (npr. prečkanje meje, biometrični potni listi in osebne izkaznice), kot tudi osebnem (npr. prijava v operacijski sistem, računalniško omrežje ali mobilni telefon) nivoju. Kljub vsemu je zloraba biometričnih sistemov možna, saj se lahko prstni odtis

določene osebe brez večjih težav pridobi s predmetov (npr. kljuke, kozarca), zlorabljen oseba pa biometričnega vzorca ne more spremeniti.

Med številnimi razvitimi biometričnimi tehnologijami je največ takih, ki uporabljajo prstne odtise, obraz, šarenico, glas in geometrijo rok. Vsak izmed biometričnih identifikatorjev ima svoje prednosti in slabosti, zato je odločitev za uporabo določenega identifikatorja običajno odvisna od zahtev okolja, v katerem se bo tehnologija uporabljala. Zaradi znane visoke individualnosti in obstojnosti, kot tudi cenovne sprejemljivosti in razvitosti tehnologije, so prstni odtisi najbolj uporabljani biometrični identifikatorji. Njihova uporaba za namen identifikacije oseb sega več kot 100 let nazaj. Za prve uporabnike veljajo forenziki in organi pregona, pri katerih je uporaba avtomatskih sistemov za identifikacijo na podlagi prstnega odtisa danes postala rutina. Vse večje skrbi glede nacionalne varnosti, finančnih prevar in kraj identitet so ustvarile potrebo po uporabi tovrstne tehnologije tudi na drugih področjih.

Na sistem za razpoznavo prstnih odtisov lahko gledamo kot na sistem za razpoznavo vzorcev (angl. *pattern recognition system*). Načrtovanje algoritmov, ki so zmožni pridobivanja različnih značilnosti iz prstnih odtisov in robustne primerjave le-teh, je kar precejšen izziv. To velja zlasti, če je sodelovanje z uporabniki oteženo, površina prsta umazana ali ranjena oz. je slika prstnega odtisa zaradi kakršnegakoli drugega vzroka slabe kvalitete. Zmotno je mišljenje, da je avtomatska razpoznavna na podlagi prstnih odtisov popolnoma rešen problem (tovrstni sistemi so sicer prisotni že skoraj 40 let). Velja ravno nasprotno, razpoznavna na podlagi prstnih odtisov je namreč še vedno pomemben izziv. To velja zlasti takrat, ko se zaradi omenjenih razlogov pojavi velika različnost med odtisi istih prstov in velika podobnost med odtisi različnih prstov.

1.1 Identifikacija oseb na podlagi prstnega odtisa

Identifikacija oseb na podlagi prstnega odtisa je med načini biometrične razpoznavne najbolj razširjena. V podpoglavjih, ki sledijo, so predstavljeni zgodovina, osnovna dejstva in definicije ter zgradba prstnega odtisa [12].

1.1.1 Zgodovina

Arheologi so našli mnogo zgodovinskih artefaktov, na katerih so vgravirani oz. naslikani prstni odtisi. Ta odkritja sicer nakazujejo, da so se starodavna ljudstva individualnosti prstnih odtisov zavedala, vendar znanstvenega dokaza za to ni.

Prva znanstvena raziskovanja tega področja segajo v leto 1684, ko je angleški anatomist Nethemiah Grew objavil delo, v katerem je opisal grebene, brazde in strukturo por prstnega odtisa. Za prvi natančni opis vzorcev, ki se pojavljajo na prstnem odtisu, je zaslužen Nemec Johann Christoph Mayer, ki je leta 1788 v svojem delu zbral in kategoriziral več pomembnih značilnosti grebenov. Leta 1809 je Anglež Thomas Bewick začel uporabljati prstni odtis kot blagovno znamko, kar se prav tako šteje za pomemben mejnik v zgodovini raziskovanja prstnega odtisa. Odtisi, ki jih je vgraviral v les, so bili namreč izredno natančni. Češki filozof in anatomist Johannes Purkinje Evangelista je leta 1823 kot prvi predlagal grupiranje prstnih odtisov v več razredov. V svojem doktorskem delu je predstavil devet razredov, in sicer: lok, štorast lok, zanko in šest različnih tipov spiral. Prve tri tipe se uporablja še danes, različne tipe spiral pa se je zaradi enostavnosti združilo v en razred.

Leta 1880 je Henry Fauld znanstveno izpostavil individualnost prstnih odtisov, pri čemer so njegove raziskave temeljile na empiričnih opazovanjih. Hkrati je bil William James Herschel, britanski oficir na službovanju v Indiji, prvi, ki je prstne odtise tudi v praksi uporabil. Z njimi je želel preprečiti pogoste goljufije pri podpisovanju pogodb in se izogniti nepismenosti, ki je bila velik problem takratnega prebivalstva Indije. Njegova spoznanja, da bi

prstni odtis lahko služil kot splošno sredstvo za identifikacijo oseb, v domovini niso bila sprejeta, so pa spodbudila nadaljnje raziskave. Tako je leta 1888 Sir Francis Galton izvedel obsežno raziskavo na temo prstnih odtisov, v kateri je predstavil in poimenoval značilke grebenov (konec grebena, razcep, zanka, otoček) in dokazal, da se prstni odtisi človeka od rojstva do smrti ne spremenijo ter da ne obstajata dva enaka prstna odtisa. Slednji dejstvi je leta 1893 sprejelo tudi britansko notranje ministrstvo.

Pomemben premik se je zgodil leta 1899, ko je Edward Henry vpeljal »Henrijev sistem« za indeksacijo prstnih odtisov, s čimer je rešil problem množičnosti pri primerjavi enega prstnega odtisa z več (npr. 100) ostalimi. Zapis o osebi je shranil pod označbo, ki je bila sestavljena iz oznak tipov vzorcev vseh desetih prstnih odtisov določene osebe. Sistem je imel na voljo 1024 možnih označb, zato se je pri iskanju v povprečju pregledala le 1/1024 označb. Leta 1901 je Scotland Yard kot prvi vpeljal njegov sistem indeksacije, kasneje pa so ga začeli uporabljati tudi drugod po svetu. S hitrim širjenjem uporabe v forenziki so baze prstnih odtisov postajale vse večje, kar je ročno identifikacijo naredilo neizvedljivo. Kot primer lahko navedem, da je FBI baza prstnih odtisov iz začetnih 810 000 (leta 1924) narasla na sedanjih več kot 200 milijonov oseb, pri čemer za vsako osebo hrani vseh deset prstnih odtisov.

V začetku šestdesetih let prejšnjega stoletja so FBI, britansko notranje ministrstvo in pariška policija začeli z razvojem avtomatskega sistema za identifikacijo na podlagi prstnih odtisov. Bilo so uspešni, saj organi pregona avtomatske sisteme danes uporabljajo skoraj povsod po svetu. Tovrstni sistemi so občutno izboljšali njihovo produktivnost in hkrati zmanjšali stroške najema in urjenja strokovnjakov za prstne odtise. Sčasoma se je podobna tehnologija močno razširila tudi preko meja forenzike. Postala je celo tako popularna, da so se prstni odtisi skorajda prelevili v sinonim za biometrijo.

1.1.2 Osnovna dejstva in definicije

Tvorba in individualnost prstnih odtisov

Prstni odtisi se dokončno oblikujejo pri sedem mesečnem zarodku. Na njihovo zgradbo naj bi vplivali geni ter okolje, v katerem se nahaja posameznik. Nespremenjena ostane celo življenje, razen v primeru hujših odrgnin in ureznin. Ta lastnost naredi prstne odtise za zelo privlačne biometrične identifikatorje, katerih individualnost sicer ni dokazana, vendar velja za empirično ugotovitev. Pri avtomatskih identifikacijskih sistemih lahko kljub temu pride do ujemanja dveh prstnih odtisov različnih oseb. Naprave, ki niso odporne na šum in napake, lahko namreč povzročijo izgubo razločevalnih informacij. Primer prstnega odtisa je prikazan na sliki 1.1.



Slika 1.1: Primer prstnega odtisa.

Načini razpoznavanja

Pri načrtovanju biometričnih sistemov je pomembno, da vemo, na kakšen način bo posameznik razpoznan. Pri tem ločimo dve osnovni možnosti, verifikacijo (angl. *verification*) in identifikacijo (angl. *identification*).

Verifikacijski sistem (slika 1.2) dokaže pristnost posameznikove identitete tako, da primerja zajete biometrične karakteristike z že shranjenimi karakteristikami iste osebe. Izvede se t.i. ena-proti-ena (angl. *one-to-one*) primerjava,

s katero sistem potrdi ali zavrne avtentičnost osebe. Tipičen primer verifikacije je prijava v operacijski sistem ali računalniško omrežje, kjer najprej vnesemo uporabniško ime in nato geslo. Uporaba prstnega odtisa bi lahko nadomestila vpisovanje gesla. Na podlagi vnesenega uporabniškega imena bi se izvedla le primerjava med vhodnim prstnim odtisom in prstnim odtisom, ki pripada uporabniškemu imenu.

Identifikacijski sistem (slika 1.3) ugotovi identiteto posameznika tako, da primerja zajete biometrične karakteristike s shranjenimi karakteristikami vseh oseb v bazi. Izvede se t.i. ena-proti-mnogo (angl. *one-to-many*) primerjava, s katero sistem vrne eno ali več identitet, ki ustrezajo karakteristikam osebe. V nasprotnem primeru pa ugotavljanje identitete ne uspe. Tipičen primer identifikacije je primerjava prstnega odtisa z mesta zločina z vsemi prstnimi odtisi v bazi.

Vrednotenje razpoznavanja

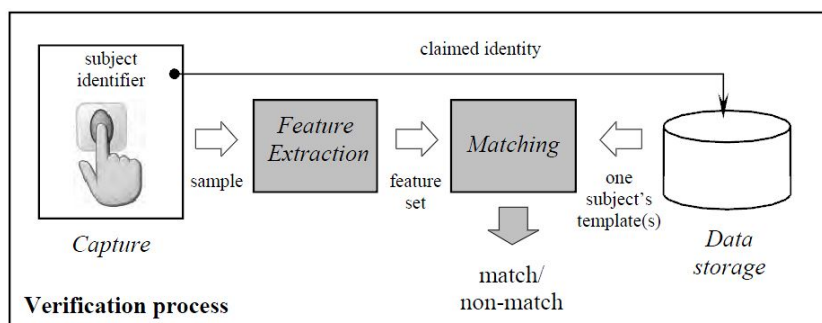
Kot že omenjeno, pri avtomatskih identifikacijskih sistemih prihaja do napak zaradi šuma, ki je posledica poškodb prsta (npr. odrgnine, ureznine, opekline) in same narave uporabe čitalcev prstnih odtisov (npr. umazanija, vlaga, prevelika oz. premajhna jakost pritiska prsta na čitalec). Pri tem ločimo naslednji dve vrstni napak:

- Napačno ujemanje (angl. *false match*) pomeni ujemanje dveh prstnih odtisov različnih oseb. Od tod izhaja verjetnost napačnega ujemanja (angl. *false match rate* - *FMR*):

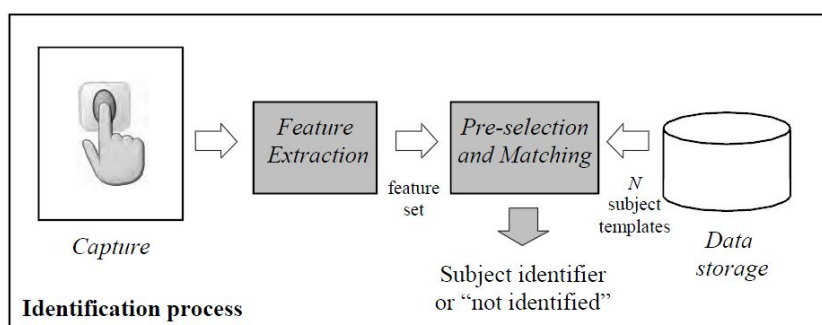
$$FMR = \frac{\text{število nepravilnih sprejemov}}{\text{število vseh poskusov}} * 100 \text{ [\%]} \quad (1.1)$$

- Napačno ne-ujemanje (angl. *false non-match*) pomeni ne-ujemanje dveh prstnih odtisov istega osebk. Od tod izhaja verjetnost napačnega ne-ujemanja (angl. *false non-match rate* - *FNMR*):

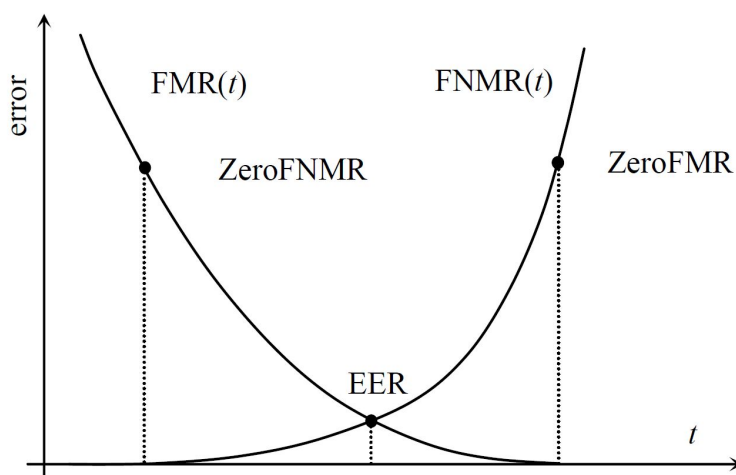
$$FNMR = \frac{\text{število nepravilnih zavrnitev}}{\text{število vseh poskusov}} * 100 \text{ [\%]} \quad (1.2)$$



Slika 1.2: Delovanje verifikacijskega sistema [12].



Slika 1.3: Delovanje identifikacijskega sistema [12].



Slika 1.4: ROC krivulja [12].

Razmerji FMR in $FNMR$ sta odvisni od parametra sistema t , ki mu pravimo tudi odločitveni prag (angl. *threshold*). Če t zmanjšamo in s tem naredimo sistem bolj toleranten, se $FMR(t)$ poveča. Obratno velja, če t povečamo in naredimo sistem bolj restriktiven; v tem primeru se namreč poveča $FNMR(t)$. Zanesljivost sistema lahko predstavimo s krivuljo operacijske značilnosti sprejemnika (angl. *receiver operating characteristic - ROC*), ki prikazuje FMR in $FNMR$ v odvisnosti od t (slika 1.4). Pri neki vrednosti parametra t velja: $FMR(t) = FNMR(t)$; v tem primeru je verjetnost obeh napak izenačena in enaka EER (angl. *equal error rate*).

