

S-114.240 Hahmontunnistus ihmisläheisissä käyttöliittymissä Kasvojen tunnistus ja identiteetin tarkistus: ZN-Face

Kalle Korhonen
kskorhon@cc.hut.fi
13.4.2000

Tiivistelmä: Raportissa tutustutaan kaupalliseen ZN-face kulunvalvontajärjestelmän [1] toimintaan ja toteutukseen. Järjestelmässä hahmon piirteet on talletettu pieniin (1.6 kB) merkittyihin graafeihin, jotka tunnistetaan elastisen graafinsovitusalgoritmin laajenuksella. Järjestelmä toimii tavallisessa PC:ssä suorittaen kasvojen paikannuksen ja tunnistuksen 3.5 sekunnissa. Se mahdollistaa sekä varman talletettujen henkilöiden tunnistamisen että tuntemattomien henkilöiden hylkäämisen – asetettaessa hyväksymiskynnys hylkäämään kaikki tuntemattomat päästään 99%:n talletettujen henkilöiden tunnistamiseen. [2]

1. Johdanto

Ihmisten synnynnäinen ominaisuus tunnistaa kasvoja valaistuksesta, kasvonilmeistä ja muista häiriötekijöistä huolimatta on kautta aikain haastanut löytämään sitä matkiva algoritmi tai prosessi. Varhaisimmat kasvontunnistusalgoritmit käyttävät kasvonpiirteisiin perustuvaa tunnistusta, jossa tutkitaan selvästi näkyvien piirteiden (esim. kulmakarvat) paikkaa ja ominaisuuksia, tai mallipohjaista tunnistusta, jossa annettua kuvaa verrataan suoraan valmiisiin kasvopohjiin. Uudemmat menetelmät käyttävät mm. kasvojen jakamista eigenfaces-menetelmällä sekä neuraalilaskennallista lähtökohtaa. [1]

Tässä dokumentissa tutustutaan neuraalilaskentaan perustuvaan ZN-face järjestelmään, joka tarkistaa henkilön antaman identiteetin kasvokuvan perusteella paljastaen näin väärällä henkilötunnuksella liikkuvan huijarin. Käytettäessä kasvontunnistusta hälytysjärjestelmässä pitää muistaa myös sen päätavoitteet: mahdollisimman nopea luotettava tunnistus sekä väärin hälytysten pieni todennäköisyys. ZN-Face järjestelmä pystyy tarkistamaan kasvot luotettavasti 99% tarkkuudella [2] taaten täten vähäiset väärin hälytyksen mahdollisuudet.

2. Toiminta

Useimmat kasvontunnistusalgoritmit tarvitsevat erilliset prosessit lokalisaatiolle, erottelemiselle ja tunnistamiselle. ZN-Facen perusalgoritmi on elastisen graafinsovitusmenetelmän laajennus [1], jolloin erillisiä vaiheita ei tarvita, vaan samaa periaatetta voidaan käyttää jokaiseen vaiheeseen yhtäaikaaisesti.

Elastisessa graafinsovitusmenetelmässä [3] kasvoja käsitellään joustavan graafin avulla. Aluksi kuvan pisteistä muodostetaan tiheä neliömäinen graafi, jolle lasketaan piirrevektorit Gabor-aaltofunktioiden avulla. Gabor-aaltofunktiot kiinnittävät karakteristiset visuaaliset piirteet solmukohtiin ja niiden informaatio koostuu globaaleista, epätarkoista sekä paikallisista, suuremman tarkkuuden omaavista piirteistä. Ennen tallettamista

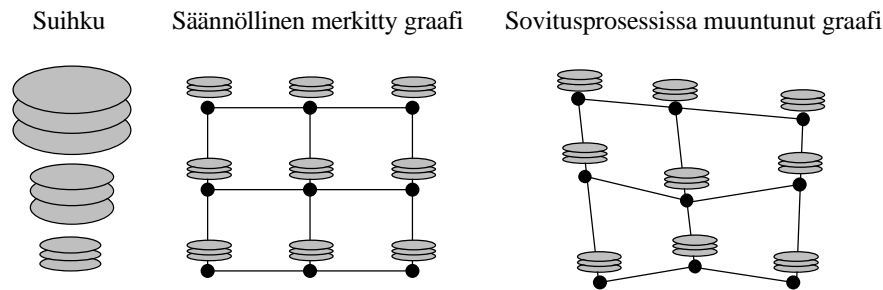
graafista karsitaan tarpeettomat informaatiosisällöttömät pysty- ja vaakarivit [1] ja vain saatu harva, objektin mukaan keskitetty graafi talletetaan.