1.1.3 Zgradba prstnega odtisa

Poglavitna značilnost prstnega odtisa so paralelno razporejeni grebeni in doline, ki skupaj predstavljajo bogato strukturno informacijo. Značilke prstnega odtisa lahko analiziramo na treh različnih ravneh.

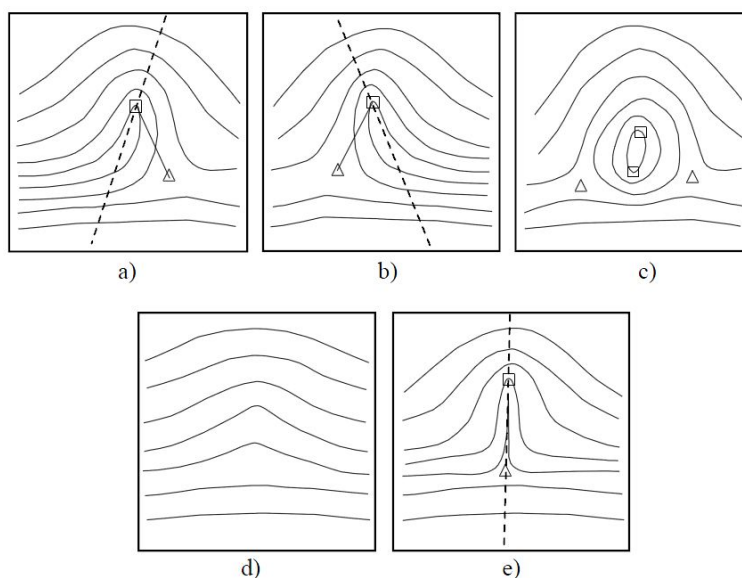
Raven 1

Na prvi, globalni ravni, tvorijo grebeni različne vzorce, ki jih določajo singularne točke. Singularne točke, imenovane jedra (angl. *core*) in delte, predstavljajo kontrolne točke, okoli katerih so ovite črte grebenov. Jedro je definirano kot center najbolj severne zanke, delta pa je področje odtisa kjer grebeni tvorijo trikotno strukturo. Singularne točke in grobe linije grebenov so uporabni za klasifikacijo in indeksiranje prstnih odtisov (slika 1.5), ne vsebujejo pa dovolj razločevalne informacije, da bi jih lahko uporabili za preverjanje ujemanja prstnih odtisov. Med globalne značilke, poleg omenjenih, sodijo še: zunanja oblika odtisa, orientacijska slika in frekvenčna slika.

Za klasifikacijo se danes večinoma uporablja Galton-Henryev sistem. Najbolj uporabljeni razredi tega sistema so:

- Lok(angl. *arch*): ima grebene, ki vstopijo na eni strani, tvorijo rahlo izboklino in izstopijo na drugi strani. Nimajo niti jeder niti delt.

- Šotorast lok (angl. *tented arch*): podoben je običajnemu loku, le da ima vsaj en zelo ukrivljen greben, poleg tega pa ima tudi jedro ter delto.
- Leva zanka (angl. *left loop*): eden ali več grebenov vstopi z leve strani, se ukrivi in izstopi spet na levi strani. Jedro in delta sta prisotna.
- Desna zanka (angl. *right loop*): podobna je levi zanki, le da grebeni vstopajo in izstopajo iz desne.
- Spirala (angl. *whorl*): vsebuje vsaj en greben, ki potuje celotnih 360° okrog centra. Vsebuje dve jedri in dve delti.



Slika 1.5: Različni vzorci grebenov na globalni ravni: a) leva zanka, b) desna zanka, c) spirala, d) lok, e) šotorast lok [12].

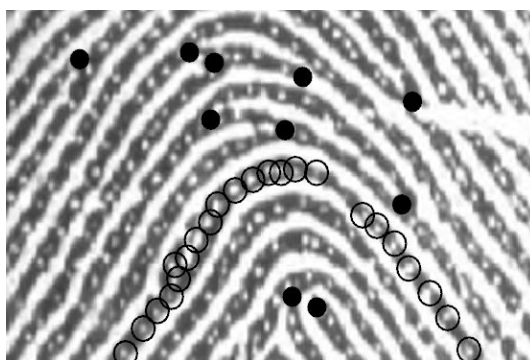
Raven 2

Na drugi, lokalni ravni, je bilo identificiranih 150 različnih lokalnih značilnosti grebenov (angl. *minute details*). Te značilnosti so neenakomerno razporejene

po prstnem odtisu. Večina jih je odvisna od kvalitete prstnega odtisa in so zato redko prisotne. Najbolj izraziti značilnosti grebenov sta zaključek grebena (angl. *ridge termination*) in razcep grebena (angl. *ridge bifurcation*), ki jima s skupno latinsko besedo pravimo minutiae. Zaključek grebena je definiran kot točka na grebenu, kjer se greben nenadoma konča. Razcep grebena pa je definiran kot točka na grebenu, kjer se greben razcepi v dve veji. Omenjeni značilki sta s črnimi pikami označeni na sliki 1.6. V splošnem sta stabilni in robustni glede na stanje vtisa prstnega odtisa, vendar njuno iskanje predstavlja precejšen problem pri odtisih slabše kvalitete. Pri tem namreč pride do zamika detajlov ali pa le-teh sploh ne moremo razbrati s slike. Ostale pomembnejše značilke so še točka ali otok (angl. *island*), špica (angl. *spur*) in križišče (angl. *crossover*).

Raven 3

Na tretji, mikro ravni, opazujemo notranje podrobnosti grebena, ki jih predstavljajo: širina, ukrivljenost, oblika robov grebena in tudi druge točke. Ena izmed najpomembnejših mikro značilk so znojne pore (angl. *sweat pores*), katerih število, pozicija in oblika, veljajo za visoko razločujoče. Takšno iskanje značilk je možno le s kvalitetnimi slikami visoke ločljivosti (1000 dpi), vendar je tovrstna predstavitev prstnih odtisov za večino aplikacij manj praktična. Znojne pore so s črnimi krogi označene na sliki 1.6.



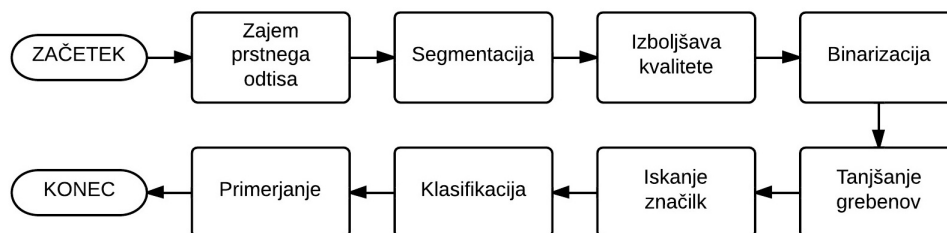
Slika 1.6: Minutiae in znojne pore [12].

1.2 Koraki sistema za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa

Sistemi za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa običajno temeljijo na treh glavnih korakih:

1. Zajem podatkov s pomočjo čitalca prstnih odtisov
2. Iskanje značilk (izdelava digitalnega zapisa vzorca)
3. Odločanje (primerjava vhodnega vzorca z vzorci v podatkovni zbirki)

V nadaljevanju sledi splošen opis teh korakov in podkorakov, kot so implementirani v sistemu FingerIdent, ki je bil razvit v Laboratoriju za računalniški vid na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani [10, 16]. Shema sistema je prikazana na sliki 1.7.



Slika 1.7: Koraki sistema FingerIdent.

1.2.1 Zajem prstnega odtisa

Prstni odtis je zajet s pomočjo optičnega čitalca prstnih odtisov. Poleg optičnih čitalcev obstajajo še kapacitivni, ultrazvočni in termični čitalci [4]. Današnji čitalci so zmožni zajema slike v časovnem intervalu ene sekunde. Ta korak je eden najpomembnejših, saj so vsi nadaljnji koraki v sistemu odvisni od kvalitete zajetega odtisa [15].

Po zajemu se izvede metoda za ocenjevanje kvalitete slik zajetih prstnih odtisov [3], ki v primeru slabe kvalitete zahteva ponoven zajem.

1.2.2 Segmentacija

Pri segmentaciji se poskuša prstni odtis čim bolje ločiti od ozadja. S tem se poveča natančnost primerjanja in skrajša čas procesiranja, saj se predeli slike, ki bodisi niso zanimivi bodisi vsebujejo preveč šuma, izognejo procesiranju.

Prisotnost črtastega in orientiranega vzorca loči odtis od ozadja. V primeru, da bi bilo ozadje vedno konstantno in svetlejše od površine odtisa, bi bila segmentacija možna že na osnovi intenzitete. Ker je v praksi vedno prisoten šum, se uporabljajo tudi kompleksnejše tehnike.

V sistemu FingerIdent je uporabljen pristop, pri katerem je prvi korak odštevanje vrednosti, ki predstavlja ozadje, drugi korak pa je segmentacija.

1.2.3 Izboljšanje kvalitete prstnega odtisa

Učinkovitost algoritma za iskanje značilnk je močno odvisna od kvalitete slike prstnega odtisa. Pri slabih odtisih, ki so posledica ureznin, prask, preveč suhih ali preveč vlažnih prstov ter tudi prevelike jakosti pritiska na čitalec; prihaja do prekinitev grebenov in pojava, pri katerem vzporedni grebeni niso dovolj ločeni med seboj zaradi prisotnosti šuma. Takšne nepravilnosti močno zmanjšajo učinkovitost algoritma, saj lahko vodijo do določitve napačnih značilnk, zgrešitve pravih značilnk in napačne določitve lokacije značilnk.

Cilj algoritma za izboljšanje kvalitete je, da popravi strukturo obnovljivih regij (regije, kjer so grebeni pokvarjeni z manjšim številom napak, vendar še vedno dovolj vidni za rekonstrukcijo na podlagi informacij iz sosednjih regij) ter da označi neobnovljive regije (regije, kjer so grebeni pokvarjeni s preveč šuma in motenj, da bi bile rekonstrukcije s pomočjo sosednjih regij uspešne) kot nezmožne za nadaljnjo procesiranje.

Izboljšanje kvalitete prstnega odtisa v sistemu FingerIdent poteka po naslednjih korakih: izračun orientacije, glajenje orientacije, izračun frekvence grebenov in filtriranje s pomočjo Gaborjevih filtrov [8].

1.2.4 Binarizacija

Namen binarizacije je zmanjšanje bitne globine črno-bele slike na samo 1 bit na slikovni element. Rezultat je slika, kjer so grebeni predstavljeni z bitom 1, ozadje pa z bitom 0. Najpreprostejši algoritem za binarizacijo postavi točke z nižjo stopnjo sivine od globalnega praga t na 0, ostale pa na 1. En sam prag običajno ne zadošča, saj so lahko različne regije slike izpostavljene različnim kontrastom in intenzitetam. Za boljše rezultate se uporablja tehnika lokalnega praga, ki spreminja t lokalno tako, da se prilagaja povprečni lokalni intenziteti.

Sistem FingerIdent uporablja filter, ki izračuna prag z uporabo metode enostavne statistike slike.

1.2.5 Tanjšanje grebenov

Namen tega koraka je pridobiti skelet prstnega odtisa, pri katerem so grebeni široki en slikovni element. V sistemu FingerIdent je uporabljen algoritem, ki odstranjuje slikovne elemente na zunanjih robovih grebenov, dokler niso debeli zgolj en slikovni element [17]. Poleg enaindvajsetih pravil algoritem uporablja tudi štiri posebna pravila za tanjšanje diagonalnih črt in dvanajst pravil za predpripravo na tanjšanje.

1.2.6 Iskanje značilk

Naloga algoritma za iskanje značilk je, da poišče značilke tipov razcep in zaključek, ki veljata za osnovna. Značilke se pridobi iz skeleta odtisa, vendar vse niso verodostojne. Veliko jih namreč nastane zaradi nepravilnosti, kot so: špice, jezera, prekinjeni grebeni itd. S postopkom nakladne obdelave se poskuša takih značilk znebiti. Na robu prstnega odtisa se določi območje, kjer se značilka ne išče, saj se veliko nepravilnih značilk pojavi prav tam.

Sistem FingerIdent se pri iskanju značilk opira na število križišč v trenutni točki [18], za odpravo nepravilnih značilk pa uporablja algoritem verifikacije značilk [1].

1.2.7 Klasifikacija

Klasifikacija je še posebej dobrodošla v sistemih, ki hranijo več tisoč prstnih odtisov, saj se s tem močno zmanjša izbor kandidatov in s tem čas procesiranja. Zaradi majhne inter-razredne variabilnosti (prstni odtisi istega razreda so lahko zelo različni) in velike intra-razredne variabilnosti (prstni odtisi različnih razredov so lahko precej podobni) je klasifikacija prstnih odtisov težavna naloga.

Sistem FingerIdent prstni odtis razporedi v enega od petih razredov Galton-Henryevega sistema: lok, šotorast lok, leva in desna zanka ter spirala. Razred ugotovi na podlagi singularnih točk (jedro, delta).

1.2.8 Primerjanje

Primerjanje je zadnji korak sistemov za verifikacijo na podlagi prstnih odtisov. Algoritmi primerjajo dva prstna odtisa in vrnejo rezultat, ki je lahko v obliki stopnje ujemanja (angl. *matching score*) (med 0 in 1) ali v obliki binarne odločitve (se ujema/se ne ujema). Prstni odtis pridobljen med registracijo se imenuje vzorec (angl. *template*); prstni odtis, za katerega želimo ugotoviti ujemanje, pa vhod (angl. *input*). Velike razlike med različnimi odtisi istega prsta naredijo ujemanje precej težavno. Razlogi za te razlike se naslednji:

- Premik: pri različnih poizvedbah prst ni postavljen vedno na isto mesto senzorja.
- Rotacija: pri različnih poizvedbah je prst rotiran za različne kote glede na površino senzorja.
- Delno prekrivanje: rotacije in premiki privedejo do tega, da nekateri deli prstnega odtisa niso zajeti, kar lahko privede do le delnega prekrivanja med vzorcem in vhodom.
- Ne-linearne distorzije: ob pritisku na senzor na prst delujejo nepravokotne sile, ki zaradi elastičnosti prsta posledično povzročijo raztezanje

ali krčenje zajete slike prstnega odtisa.

- Pritisk in stanje kože: pri suhi koži, potu in kožnih boleznih je slika zajetega prstnega odtisa šumna; stopnja šuma pa je lahko precej različna pri različnih zajetjih istega prsta.
- Napake pri iskanju značilk: napake pri iskanju značilk so pogoste in lahko nastanejo v vsakem koraku algoritma.

Sistem FingerIdent uporablja primerjanje na podlagi značilk (poleg te metode obstajata še korelacijska metoda in metoda primerjanja grebenov, vse tri so opisane v poglavju 1.3). Značilke se najprej pretvorijo v polarni koordinatni sistem, kjer se za središče vzame referenčno točko. Značilke vhoda se nato primerja z značilkami vzorca. Če obstaja zadostno število značilk, ki se ujemajo v lokaciji, usmeritvi in tipu značilk, se prstna odtisa ujemata. V koraku primerjanja se torej izve, če se vhodni prstni odtis ujema s katerim od prstnih odtisov, ki so za neko osebo registrirani v podatkovni bazi.

1.3 Metode primerjanja prstnih odtisov

Metode primerjanja prstnih odtisov v avtomatskih sistemih ne sledijo povsem enakim smernicam. Čeprav je bilo avtomatsko primerjanje prstnih odtisov na podlagi značilk (angl. *automatic minutiae-based fingerprint matching*) razvito po vzoru ročne procedure primerjanja, je bilo v zadnjih desetletjih uporabljenih še precej drugačnih pristopov. V grobem jih lahko razdelimo v tri razrede, katerih splošni opisi sledijo v nadaljevanju [12].

1.3.1 Korelacijska metoda

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

1.3.2 Primerjanje na podlagi značilk

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.

1.3.3 Metoda primerjanja grebenov

Metoda primerjanja grebenov (angl. *non-minutiae feature-based matching* ali *ridge feature-based matching*) deluje tako, da se primerja prstna odtisa na podlagi značilnosti, pridobljenih iz vzorca grebenov (npr. lokalna orientacija in frekvenca, oblika grebenov, tekstura). 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.

1.4 Opis problema in cilji

Identifikacija na podlagi prstnih odtisov velja za enega najbolj zrelih in izpopolnjenih načinov avtomatske identifikacije oseb. Kljub temu v samem postopku še vedno prihaja do težav, ki so v glavnem posledica nekvalitetnih slik prstnih odtisov, majhnih čitalcev prstnih odtisov in ne-linearne distorzije.

Predstavljenih je bilo mnogo algoritmov primerjanja, ki se z omenjenimi problemi spopadajo različno dobro. V grobem lahko algoritme razdelimo v že omenjene tri razrede (glej poglavje 1.3): korelacijska metoda, primerjanje na podlagi značilk in metoda primerjanja grebenov. Algoritmi, ki temeljijo na korelaciji, ohranijo večino informacije v prstnih odtisih, vendar so občutljivi na ne-linearne distorzije. Algoritmi, ki primerjajo na podlagi značilk, so bolj fleksibilni, vendar občutljivi na šum. Algoritmi, ki primerjajo na podlagi grebenov, pa so bolj odporni proti šumu, vendar veljajo za manj razločujoče. Vsak pristop ima svoje prednosti in slabosti, zato so smiselni tudi hibridni pristopi [6].

Sistem FingerIdent je sistem za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa. Razvit je bil v Laboratoriju za računalniški vid na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Sistem FingerIdent v trenutni obliki uporablja samo primerjanje na podlagi značilk.

Cilj diplomske naloge je implementacija algoritma za primerjanje prstnih odtisov (angl. *fingerprint matching algorithm*) v smislu koraka sistema za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa. Implementirati želimo algoritem, ki bi ga v sistemu FingerIdent lahko uporabili kot dodatno preverjanje ujemanja. S tem bi zagotovili večjo varnost in izboljšali zanesljivost sistema. Algoritem torej želimo integrirati v sistem FingerIdent na način, da se končni rezultat ujemanja oblikuje na podlagi primerjanja, ki se že uporablja, in na podlagi na novo implementiranega primerjanja.

Najprimernejši se zdi algoritem za primerjanje grebenov [6], ki skuša združiti prednosti vseh treh različnih pristopov k primerjanju. Algoritem ohrani večino informacije v prstnih odtisih tako kot korelacijske metode, je razločujoč in fleksibilen tako kot primerjanje na podlagi značilk ter odporen protu šumu tako kot metode primerjanja grebenov. Algoritma torej ne moremo jasno uvrstiti v nobenega od treh razredov primerjanja. Največ podobnosti ima z metodami primerjanja grebenov, saj temelji na uporabi grebenov oz. skeleta prstnega odtisa, ki je vmesen rezultat v mnogih algoritmih iskanja značilk (angl. *feature extraction algorithm*).

Avtorji članka so opisan algoritem testirali nad bazo prstnih odtisov FVC2002 [11]. Eksperimentalni rezultati kažejo, da se algoritem obnaša podobno kot primerjanje na podlagi značilk, zanesljivost sistema pa se izboljša s hkratno uporabo obeh pristopov.

Poglavje 2

Primerjanje odtisov na podlagi grebenov

V tem poglavju je opisana implementacija algoritma za primerjanje grebenov [6]. Algoritem je predstavljen in opisan po posameznih korakih. V poglavju 2.1 so splošno predstavljeni koraki algoritma, v poglavju 2.2 je prikazana predstavitev grebenov, v poglavju 2.3 je opisano strukturiranje podatkov, v poglavju 2.4 primerjanje para poravnanih grebenov, v poglavju 2.5 iskanje začetnega baznega para grebenov, v poglavju 2.6 primerjanje vseh grebenov, v poglavju 2.7 računanje stopnje ujemanja in v poglavju 2.8 konsistentne omejitve.

2.1 Splošen opis in koraki algoritma

Algoritem za primerjanje grebenov ugotavlja kakšna je podobnost med grebeni dveh prstnih odtisov. Greben pomeni strukturo, ki povezuje dve značilki. V algoritmu je predstavljen s seznamom koordinat enakomerno vzorčenih točk. Algoritem torej ugotavlja kakšna je podobnost teh točk med dvema prstnima odtisoma.

Algoritem najprej poišče par grebenov, ki si je najbolj podoben. Ta par nato 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 grebenov, 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.

Algoritem je razdeljen na korake, od katerih vsak predstavlja zaokroženo celoto. Tiste, pri katerih je to smiselno, smo v programu implementirali v obliki ločenih metod. Na sliki 2.11 je prikazan diagram poteka (angl. *flowchart*) algoritma za primerjanje grebenov.

2.2 Predstavitev grebenov in predobdelava

Algoritem za primerjanje grebenov kot vhod sprejme dva prstna odtisa, pri čemer je vsak predstavljen kot seznam grebenov prstnega odtisa, posamezen greben pa je predstavljen kot seznam koordinat vzorčenih točk na tem grebenu.

$$F = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$$

$$R_i = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im}\}$$

$$P_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}) \quad (2.1)$$

pri čemer F predstavlja 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} . Število vseh grebenov na prstnem odtisu je n , število vseh točk na grebenu R_i pa m .

Koordinate točk na grebenih pridobimo iz skeleta prstnega odtisa, ki je vmesni rezultat obdelave prstnega odtisa v sistemu FingerIdent. Zaradi šuma v slikah prstnih odtisov lahko pride pri postopku obdelave do pojava napak, kot so: zanke, mostovi, ipd. Z namenom poenostavitve algoritma za primerjanje grebenov je potrebno čim več napak odpraviti:

1. Zaprte grebene je potrebno na določeni točki razcepiti.

2. Grebene, na katerih pride do razcepa, je potrebno razcepiti v tri grebene.
3. Kratke grebene je potrebno odstraniti.

V fazi primerjanja bi bilo nepotrebno in časovno potratno primerjati vse točke na grebenih, zato je smiselno točke enakomerno vzorčiti. V našem primeru smo vse točke vzorčili po formuli

$$d(P_{ij}, P_{ik}) = \frac{v * dpi}{500} \quad (2.2)$$

pri čemer d pomeni dolžino grebena med dvema točkama, P_{ij} in P_{ik} sta poljubni sosednji točki na grebenu R_i , dpi pomeni resolucijo slike prstnega odtisa in v pomeni poljubno pozitivno vrednost. Parameter v smo empirično nastavili na 10.

Za vse omenjene težave, tako odpravo napak kot tudi vzorčenje, je poskrbljeno že tekom obdelave prstnega odtisa v sistemu FingerIdent ali tekom zapisa točk v seznam, zato naknadna obdelava znotraj samega algoritma za primerjanje grebenov ni potrebna.

2.3 Strukturiranje podatkov

Za nekatere operacije, ki jih algoritem izvaja, seznamski predstavitev prstnega odtisa ni primerna. Zaradi tega razloga algoritem povsem na začetku za vsak prstni odtis ustvari še matrično predstavitev. 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.

Matrično predstavitev ustvarimo po naslednjem postopku:

1. Ustvari dvodimenzionalno matriko $M(max_y, max_x)$ samih ničel, pri čemer je max_y največji navpični koordinati (y_{ij}) in max_x največji vodoravni koordinati (x_{ij}) izmed vseh točk v seznamski predstavitvi

prstnega odtisa - SP (2.1). Koordinatno izhodišče matrike M je v tem primeru spodaj levo.

2. Za vsako točko $P_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})$ iz SP vpiši v celico $M(y_{ij}, x_{ij})$ vrednost i , pri čemer i pomeni indeks grebena R_i v seznamski predstavitvi SP .
3. Dobljena matrika M pomeni matrično predstavitev MP .

Tukaj je prikazan primer seznamске in matrične predstavitve za izmišljen prstni odtis (prstni odtis ima dva grebena, vsak izmed grebenov ima štiri točke):

$$SP = \{\{(2, 1), (3, 1), (4, 1), (5, 1)\}, \{(1, 3), (2, 4), (3, 4), (4, 4)\}\}$$

$$MP = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 Primerjanje para poravnanih grebenov

Algoritem primerja poravnana grebena $R_1 = \{P_{1i}\}_{i=1}^m$ in $R_2 = \{P_{2j}\}_{j=1}^n$, ki pripadata vsak drugemu prstnemu odtisu. Najprej primerjamo vsako točko P_{1i} z vsako točko P_{2j} . Poljubni P_{1i} in P_{2j} se ujemata, če je evklidska razdalja med njima manjša ali enaka od praga *ed_th* (*ed_th* smo v našem primeru nastavili na 5, kar smo določili empirično). Ujemanje točk predstavimo z dvodimenzionalno matriko $T(i, j)$, pri čemer $i = 1, \dots, m$ in $j = 1, \dots, n$. T ima koordinatno izhodišče zgoraj levo. $T(i, j) = 1$ pomeni, da se točki P_{1i} in P_{2j} ujemata, $T(i, j) = 0$ pomeni, da ujemanja ni.

Tukaj je prikazana matrika T , ki nastane ob primerjanju izmišljenih grebenov R_1 in R_2 :

$$R_1 = \{(7, 78), (14, 83), (22, 89), (30, 94)\}$$

$$R_2 = \{(7, 78), (15, 83), (23, 88), (31, 94), (40, 99), (48, 105)\}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

V T nato poiščemo najdaljši povezan seznam ujemajočih se točk (angl. *longest point string*). Iskanje takega seznama je opisano v poglavju 2.4.1. Če najdaljši povezan seznam ujemajočih se točk vsebuje vsaj k -th parov točk, se ujemanje teh točk zabeleži (k -th smo v našem primeru nastavili na 3, kar smo določili empirično).

Rezultat primerjanja dveh poravnanih grebenov je lahko neujemanje, ujemanje ali delno ujemanje. Vzroki, da se dva ustrezna grebena dveh prstnih odtisov istega prsta ne ujemata popolnoma, so lahko: šum, nelinearne deformacije, delno prekrivanje in napake pri obdelavi. V primeru, da se dva grebena le delno ujemata, njune dele, ki se ne ujemajo, razcepimo. Tako omogočimo, da kot novi grebeni ostanejo na voljo za kasnejšo primerjavo. Razcepljanje grebenov je opisano v poglavju 2.4.2.

2.4.1 Iskanje najdaljšega povezanega seznama ujemajočih se točk

Z iskanjem najdaljšega povezanega seznama ujemajočih se točk ugotovimo v kolikšni meri se dva grebena ujemata. Uporabili smo podoben postopek kot je opisan v [5].

Medsebojno ujemanje točk grebenov je predstavljeno v matriki T . Iskanje povezanega seznama ujemajočih se točk začnemo iz vsake celice matrike T , za katero velja $T(i, j) = 1$. Seznam ujemajočih se točk predstavljajo pari $\{(p_l, q_l)\}_{l=1}^k$, pri čemer sta p_l in q_l indeksa v R_1 in R_2 . Pari (p_l, q_l) morajo zadostiti naslednjim pogojem:

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

Z zadnjim pogojem dovolimo manjše prekinitve v seznamu ujemaajočih se točk, s čimer naredimo algoritem bolj odporen na šum. Na koncu uporabimo najdaljši povezan seznam ujemaajočih se točk - *LPS*.

Primer najdaljšega seznama ujemaajočih se točk v matriki

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

je

$$LPS = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4)\}$$

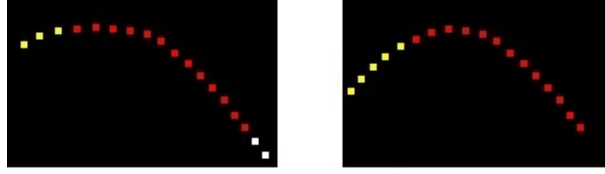
2.4.2 Razcepljanje grebenov

Razcepljanje grebena izvedemo, kadar se greben R_1 le delno ujema z grebenom R_2 , tj. kadar na grebenu R_1 obstajajo točke, ki se s točkami na grebenu R_2 ne ujemajo ali obratno. Neujemaajoče se točke predstavimo kot nov greben in ga vpišemo v seznamsko in matrično predstavitev prstnega odtisa.

Razcepljanje izvedemo na sprednjem in/ali zadnjem delu grebena, vendar le v primeru, ko bo dolžina morebitnega novo nastalega grebena večja ali enaka kot *k.th*. Nasproten primer sicer ne bi bil napačen, vendar ne bi imel nobenega učinka, saj bi bila dolžina najdaljšega povezanega seznama točk ob primerjanju tega grebena v vsakem primeru manjša od *k.th*.

Razcepljanje grebena izvedemo tako za greben R_1 , kot tudi za greben R_2 , torej za oba grebena, ki ju primerjamo.

Primer razcepljanja grebenov je prikazan na sliki 2.1. Rdeče točke se ujemajo, bele točke se ne ujemajo, skupini rumenih točk pa se prav tako ne ujemata in jih odcepimo ter predstavimo kot nova grebena.



Slika 2.1: Razcepljanje grebenov.

2.5 Iskanje začetnega baznega para grebenov

V tem koraku pripravimo seznam potencialnih začetnih baznih parov grebenov $I = \{(R_{1i}, R_{2j})\}$, pri čemer R_{1i} pripada prstnemu odtisu F_1 in R_{2j} prstnemu odtisu F_2 . Začetne bazne pare naj bi sestavljali grebeni, ki se najbolj ujemajo. V seznamu I jih uredimo po padajoči podobnosti. Zgornjih n parov grebenov izberemo kot začetne bazne pare, torej kot vhod v metodo *MatchNearbyRidges*, opisano v 2.6.

Pare grebenov poiščemo tako, da vsak R_{1i} primerjamo z vsakim R_{2j} , ki je enake dolžine. Transformacija med F_1 in F_2 vnaprej ni znana, zato je potrebno za vsak par grebenov, ki ga primerjamo, najprej izračunati lokalno transformacijo in ga poravnati. Pri tem uporabimo postopka opisana v poglavjih 2.6.1 in 2.6.2. Lokalno transformacijo lahko najbolj pravilno izračunamo za grebena, ki sta enake dolžine, zato v primerjavo vključimo le grebene, ki ustrezajo temu pogoju. Stopnjo ujemanja s za par grebenov $p_{ij} = (R_{1i}, R_{2j})$ izračunamo po naslednji formuli:

$$s = \frac{m^2}{size} \quad (2.3)$$

pri čemer m pomeni število ujemajočih se točk in $size$ dolžino grebenov R_{1i} in R_{2j} . Za izračun m uporabimo algoritem za primerjanje para poravnanih grebenov (glej poglavje 2.4). S kvadriranjem m dosežemo, da se pri uvrščanju p_{ij} v I ne upošteva samo proporcionalno ujemanje grebenov, ampak tudi dejansko število ujemajočih se točk. Za grebene z večjim številom ujemajočih se točk je bolj verjetno, da se dejansko ujemajo.

Pomembno je, da se na začetek seznama I uvrsti čim manj parov grebe-

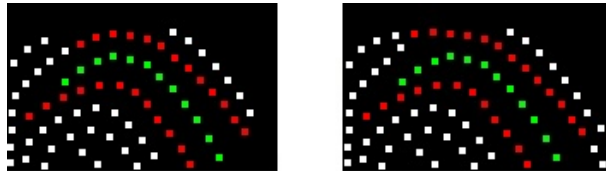
nov, ki so v postopku iskanja po pomoti razpoznani kot ujemajoči se pari. S tem lahko namreč zmanjšamo število iteracij n večjega dela algoritma za primerjanje grebenov in ga tako pohitrimo. S tem namenom pri iskanju začetnih baznih parov uporabimo še dodatni omejitvi:

- Če izračunana rotacija za par p_{ij} presega α , ga ne uvrstimo v I . α smo na podlagi priporočil s tekmovanja FVC 2002 ohlapno nastavili na 45° . Rotacija med slikami prstnih odtisov s tekmovanja naj namreč ne bi presegala 35° .
- Za vsak p_{ij} na obeh straneh poiščemo tudi para sosednjih grebenov np_1 in np_2 . Za iskanje np_1 in np_2 uporabimo postopek iz poglavja 2.6.3. Grebena np_1 in np_2 poravnamo glede na transformacijo izračunano za p_{ij} in ju primerjamo. Za np_1 in np_2 izračunamo stopnji ujemanja po naslednji formuli:

$$sn_i = \frac{m^3}{size1 * size2} \quad (2.4)$$

pri čemer m pomeni število ujemajočih se točk, $size1$ in $size2$ pa dolžini grebenov v np_i . Za izračun vrednosti m uporabimo algoritem iz poglavja 2.4. Stopnji ujemanja sosednjih parov sn_1 in sn_2 prištejemo stopnji s , kar predstavlja končni rezultat. Na podlagi končnega rezultata par grebenov p_{ij} uvrstimo na ustrezno mesto v seznamu I .

Na sliki 2.2 je prikazano računanje ujemanja za potencialni začetni bazni par. Zelene točke predstavljajo ujemanje grebenov R_{1i} in R_{2j} , rdeče pa ujemanje sosednjih grebenov.



Slika 2.2: Računanje ujemanja za potencialni začetni bazni par.

2.6 Primerjanje vseh grebenov

Ob podanem začetnem baznem paru grebenov, lahko sosednje grebene poravnamo in primerjamo. Vsak par ujemajočih se grebenov uporabimo kot nov bazni par in poravnamo ter primerjamo grebene, ki so mu sosednji. Postopek smo implementirali kot rekurzivno metodo *MatchNearbyRidges*, katere diagram poteka je prikazan na sliki 2.12. Kot vhod metoda sprejme ujemajoča se grebena R_1 in R_2 , ki ju uporabi kot bazni par. Natančneje: R_1 predstavlja le tiste točke, ki se ujemajo s točkami v R_2 in obratno. Ob prvem klicu metode kot bazni par uporabimo enega od začetnih baznih parov grebenov.

Metoda deluje na sledeč način: najprej izračunamo lokalno transformacijo med R_1 in R_2 (računanje lokalne transformacije je opisano v poglavju 2.6.1). Nato za vsak par ujemajočih se točk baznega para na obeh straneh poiščemo nove pare grebenov, ki bi se lahko ujeli (skanje sosednjih grebenov je opisano v poglavju 2.6.3). Za vsak nov par grebenov izvedemo poravnavanje in primerjanje, kot je opisano v poglavjih 2.6.2 in 2.4. Na koncu vsak par grebenov, za katerega se je tekom tega klica metode izkazalo, da se ujema, uporabimo kot nov bazni par, torej kot vhod v metodo *MatchNearbyRidges*.

2.6.1 Računanje transformacije

Pri računanju transformacije 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 [19]. Računanje transformacije vključuje računanje translacije in rotacije. Za pravilen izračun transformacije morata biti R_1 in R_2 enake dolžine.

V idealni situaciji velja:

$$\begin{bmatrix} \cos(\Delta\alpha) & -\sin(\Delta\alpha) \\ \sin(\Delta\alpha) & \cos(\Delta\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{2i} \\ y_{2i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1i} \\ y_{1i} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

pri čemer je α kot rotacije in $[\Delta x \ \Delta y]^T$ translacija (slika 2.3). Translacijo izračunamo po formuli:

$$[\Delta x \ \Delta y]^T = [x_{11}-x_{21} \ y_{11}-y_{21}]^T \quad (2.6)$$

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}) .

$$R'_1 = (x'_{1i}, y'_{1i}) = (x_{1i}-x_{11}, y_{1i}-y_{11})$$

$$R'_2 = (x'_{2i}, y'_{2i}) = (x_{2i}-x_{21}, y_{2i}-y_{21})$$

Zaradi poenostavitve spremenljivkama a_1 in a_2 pripišemo naslednje vrednosti:

$$a_1 = \cos(\Delta\alpha)$$

$$a_2 = \sin(\Delta\alpha)$$

Enačba (2.5) se poenostavi v:

$$\begin{bmatrix} x'_{2i} & -y'_{2i} \\ y'_{2i} & x'_{2i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{1i} \\ y'_{1i} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Za izračun kota orientacije α izvedemo (2.7) nad vsemi vzorčenimi točkami. Rešitev metode najmanjših kvadratov za parameter $a = [a_1 \ a_2]^T$ lahko določimo z reševanjem naslednje enačbe:

$$a = [A^T A]^{-1} A^T b \quad (2.8)$$

kjer

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

in

$$b^T = \begin{bmatrix} x'_{11} & y'_{11} & \dots & x'_{1n} & y'_{1n} \end{bmatrix}$$

Kot rotacije α lahko ocenimo iz (2.8). Opazimo naslednje enakosti:

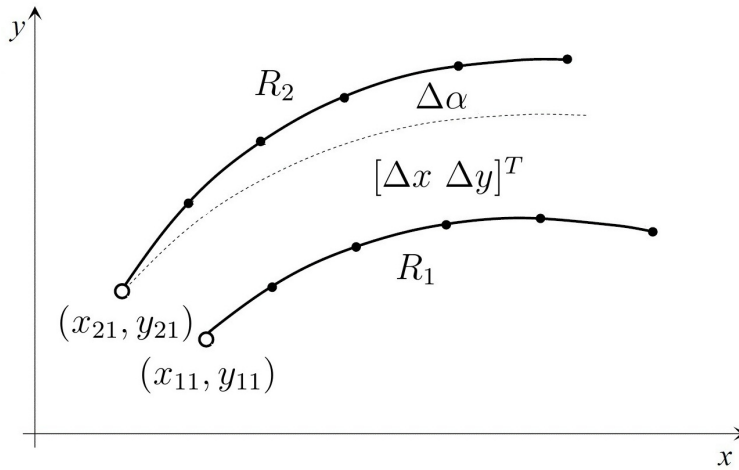
$$A^T A = \begin{bmatrix} \sum((x'_{21})^2 + (y'_{21})^2) & 0 \\ 0 & \sum((x'_{21})^2 + (y'_{21})^2) \end{bmatrix}$$

in

$$A^T b = \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum (x'_{21} * x'_{11} + y'_{21} * y'_{11}) \\ \sum (x'_{21} * y'_{11} - y'_{21} * x'_{11}) \end{bmatrix}$$

Zaradi poenostavitve $A^T b$ v zgornji enačbi zapišemo kot $[b'_1 \ b'_2]^T$. Kot rotacije med dvema grebenoma α izračunamo kot:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{a_2}{a_1}\right) = \arctan\left(\frac{b'_2}{b'_1}\right) \quad (2.9)$$



Slika 2.3: Računanje transformacije med dvema grebenoma.

2.6.2 Poravnavanje grebenov

Grebeni R_1 in R_2 poravnamo tako, da premaknemo R_2 glede na dano translacijo $[\Delta x \ \Delta y]^T$, rotacijo α in bazno točko $(base_x, base_y)$.

Z vpeljavo bazne točke dosežemo, da grebena ne zavrtimo okoli prve točke tega grebena, temveč okoli neke druge točke (bazne točke). To je pomembno, ker v postopku primerjanja dveh prstnih odtisov grebenov ne poravnavamo na podlagi transformacije, ki bi bila izračunana za ta par grebenov, temveč na podlagi transformacije, ki je izračunana za trenutni bazni par grebenov. Če je (R_{B1}, R_{B2}) trenutni bazni par, potem za bazno točko določimo prvo točko grebena R_{B2} .

Greben $R_2 = \{(x_{21}, y_{21}), (x_{22}, y_{22}), \dots, (x_{2m}, y_{2m})\}$ premaknemo po sledečem postopku (slika 2.4). Najprej uporabimo naslednje formule:

$$\Delta x' = \Delta x + base_x \quad (2.10)$$

$$\Delta y' = \Delta y + base_y \quad (2.11)$$

$$a_1 = \cos(\Delta\alpha) \quad (2.12)$$

$$a_2 = \sin(\Delta\alpha) \quad (2.13)$$

Naslednje formule izvedemo za vsako točko grebena R_2 :

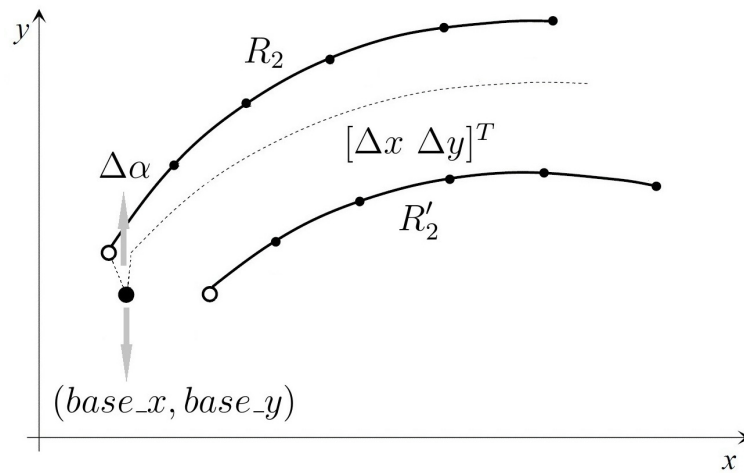
$$x_i = x_{2i} - base_x \quad (2.14)$$

$$y_i = y_{2i} - base_y \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} x'_{2i} \\ y'_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & -y_i \\ y_i & x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Rezultat je poravnan greben

$$R'_2 = \{(x'_{21}, y'_{21}), (x'_{22}, y'_{22}), \dots, (x'_{2m}, y'_{2m})\}$$



Slika 2.4: Premikanje grebena glede na dano transformacijo.

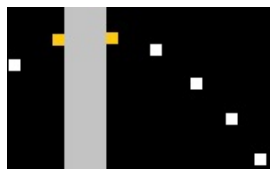
2.6.3 Iskanje sosednjega grebena

Pri iskanju sosednjega grebena želimo najti greben, ki se nahaja poleg grebena R . Algoritem za delovanje potrebuje dve poljubni sosednji točki $P_1 = (x_1, y_1)$ in $P_2 = (x_2, y_2)$, ki se nahajata na grebenu R , matrično predstavitev prstnega odtisa M in spremenljivko s , ki pove na kateri strani grebena R naj iščemo sosednji greben.

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 pregledamo celice v horizontalni liniji. Če naletimo na celico, ki vsebuje vrednost večjo od 0, pomeni, da smo našli sosednji greben. Vrednost celice pomeni indeks grebena v seznamski predstavitvi prstnega odtisa.

V primeru, da želimo za greben R poiskati vse sosednje grebene, algoritem izvedemo nad vsemi pari sosednjih točk grebena R .

Iskanje sosednjih grebenov v vertikalni oz. horizontalni liniji je prikazano na slikah 2.5 in 2.6. Oranžne točke predstavljajo P_1 in P_2 , siva pasova pa območje, ki ga pregledamo.



Slika 2.5: Iskanje sosednjega grebena v vertikalni liniji.



Slika 2.6: Iskanje sosednjega grebena v horizontalni liniji.

2.7 Računanje stopnje ujemanja

Pri računanju stopnje ujemanja dveh prstnih odtisov upoštevamo le območje, kjer se prstna odtisa prekrivata. Najprej za skelet vsakega prstnega odtisa izračunamo zavzeto območje (angl. *convex hull*). Za izvedbo tega postopka smo uporabili Matlabovo funkcijo *bwconvhull* [14]. Prekrivno območje (angl. *overlapped region*) obeh prstnih odtisov izračunamo kot presek zavzetih območij posameznih prstnih odtisov, ki sta poravnana glede na transformacijo izračunano za začetni bazni par grebenov. Stopnjo ujemanja izračunamo po naslednji formuli:

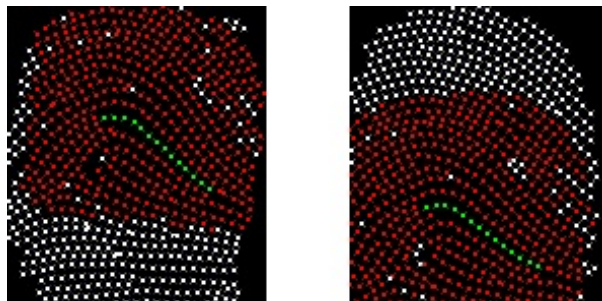
$$score_i = \frac{N_{im}^2}{N_{i1} * N_{i2}} \quad (2.17)$$

pri čemer sta N_{i1} in N_{i2} števili vzorčenih točk grebenov na prekrivnem območju, N_{im} pa je število vseh vzorčenih točk, ki se ujemajo.

V primeru, da je prekrivno območje prstnih odtisov manjše od *o.th*, stopnjo ujemanja nastavimo na 0. S tem preprečimo, da bi dva prstna odtisa različnih prstov, ki se lokalno sicer dobro ujemata, dobila visoko stopnjo ujemanja. V našem primeru smo *o.th* empirično nastavili na 0,20, kar pomeni, da mora biti prekrivanje prstnih odtisov vsaj 20%. Ta omejitev lahko povzroči, da zavrne dva prstna odtisa, ki sicer pripadata istemu prstu. Takih pojavov smo zaznali zelo malo in so tudi bistveno manj problematični kot bi bilo sprejetje dveh prstnih odtisov, ki ne pripadata istemu prstu.

Postopek računanja stopnje ujemanja in s tem tudi postopek primerjanja vseh grebenov, opisanega v 2.6, ponovimo za n najboljših potencialnih začetnih baznih parov grebenov, pri čemer $score_i$ predstavlja stopnjo ujemanja za i -to iteracijo. V našem primeru smo n empirično nastavili na 3. Z večanjem n bi sicer izboljšali zanesljivost sistema, vendar bi hkrati tudi povečali čas, potreben za primerjamo dveh prstnih odtisov. Za končno stopnjo ujemanja dveh prstnih odtisov uporabimo maksimalno vrednost $score_i$.

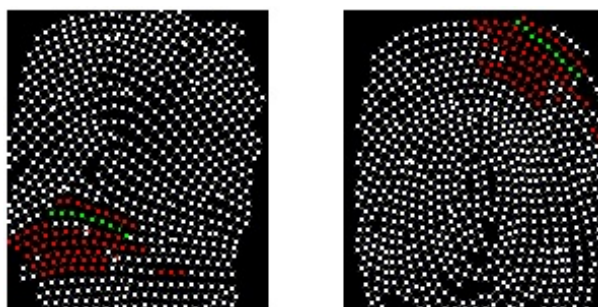
Na sliki 2.7 je prikazano ujemanje prstnih odtisov istega prsta, pri čemer stopnja ujemanja znaša 0,87. Njuno prekrivno območje prikazuje slika 2.8. Sliki 2.9 in 2.10 prikazujeta primer za prstna odtisa dveh različnih prstov s stopnjo ujemanja 0,19.



Slika 2.7: Ujemanje prstnih odtisov istega prsta.



Slika 2.8: Prekrivno območje prstnih odtisov s slike 2.7.



Slika 2.9: (Ne)ujemanje prstnih odtisov različnih prstov.



Slika 2.10: Prekrivno območje prstnih odtisov s slike 2.9.

2.8 Konsistentne omejitve

Z namenom boljše obravnave variacij v strukturah grebenov lahko grebene razcepimo v več krajših grebenov. Posledično se lahko grebeni prstnih odtisov različnih prstov dobro ujemajo. Z uporabo konsistentnih omejitev poskušamo omenjeno težavo 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, ko 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. Omejitve so lahko naslednje:

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

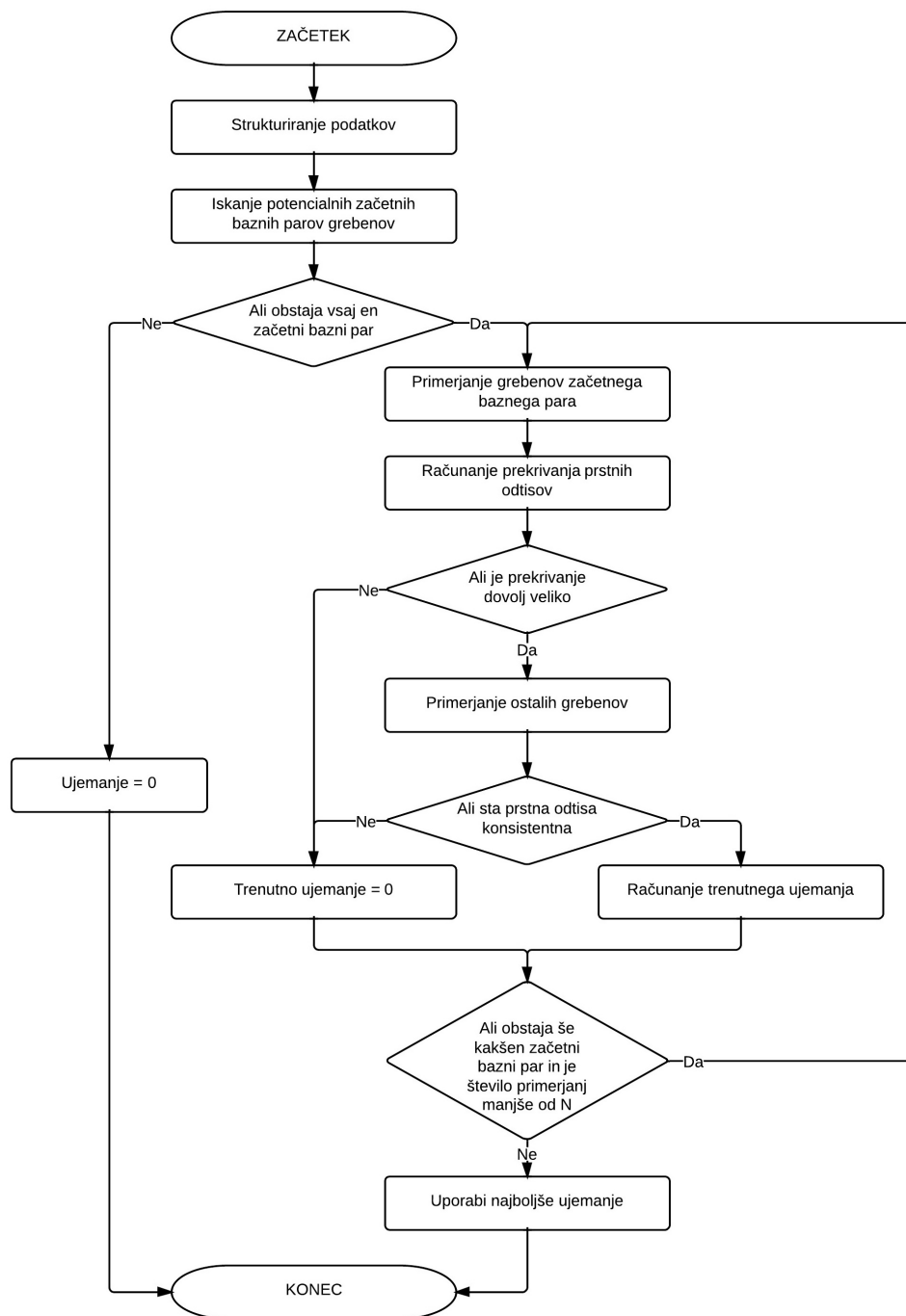
V primeru, da novonastali greben nastane z odcepom prednjega ali zadnjega grebena iz R_2 , zgornji pravili ustrezno prilagodimo.

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. Če je greben r_{1i} nastal z razcepljanjem in se glede na C ne sme primerjati z grebenom r_{2j} , potem c povečamo za eno od naslednjih vrednosti:

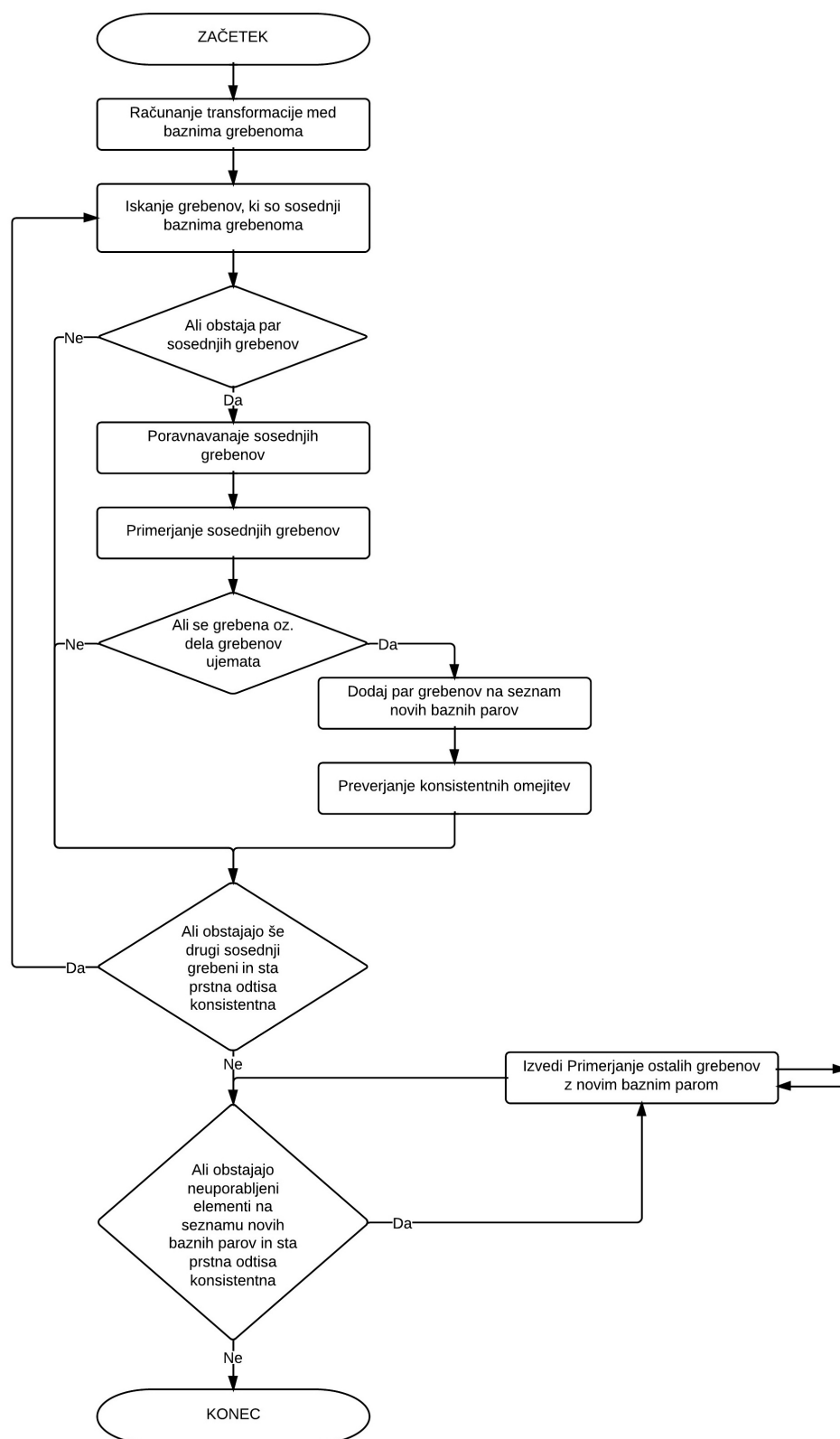
- Če se r_{1i} ne sme primerjati z nobenim grebenom, potem c povečamo za 1
- Če se r_{1i} lahko primerja za določenim grebenom, potem c povečamo za 2

V primeru, da preverjamo konsistentne omejitve za greben r_{2j} , zgornji pravili ustrezno prilagodimo.

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. V našem primeru smo c_{th} empirično nastavili na 90. Z večanjem vrednosti c_{th} bi hkrati tudi večali FMR in manjšali $FNMR$, z manjšanjem c_{th} pa bi naredili obratno.



Slika 2.11: Diagram poteka algoritma za primerjanje grebenov.

Slika 2.12: Diagram poteka metode *MatchNearbyRidges*.

2.9 Uporabljena orodja

Algoritem smo implementirali v programskem jeziku MATLAB in ga kot DLL knjižnico uporabili v sistemu FingerIdent, ki je napisan v programskem jeziku C#. Testiranje smo izvedli na osebem računalniku z dvojedrnim procesorjem Intel Core2Duo 2,53 GHz in 4 GB pomnilnika.

Pri implementaciji in testiranju algoritma smo uporabljali zbirko slik prstnih odtisov, ki je bila ustvarjena za potrebe tekmovanja Fingerprint Verification Competition leta 2002, krajše FVC 2002 [11]. Zbirka sestoji iz štirih različnih množic slik prstnih odtisov (DB1, DB2, DB3, DB4), katerih lastnosti so prikazane v tabeli 2.1.

	tip čitalca	velikost slike	ločljivost
DB1	optični	388x374	500 dpi
DB2	optični	296x560	569 dpi
DB3	kapacitivni	300x300	500 dpi
DB4	SFinGe v2.51	288x384	okoli 500 dpi

Tabela 2.1: Lastnosti podatkovnih zbirk s FVC 2002.

Vsaka množica sestoji iz 110 prstnih odtisov, za vsak prstni odtis pa obstaja osem različnih slik, skupno torej 880 slik na množico. Vsaka množica se deli na učno množico (prstni odtisi od 101 do 110), ki vsebuje 80 slik prstnih odtisov, in testno množico (prstni odtisi od 1 do 100), ki vsebuje 800 slik prstnih odtisov. Za nastavljanje parametrov za vsako zbirko smo uporabili učno množico, za namene testiranja pa testno množico.

Poglavje 3

Integracija v sistem FingerIdent

V tem poglavju je opisana integracija algoritma za primerjanje grebenov v sistem za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa FingerIdent. V poglavju 3.1 je predstavljena metodologija zlivanja algoritmov, v podpoglavju 3.2 pretvorba posamičnih stopenj ujemanja in v poglavju 3.3 zlitje v skupno stopnjo ujemanja. Algoritem za primerjanje na podlagi grebenov smo v sistem FingerIdent integrirali na način, da se končni rezultat ujemanja oblikuje na podlagi primerjanja, ki ga sistem že uporablja (primerjanje na podlagi značilk) ter na podlagi na novo implementiranega primerjanja (primerjanje na podlagi grebenov).

3.1 Metodologija zlivanja

Uporabili smo podobno metodologijo zlivanja (angl. *fusion methodology*) algoritmov primerjanja kot v [13]. V našem primeru smo zlivali dva algoritma za primerjanje prstnih odtisov, od katerih je vsak uporabljal drugačno razločevalno informacijo. Eden je prstna odtisa primerjal na podlagi značilk, drugi na podlagi grebenov. Za prstni odtis, za katerega želimo preveriti identiteto I , je potrebno storiti naslednje:

1. Z vsakim od algoritmov primerjanja primerjamo dani prstni odtis s prstnim odtisom, ki je za identiteto I shranjen v bazi. Vsako ujemanje predstavimo s stopnjo, ki mora biti realna vrednost na intervalu $[0, 1]$.
2. Stopnji posamičnih ujemanj zlijemo v skupno stopnjo ujemanja po naslednji formuli:

$$s = f(s_m, s_r) \quad (3.1)$$

pri čemer s_m in s_r predstavljata stopnji, izračunani z algoritmom za primerjanje na podlagi značilk, oz. z algoritmom za primerjanje na podlagi grebenov.

3. Skupne točke ujemanja s primerjamo z danim odločitvenim pragom t . Danemu prstnemu odtisu potrdimo identiteto I , če velja $s > t$, drugače pa mu identitete ne potrdimo.

3.2 Pretvorba posamičnih stopenj ujemanja

Uporabljena metodologija zlivanja zahteva, da sta stopnji ujemanja, ki jih uporabljena algoritma primerjanja vračata, realni vrednosti na intervalu $[0, 1]$. Pri algoritmu za primerjanje grebenov v tem smislu ni posebnosti, saj je že sam algoritem zasnovan tako, da ustreza temu kriteriju.

Pri algoritmu za primerjanje značilk je nekoliko drugače. Vrednosti, ki jih algoritem vrača niso omejene na $[0, 1]$ in navzgor sploh niso omejene. Za razliko od algoritma za primerjanje grebenov, ki ob primerjanju katerihkoli dveh identičnih prstnih odtisov vedno vrne vrednost 1, algoritem za primerjanje značilk ob primerjanju identičnih odtisov vrača različne vrednosti. Večja kot je vrednost, z večjo verjetnostjo lahko trdimo, da se prstna odtisa ujemata.

Preoblikovanja stopnje ujemanja algoritma za primerjanje značilk smo se lotili tako, da smo naprej testirali ujemanje identičnih prstnih odtisov in analizirali vrednosti, ki jih vrača algoritem. Za testiranje smo uporabili testne množice s tekmovanja FVC 2002. Rezultati so pokazali, da se v povprečju pojavlja vrednost okoli 200, vse vrednosti pa so precej nad optimalnim

odločitvenim pragom. Stopnjo ujemanja smo zato preoblikovali na naslednji način:

$$s_m = \min\left(\frac{s_m}{200}, 1\right) \quad (3.2)$$

S tem smo dosegli, da oba algoritma primerjanja vračata vrednosti na intervalu $[0, 1]$ in da imajo le-te enak pomen. Ob tem majhna vrednost pomeni majhno stopnjo ujemanja dveh prstnih odtisov, velika vrednost pa pomeni veliko stopnjo ujemanja dveh prstnih odtisov.

3.3 Zlitje v skupno stopnjo ujemanja

Pri zlitju posamičnih stopenj ujemanja v skupno stopnjo ujemanja smo uporabili transformacijo temelječo na (3.1). V nadaljevanju so natančneje opisani uporabljeni načini zlivanja [13, 7]:

- Samo primerjanje grebenov: za končni rezultat ujemanja se uporabi samo stopnja ujemanja na podlagi grebenov. V tem primeru pravzaprav ne gre za zlivanje, saj se uporabi vrednost le enega algoritma.

$$s = s_r \quad (3.3)$$

- Zmnožek: končni rezultat ujemanja se izračuna kot zmnožek stopnje ujemanja na podlagi značilk in stopnje ujemanja na podlagi grebenov.

$$s = s_m * s_r \quad (3.4)$$

- Utežena vsota: končni rezultat ujemanja se izračuna kot utežena vsota stopnje ujemanja na podlagi značilk in stopnje ujemanja na podlagi grebenov. Pri tem načinu smo za uteži uporabili več različnih vrednosti.

$$s = (1 - w) * s_m + w * s_r \quad (3.5)$$

- Maksimalna vrednost: za končni rezultat ujemanja se uporabi stopnja ujemanja tistega načina primerjanja, ki vrne večjo vrednost.

$$s = \max(s_m, s_r) \quad (3.6)$$

- Minimalna vrednost: za končni rezultat ujemanja se uporabi stopnja ujemanja tistega načina primerjanja, ki vrne manjšo vrednost.

$$s = \min(s_m, s_r) \tag{3.7}$$

Skupna stopnja ujemanja je realna vrednost na intervalu $[0, 1]$, ki ima enak pomen kot vrednosti, ki jih vračata posamična algoritma primerjanja. Majhna vrednost pomeni majhno stopnjo ujemanja, velika vrednost pa pomeni veliko stopnjo ujemanja dveh prstnih odtisov.

Poglavje 4

Rezultati

V tem poglavju so predstavljeni rezultati testiranja sistema za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa FingerIdent pred in po nadgradnji z algoritmom za primerjanje na podlagi grebenov. V poglavju 4.1 je opisan potek testiranja, v poglavju 4.3 rezultati pred nadgradnjo sistema, v poglavju 4.3 rezultati po nadgradnji in v poglavju 4.4 pomanjkljivosti.

4.1 Potek testiranja

Pri testiranju smo uporabili iste baze slik prstnih odtisov in protokol kot so bili uporabljeni na tekmovanju FVC 2002 [11]. Cilj tekmovanja je bil primerjati algoritme in ponuditi pregled nad razvojem in napredkom tehnologije za samodejno razpoznavanje prstnih odtisov tako v akademski, kot tudi v industrijski sferi. S testiranjem našega sistema nad bazami in uporabo protokola s tekmovanja FVC 2002 smo lahko dobili okvirno primerjavo z ostalimi rešitvami na področju prstnih odtisov.

Pri testiranju smo merili naslednje parametre:

- EER: 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 $FMR \leq 0,1\%$.

Oceno FNMR smo dobili tako, da smo vsak prstni odtis v bazi primerjali z ostalimi sedmimi vzorci istega prstnega odtisa. Oceno FMR smo dobili tako, da smo prvi vzorec vsakega prstnega odtisa primerjali s prvimi vzorci vseh ostalih prstnih odtisov v bazi. Če smo prstni odtis F_1 primerjali s prstnim odtisom F_2 , potem obratne primerjave nismo izvedli, saj bi s tem dobili enak rezultat. Število testov za vsako testno množico je bilo naslednje:

$$\frac{8 * 7}{2} * 100 = 2800 \text{ pri FNMR} \quad (4.1)$$

$$\frac{100 * 99}{2} = 4950 \text{ pri FMR} \quad (4.2)$$

Z namenom čim natančnejše določitve parametrov smo FNMR in FMR izračunali za 10000 različnih odločitvenih pragov (na intervalu $[0, 1]$, v razmikih po 0,0001). Učni korak oz. nastavljanje parametrov pred izvedbo primerjanja na testni množici ni bil potreben, saj smo vse parametre nastavili že tekom implementacije algoritma in so bile njihove optimalne vrednosti za vse učne množice enake. Sistem smo testirali za vse scenarije ujemanja (načine zlivanja), omenjene v poglavju 3.3. Rezultate smo primerjali z rezultati testiranja sistema pred nadgradnjo (samo primerjanje na podlagi značilk). Rezultati so odraz testiranj na testni množici 800 prstnih odtisov za vsako podatkovno zbirko.

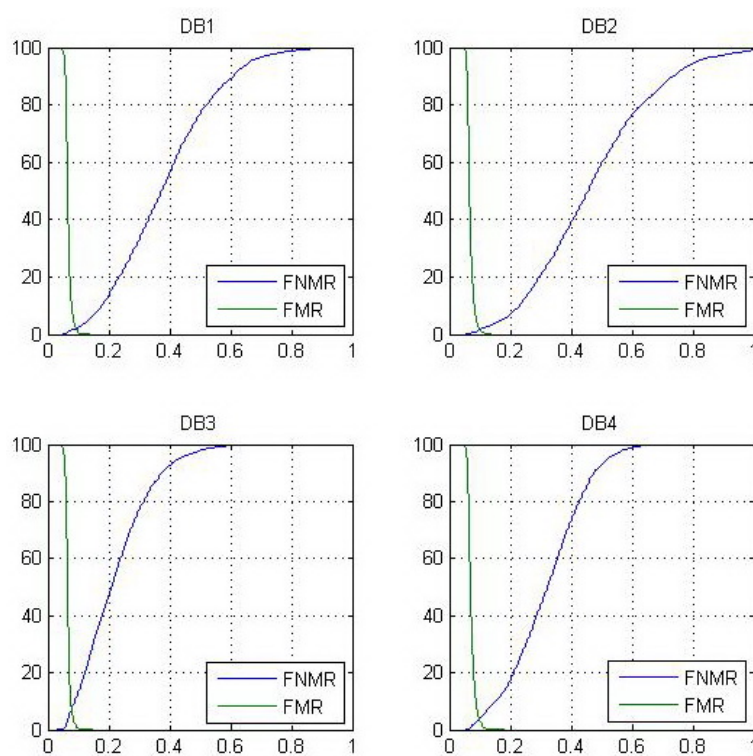
4.2 Rezultati pred nadgradnjo

V tabeli 4.1 in na sliki 4.1 so prikazani rezultati testiranja sistema FingerIdent pred nadgradnjo.

Kot je razvidno iz ROC krivulj sta stopnji FNMR in FMR v veliki medsebojni odvisnosti. Z manjšanjem odločitvenega praga t manjšamo tudi stopnjo FNMR, a hkrati večamo FMR. Z večanjem t manjšamo FMR, a večamo

	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

Tabela 4.1: Parametri (v %) sistema FingerIdent pred nadgradnjo.



Slika 4.1: ROC krivulje sistema FingerIdent pred nadgradnjo.

FNMR. Nobene od vrednosti ni mogoče spreminjati, ne da bi s tem vplivali na drugo.

Vrednosti stopenj lahko določimo glede to, kakšen sistem potrebujemo. Če želimo bolj zanesljiv sistem, je veliko število napačnih sprejemov prstnih odtisov nesprejemljivo, zato poskušamo stopnjo FMR zmanjšati na minimum. Hkratno povečanje števila napačnih zavrnitev je v tem primeru manj problematično. Če potrebujemo manj zahteven sistem, pri katerem je zanesljivost manjšega pomena, lahko v prid preprostejše uporabe zmanjšamo stopnjo FNMR na minimum. S tem se izognemo ponavljanju zajema prstnih odtisov zaradi napačnih zavrnitev. Takšni sistemi največkrat obdelujejo manjše število prstnih odtisov, zato je verjetnost napake tudi pri večjem faktorju FMR manjša [9].

Stopnji FNMR in FMR nista dovolj za oceno zanesljivosti sistema, saj sta odvisni od praga t , ki ga lahko dinamično prilagajamo. Boljši pokazatelj zanesljivosti sistema je stopnja EER, ki ni odvisna od praga t . EER je točka, kjer sta FNMR in FMR enaki, določili pa smo jo s poizkušanjem različnih pragov t . Vendar pa sistemi za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa pogosto ne uporabljajo stopnje EER za nastavljanje odločitvenega praga, saj bi bila stopnja FMR za zanesljiv sistem previsoka. Stopnji FMR100 in FMR1000 sta zato zelo uporabni, saj povesta kakšne stopnje FNMR dosega sistem pri zelo majhnih stopnjah FMR [11].

Za primerjavo sistema FingerIdent pred nadgradnjo smo izbrali najboljši in predzadnji algoritem izmed 31 algoritmov udeleženih na tekmovanju FVC 2002. Zadnjega algoritma nismo podajali, saj je imel stopnjo EER enako 50%. V tabeli 4.2 so podane vrednosti EER za posamezen sistem. Rezultati sistema FingerIdent so nekoliko slabši od najboljšega algoritma iz tekmovanja FVC 2002 in precej boljši od predzadnjega algoritma. Glede na povprečno vrednost EER (3,64%) bi se sistem uvrstil 14. mesto. Sistem dosega najboljše rezultate na testnih množicah DB1 in DB2. Slike prstnih odtisov v teh dveh množicah so bile za razliko od drugih dveh množic zajete z optičnima čitalcema in so tudi kvalitetnejše.

Povprečen čas, ki ga sistem FingerIdent potrebuje za primerjavo dveh

prstnih odtisov je 18 ms. Za primerjavo: najbolje uvrščen algoritem s tekmovanja FVC 2002 je dosegel čas 1970 ms. V ta čas je vključena samo faza primerjanja dveh prstnih odtisov, ne pa tudi faza obdelave, ki jo je potrebno izvesti pred primerjanjem. Obdelava prstnega odtisa vključuje faze vključno od segmentacije do klasifikacije. Povprečen čas, ki ga sistem potrebuje za obdelavo enega prstnega odtisa je 385 ms. Za primerjavo: najbolje uvrščen algoritem s tekmovanja FVC 2002 je dosegel čas 110 ms.

4.3 Rezultati po nadgradnji

V tabeli 4.2 so prikazane vrednosti EER nadgrajenega sistema FingerIdent za vse scenarije ujemanja (načine zlivanja) iz poglavja 3.3.

	DB1	DB2	DB3	DB4
$s = s_r$	9,72	6,46	23,53	15,51
$s = s_m * s_r$	4,23	2,68	13,44	6,21
$s = \max(s_m, s_r)$	8,75	5,04	23,26	14,21
$s = \min(s_m, s_r)$	3,24	2,57	9,19	5,03
$s = 0,5 * s_m + 0,5 * s_r$	6,01	3,14	18,62	9,43
$s = 0,6 * s_m + 0,4 * s_r$	4,61	2,40	16,86	7,54
$s = 0,7 * s_m + 0,3 * s_r$	3,74	1,78	14,74	5,98
$s = 0,8 * s_m + 0,2 * s_r$	2,68	1,18	12,06	4,56
$s = 0,85 * s_m + 0,15 * s_r$	2,14	0,99	10,21	3,74
$s = 0,9 * s_m + 0,1 * s_r$	1,85	0,93	8,44	3,38
$s = 0,95 * s_m + 0,05 * s_r$	1,72	1,07	7,01	3,33
FingerIdent pred nadgradnjo	1,89	1,65	7,33	3,72
najboljši sistem iz FVC 2002	1,10	0,17	0,37	0,10
predzadnji sistem iz FVC 2002	35,0	35,2	42,3	43,96

Tabela 4.2: Stopnje EER (v %) za posamezen scenarij ujemanja v nadgrajenem sistemu FingerIdent.

Zaradi večje preglednosti so vrednosti, pri katerih smo dosegli izboljšanje v primerjavi s sistemom pred nadgradnjo, odebeljene.

Izboljšanje zanesljivosti sistema smo dosegli pri načinu, pri katerem se stopnja končnega ujemanja izračuna kot utežena vsota vrednosti, ki jih vračata algoritem za primerjanje značilk in algoritem za primerjanje grebenov. Rezultat testiranja tega načina se bomo zato nekoliko bolj posvetili. Prav tako bomo nekoliko več pozornosti namenili načinu, pri katerem se za končno stopnjo ujemanja uporabi samo primerjanje na podlagi grebenov. Ta način namreč najbolje pokaže, kakšna je zanesljivost samega algoritma za primerjanje grebenov.

Samo primerjanje grebenov

V tabeli 4.3 in na sliki 4.2 so prikazani rezultati testiranja algoritma za primerjanje grebenov.

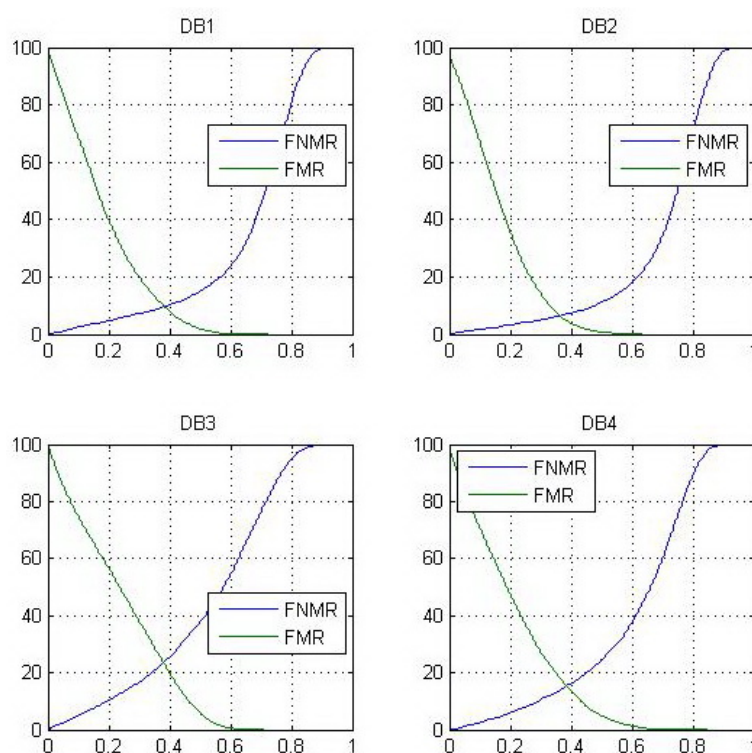
S samim algoritmom primerjanja grebenov v primerjavi s sistemom FingerIdent pred nadgradnjo nismo pri nobenem parametru dosegli izboljšanja. Pri testiranju nad množicama DB1 in DB2 smo se mu sicer približali bolj kot pri DB3 in DB4. DB1 in DB2 vsebujeta kvalitetnejše slike kot DB3 in DB4. Algoritem primerjanja grebenov se torej dobro odreže pri kvalitetnih slikah prstnih odtisov, v nasprotnem primeru pa slabše.

Moteče so visoke stopnje FMR100 in FMR1000 pri testiranju nad DB3 in DB4 ter visoka stopnja ZeroFNMR, ki pri vseh testnih množicah znaša 100%. Slednja težava je predvsem posledica napak pri delovanju algoritma za iskanje potencialnih začetnih parov grebenov. Večkrat se zgodi, da algoritem ne najde pravih začetnih baznih parov, zato stopnja ujemanja dveh prstnih odtisov ostane nizka ali celo 0.

V primerjavi z algoritmi s tekmovanja FVC 2002 bi se naš algoritem glede na povprečno vrednost EER (13,80%) uvrstil na 28. mesto.

	EER	ZeroFMR	ZeroFNMR	FMR100	FMR1000
DB1	9,72	52,96	100,00	18,14	27,11
DB2	6,46	21,68	100,00	10,46	17,64
DB3	23,53	79,04	100,00	51,39	67,04
DB4	15,51	98,07	100,00	41,89	76,11

Tabela 4.3: Parametri (v %) algoritma za primerjanje grebenov.



Slika 4.2: ROC krivulje algoritma za primerjanje grebenov.

Utežena vsota

V tabelah 4.4 in 4.5 in na slikah 4.3 in 4.4 so prikazani rezultati testiranja nadgrajenega sistema FingerIdent za način, pri katerem se stopnja končnega ujemanja izračuna kot utežena vsota vrednosti, ki jih vračata algoritem za primerjanje značilk in algoritem za primerjanje grebenov. Prikazani so rezultati za dva načina uteževanja, ki imata najboljše rezultate.

Največje izboljšanje večine parametrov smo v nadgrajenem sistemu FingerIdent dosegli, ko smo utež algoritma za primerjanje grebenov nastavili na 0,1 in utež algoritma za primerjanja značilk na 0,9. Omenjeno velja predvsem za testne množice DB1, DB2 in DB4, v primeru DB3 pa smo najboljše rezultate dosegli ob utežeh 0,05 in 0,95. V tabelah 4.6 in 4.7 so procentualno prikazana izboljšanja parametrov za omenjeni dve nastavitvi sistema glede na parametre sistema FingerIdent pred nadgradnjo. Vrednosti v tabelah povejo za koliko odstotkov se je zmanjšala vrednost posameznega parametra.

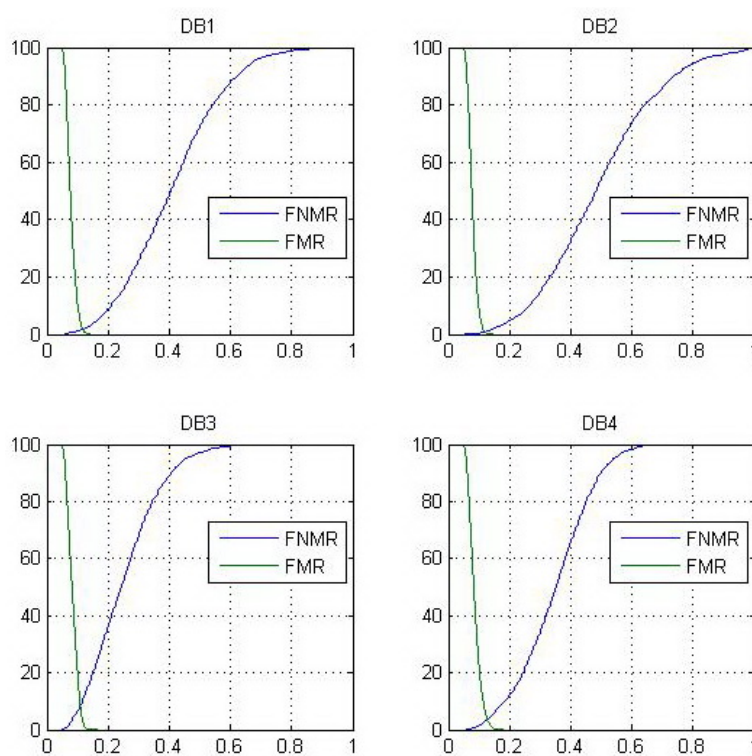
Na DB1 in DB2 smo dosegli izboljšanje nekaterih parametrov tudi ob utežeh 0,15 in 0,85. Pri DB2 celo ob 0,2 in 0,8. Slednje kaže, da v primeru razpolaganja s kvalitetnimi slikami prstnih odtisov, lahko damo algoritmu za primerjanje grebenov večjo težo. Nadgrajen sistem FingerIdent sicer programsko omogoča poljubno nastavitve uteži algoritma primerjanja grebenov w , utež algoritma primerjanja značilk pa se izračuna kot $1-w$.

Nekoliko zmoti poslabšanje parametra ZeroFNMR pri testiranju nad DB2 prav za vse različne uteži. Razlog za to je visoka stopnja ZeroFNMR samega algoritma primerjanja grebenov. To poslabšanje sicer ni kritično, saj je tudi že sama stopnja ZeroFNMR sistema FingerIdent pred nadgradnjo previsoka, da bi bil sistem primeren za uporabo v okoljih (npr. forenzika), kjer se zahteva nizka ZeroFNMR.

Primerjajmo sistem še s sistemi s tekmovanja FVC 2002. Nadgrajen sistem FingerIdent v primerjavi z drugimi sistemi glede na EER dosega podobne rezultate kot pred nadgradnjo. Rezultati so nekoliko slabši od najboljšega algoritma iz tekmovanja FVC 2002 in precej boljši od predzadnjega algoritma. Glede na povprečno vrednost EER bi se sistem z utežmi 0,1 in 0,9 (EER

	EER	ZeroFMR	ZeroFNMR	FMR100	FMR1000
DB1	1,85	3,04	94,22	1,93	2,89
DB2	0,93	1,82	98,38	0,93	1,54
DB3	8,44	25,39	98,79	13,07	20,36
DB4	3,38	9,61	95,07	4,89	8,86

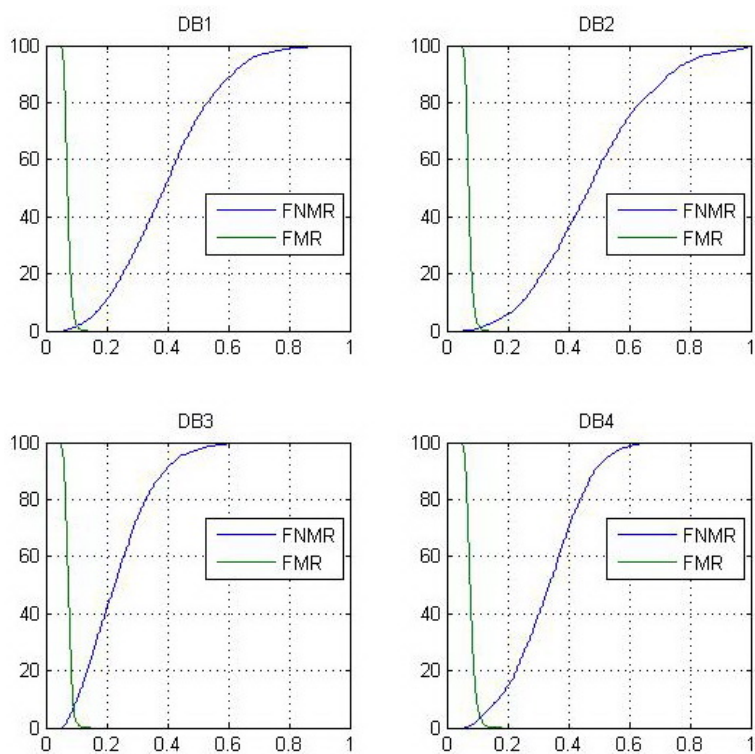
Tabela 4.4: Parametri (v %) nadgrajenega sistema FingerIdent za scenarij ujemanja $s = 0,9 * s_m + 0,1 * s_r$.



Slika 4.3: ROC krivulje nadgrajenega sistema FingerIdent za scenarij ujemanja $s = 0,9 * s_m + 0,1 * s_r$.

	EER	ZeroFMR	ZeroFNMR	FMR100	FMR1000
DB1	1,72	3,86	91,39	1,96	3,11
DB2	1,07	2,50	98,10	1,11	1,89
DB3	7,01	24,39	98,24	11,00	18,75
DB4	3,33	11,79	95,23	5,00	8,39

Tabela 4.5: Parametri (v %) nadgrajenega sistema FingerIdent za scenarij ujemanja $s = 0,95 * s_m + 0,05 * s_r$.



Slika 4.4: ROC krivulje nadgrajenega sistema FingerIdent za scenarij ujemanja $s = 0,95 * s_m + 0,05 * s_r$.

	EER	ZeroFMR	ZeroFNMR	FMR100	FMR1000
DB1	2,02	41,38	4,91	15,62	19,00
DB2	43,69	44,57	/	49,02	44,16
DB3	/	15,25	1,11	/	/
DB4	8,95	33,91	1,90	8,67	1,59

Tabela 4.6: Izboljšanje (v %) parametrov nadgrajenega sistema FingerIdent s scenarijem ujemanja $s = 0,9*s_m + 0,1*s_r$ glede na sistem pred nadgradnjo.

	EER	ZeroFMR	ZeroFNMR	FMR100	FMR1000
DB1	9,02	25,52	7,77	14,06	13,00
DB2	35,07	23,91	/	39,22	31,17
DB3	4,29	18,59	1,66	9,94	/
DB4	10,45	18,92	1,73	6,67	6,75

Tabela 4.7: Izboljšanje (v %) parametrov nadgrajenega sistema FingerIdent s scenarijem ujemanja $s = 0,95*s_m + 0,5*s_r$ glede na sistem pred nadgradnjo.

= 3,65%) uvrstil na 14. mesto, torej enako kot pred nadgradnjo. Sistem z utežmi 0,05 in 0,95 (EER = 3,28%) bi se uvrstil eno mesto višje, torej na 13. mesto.

Povprečen čas, ki ga nadgrajen sistem FingerIdent potrebuje za fazo primerjanja dveh prstnih odtisov je 425 ms. To je vsota časov algoritma za primerjanje značilk (18 ms) in algoritma za primerjanje grebenov (407 ms). Povečanje časa za primerjanje je bilo pričakovano, vendar je sistem glede na stanje pred nadgradnjo postal relativno počasen. 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 do 10-krat več točk prstnega odtisa kot drugi. Čas, ki ga sistem potrebuje za obdelavo enega prstnega odtisa se z nadgradnjo ni bistveno spremenil.

4.4 Pomanjkljivosti in možne izboljšave

Glavna pomanjkljivost algoritma za primerjanje grebenov se nahaja v delu za iskanje potencialnih začetnih baznih parov grebenov. Tu smo naleteli na največ težav, 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. Težavo bi delno lahko odpravili z večanjem števila iteracij algoritma za primerjanje, s čimer bi ujemanje prstnih odtisov preverili za še več različnih začetnih baznih parov grebenov. Vendar bi s tem še povečali čas izvajanja algoritma primerjanja, ki je že precej dolg. Izboljšave bi bilo zato potrebno iskati v smeri dodatnih postopkov, ki bi tekom iskanja potencialnih začetnih baznih parov ugotovili kateri pari se dejansko ujemajo in kateri ne.

Čas izvajanja algoritma za primerjanje grebenov je naslednja pomanjkljivost, ki bi ji veljalo posvetiti več pozornosti. Sistem smo glede na stanje pred nadgradnjo naredili relativno počasen. Povprečen skupen čas primerjanja obeh algoritmov (425 ms) sicer ustreza zahtevam s tekmovanja FVC2002, vendar bi pohitritev naredila sistem bistveno bolj prijeten za uporabo. Algoritem bi najlažje pohitrili s pohitritvijo metode *MatchNearbyRidges* (glej poglavje 2.6), saj se ta metoda v postopku primerjanja dveh prstnih odtisov izvede trikrat in ima poleg tega še veliko rekurzivnih klicev. Z uvedbo dodatnih omejitev bi število rekurzivnih klicev lahko tudi zmanjšali. Smiselno bi bilo razmisliti tudi o implementaciji celotnega algoritma primerjanja grebenov v programski jezik C#, morda celo C ali C++. Z uporabo optimalnejših podatkovnih struktur in paralelnega izvajanja bi lahko dosegli pohitritve.

V tem delu smo za zlivanje algoritmov za primerjanje grebenov in značilk uporabili enostavnejše načine. Smiselno bi bilo preizkusiti tudi druge načine, kot so logična transformacija [13], Neyman-Pearsonovo pravilo [7] in Dempster-Shaferjevo pravilo [2]. Omenjeni načini so bolj zapleteni in potrebujejo učni korak.

Poglavje 5

Zaključek

V tem delu je bil predstavljen algoritem za primerjanje grebenov dveh prstnih odtisov in njegova integracija v sistem za verifikacijo oseb na podlagi prstnega odtisa FingerIdent. Glavni posebnosti algoritma sta razcepljanje grebenov in sprotno izračunavanje transformacije. S tem smo omogočili, da se tolerirajo tudi morebitne nelinearne deformacije prstnih odtisov.

Končni rezultat ujemanja dveh prstnih odtisov v nadgrajenem sistemu se oblikuje na podlagi primerjanja, ki se je že prej uporabljal (primerjanje značilk), in na podlagi na novo implementiranega primerjanja (primerjanje grebenov). Preizkušenih je bilo več načinov zlivanja algoritmov primerjanja. Za najboljšega se je izkazal način, pri katerem se stopnja končnega ujemanja izračuna kot utežena vsota vrednosti, ki jih vračata algoritem za primerjanje značilk in algoritem za primerjanje grebenov. 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%. Omenjene rezultate smo dosegli ob utežeh 0,1 za algoritem za primerjanje grebenov in 0,9 za algoritem za primerjanje značilk.

Zanesljivost sistema FingerIdent smo z integracijo algoritma za primerjanje grebenov izboljšali, vendar smo ga s tem nekoliko upočasnili. Nadgrajen sistem FingerIdent bi bil v smislu zanesljivosti primeren za uporabo v komercialne namene in pogojno primeren v smislu hitrosti primerjanja.

V nadaljnjih raziskavah bi bilo smiselno največ pozornosti posvetiti po-

stopku iskanja potencialnih začetnih baznih parov grebenov. Tu smo naleteli na največ težav, hkrati pa je ta postopek tudi zelo pomemben, saj z izboljšanjem lahko izboljšamo zanesljivost celotnega algoritma primerjanja grebenov in ga naredimo hitrejšega. Izboljšave bi bile možne tudi pri načinu zlivanja algoritmov primerjanja. Smiselno bi bilo preizkusiti še nekatere zahtevnejše načine. V tem delu smo sicer dokazali, da je tudi z uporabo načinov, ki ne potrebujejo učnega koraka, možno doseči izboljšanje zanesljivosti sistema.

Primerjanje prstnih odtisov in hkrati celoten postopek samodejnega razpoznavanja oseb je kompleksen problem, zato smo z doseženimi rezultati zadovoljni. Pri implementaciji algoritma in njegovi integraciji smo se srečali z nemalo problemi, ki smo jih dokaj uspešno rešili. Obstaja pa še precej možnosti za nadaljnje izboljšave.

Slike

1.1	Primer prstnega odtisa.	5
1.2	Delovanje verifikacijskega sistema [12].	7
1.3	Delovanje identifikacijskega sistema [12].	7
1.4	ROC krivulja [12].	7
1.5	Različni vzorci grebenov na globalni ravni: a)leva zanka, b)desna zanka, c)spirala, d)lok, e)šotorast lok [12].	9
1.6	Minutiae in znojne pore [12].	10
1.7	Koraki sistema FingerIdent.	11
2.1	Razcepljanje grebenov.	25
2.2	Računanje ujemanja za potencialni začetni bazni par.	26
2.3	Računanje transformacije med dvema grebenoma.	29
2.4	Premikanje grebena glede na dano transformacijo.	30
2.5	Iskanje sosednjega grebena v vertikalni liniji.	31
2.6	Iskanje sosednjega grebena v horizontalni liniji.	31
2.7	Ujemanje prstnih odtisov istega prsta.	33
2.8	Prekrivno območje prstnih odtisov s slike 2.7.	33
2.9	(Ne)ujemanje prstnih odtisov različnih prstov.	33
2.10	Prekrivno območje prstnih odtisov s slike 2.9.	34
2.11	Diagram poteka algoritma za primerjanje grebenov.	36
2.12	Diagram poteka metode <i>MatchNearbyRidges</i>	37
4.1	ROC krivulje sistema FingerIdent pred nadgradnjo.	45
4.2	ROC krivulje algoritma za primerjanje grebenov.	49

4.3	ROC krivulje nadgrajenega sistema FingerIdent za scenarij ujemanja $s = 0,9 * s_m + 0,1 * s_r$	51
4.4	ROC krivulje nadgrajenega sistema FingerIdent za scenarij ujemanja $s = 0,95 * s_m + 0,05 * s_r$	52

Tabele

2.1	Lastnosti podatkovnih zbirk s FVC 2002.	38
4.1	Parametri (v %) sistema FingerIdent pred nadgradnjo.	45
4.2	Stopnje EER (v %) za posamezen scenarij ujemanja v nadgrajenem sistemu FingerIdent.	47
4.3	Parametri (v %) algoritma za primerjanje grebenov.	49
4.4	Parametri (v %) nadgrajenega sistema FingerIdent za scenarij ujemanja $s = 0,9 * s_m + 0,1 * s_r$	51
4.5	Parametri (v %) nadgrajenega sistema FingerIdent za scenarij ujemanja $s = 0,95 * s_m + 0,05 * s_r$	52
4.6	Izboljšanje (v %) parametrov nadgrajenega sistema FingerIdent s scenarijem ujemanja $s = 0,9 * s_m + 0,1 * s_r$ glede na sistem pred nadgradnjo.	53
4.7	Izboljšanje (v %) parametrov nadgrajenega sistema FingerIdent s scenarijem ujemanja $s = 0,95 * s_m + 0,5 * s_r$ glede na sistem pred nadgradnjo.	53

Literatura

- [1] M.U. Akram, A. Tariq, S.A. Khan, S. Nasir, Fingerprint image: preand post-processing, *International Journal of Biometrics 2008*, 1(1), str. 63-80, 2008.
- [2] J. Fierrez-Aguilar, L. Nanni, J. Ortega-Garcia, R. Cappelli, D. Maltoni, Combining multiple matchers for fingerprint verification: a case study in FVC2004, *International Conference on Image Analysis and Processing ICIAP*, Ur. F. Roli in S. Vitulano, str. 1035-1042, Cagliari, Italija, september 2005.
- [3] J. Bule, M. Tovšak, P. Peer, Ocena kvalitete slike prstnega odtisa, *Mednarodna elektrotehniška in računalniška konferenca ERK*, Ur. B. Zajc, A. Trost, str. 131-134, Portorož, Slovenija, september 2011.
- [4] S.S. Chikkerur, Online fingerprint verification system, M.S.C. thesis, State University of New York at Buffalo, 2005.
- [5] T.H. Cormen, E.C. Leiserson, L.R. Rivest, C. Stein, Introduction to Algorithms, Cambridge (Massachusetts); London: The MIT Press, 2009.
- [6] J. Feng, Z. Ouyang, F. Su, A. Cai: An Exact Ridge Matching Algorithm for Fingerprint Verification, *International Workshop on Biometric Recognition Systems IWBRIS*, Ur. S. Z. Li, Z. Sun, T. Tan, S. Pankanti, G. Chollet in David Zhang, str. 103-110, Beijing, Kitajska, oktober 2005.

- [7] J. Gu, J. Zhou, C. Yang, Fingerprint recognition by combining global structure and local cues, *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(7), str. 1952-1964, 2006.
- [8] L. Hong, Y. Wan, A. Jain, Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(8), str. 777-789, 1998.
- [9] U. Klopčič, Sistem za verifikacijo osebe na podlagi prstnega odtisa, diplomska naloga, Fakulteta za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani, Slovenija, 2009.
- [10] U. Klopčič, P. Peer, Sistem za verifikacijo osebe na podlagi prstnega odtisa, *Računalniška obdelava slik in njena uporaba v sloveniji ROSUS*, Ur. Božidar Potočnik, str. 123-130, Maribor, Slovenija, marec 2010.
- [11] D. Maio, D. Maltoni, R. Cappelli, J.L. Wayman and A.K. Jain, FVC2002: Second Fingerprint Verification Competition, *International Conference on Pattern Recognition ICPR*, str.811-814, Québec City, Kanada, avgust 2002.
- [12] D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, S. Prabhakar, Handbook of Fingerprint Recognition, New York, ZDA: Springer, 2005.
- [13] G.L. Marcialis, F. Roli, and P. Loddo, Fusion of multiple matchers for fingerprint verification, *Workshop on Machine Vision and Perception, Italian Association for Artificial Intelligence AI*IA*, Sienna, Italija, september 2002.
- [14] (2012) Matlabova funkcija "bwconvhull". Dostopno na: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/bwconvhull.html>.
- [15] E. Tabassi, C. Wilson, C. Watson, Fingerprint Image Quality, tehnično poročilo 7151, National Institute of Standards and Technology (NIST), ZDA, 2004.

-
- [16] M. Tovšak, J. Bule, P. Peer, Nadgradnja sistema za verifikacijo na podlagi prstnega odtisa, *Mednarodna elektrotehniška in računalniška konferenca ERK*, Ur. B. Zajc, A. Trost, str. 135-138, Portorož, Slovenija, september 2011.
- [17] P.M. Patil, S.R. Suralkar, F.B. Sheikh, Rotation invariant thinning algorithm to detect ridge bifurcations for fingerprint identification, *International Conference on Tools with Artificial Intelligence ICTAI*, str. 641-649, Hong Kong, Kitajska, 2005.
- [18] F. Zhao, X. Tang, Preprocessing and postprocessing for skeleton-based fingerprint minutiae extraction, *Pattern Recognition*, 40(4), str. 1270-1281, 2007.
- [19] X. Zheng, Y. Wang, Fingerprint matching based on ridge similarity, Acoustics, *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing ICASSP*, str. 1701-1704, Las Vegas, ZDA, marec 2008.