Tunnistusvaiheessa kuvasta muodostetaan adaptiivisesti talletettuun malligraafiin sopiva valmiiksi harva graafi. Graafinmuodostusta ohjataan kustannusfunktiolla [3], joka suosii malligraafin solmujen samankaltaisuutta ja hylkii graafin neliömäisyydestä poikkeamista. Tapahtuma toistetaan jokaiselle tunnistettavan identiteetin malligraafille, joista valitaan pienimmän kustannusfunktion arvon omaava. Identiteetin tarkistus tehdään muodostamalla samankaltaisuusarvo [1], jota verrataan referenssigrrafeille laskettuihin. Jos niiden ero ylittää hyväksymiskynnyksen tunnistettava kasvo hyväksytään.

2.1 Kuvan esittäminen graafina

Kuvan I graafiesitys perustuu ”dynaamiseen linkki arkkitehtuuriin” (dynamic link architecture). [3] Siinä kuva-alue koostuu kaksiulotteisesta taulukosta solmuja $A_x^I = \{(x, \mathbf{a}) \mid \mathbf{a} = 1, \dots, F\}$, jossa jokainen solmu A_x^I pisteessä x koostuu F :stä eri piirteitä tunnistavasta neuronista (x, \mathbf{a}) , jossa puolestaan \mathbf{a} :aa käytetään erottamaan eri piirteytyypit. Yksinkertaisimmillaan piirteytyypit voivat olla vaikkapa kuvan intensiteettiarvoja, mutta yleensä käytetään monimutkaisia suodatukseen perustuvia tyyppejä kuten tässäkin tapauksessa.

Taulukon solmujen A_x^I arvot lasketaan kameran antamasta harmaasävykuvasta, josta saatu syöte johtaa piirreuronisolmujen (x, \mathbf{a}) aktivaatioon $s_{x\mathbf{a}}^I$. Jokainen solmu A_x^I sisältää joukon useita eri aktivaatiosignaaleja $J_x^I = \{s_{x\mathbf{a}}^I \mid \mathbf{a} = 1, \dots, F\}$, joita nimitetään suihkuiksi (engl. jet). Kaikki solmut ovat myös kytkettyjä lähinaapurustoonsa 4-kytkentäisesti sekä myös itseensä, joten kuva-alaa voidaan hyvin sanoa merkityksi graafiksi (labeled graph). Graafin rakennetta havainnollistetaan kuvassa 1.



kuva 1. Erilaisten graafien ja suihkun kuvaus.

Kuvan graafiesityksen puolesta puhuvat seuraavat seikat: [1]

- *Tiedon pakkaussuhde.* Tavalliseen harmaasävykuvaan verrattuna graafi voidaan tallettaa huomattavasti pienempään tilaan. ZN-facen tapauksessa 128 x 128 kokoinen harmaasävykuva voidaan esittää 1.6 kilotavun kokoisella graafilla, eli tieto pakkautuu kymmenesosaan alkuperäisestä.
- *Skaalaus.* Graafeja voidaan helposti muuttaa geometrisesti koon tai perspektiivin mukaan ilman harmaasävykuvien tarvitsemia monimutkaisia transformaatioita. Tällöin vältetään myös kvantisoinnin tai interpoloinnin aiheuttamilta virheiltiltä.

- *Jakautuneisuus.* Graafi sisältää korkean tason kuvauksen harmaasävykuvan sisällöstä ja sen piirteistä jakautuneena useammalle solmulle. Siksi se on myös hyvin epäherkkä häiriöille – yhden solmun puuttuminen ei siis vaikeuta tunnistusprosessia.

2.2 Graafin solmujen piirteiden laskenta

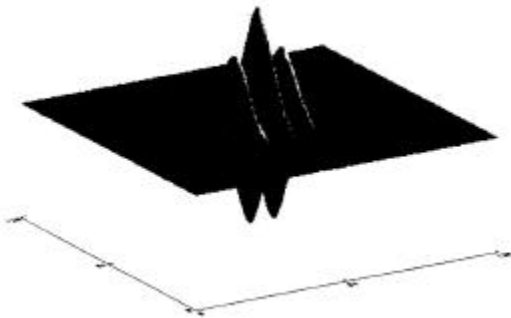
2.2.1 Gabor-aaltofunktiot

Graafin solmujen piirteiden laskenta aloitetaan lineaarisella suodatusoperaatiolla harmaasävykuvulle, jonka harmaatasojakaumaa voidaan merkitä $I(\vec{x})$:llä. Suodatusoperaatio toteutetaan konvolvoimalla Gauss-funktion rajoittamalla tasoallolla $\mathbf{y}_{\vec{k}}$ eli niinsanotulla Gabor tyyppin aaltofunktiolla: [3]

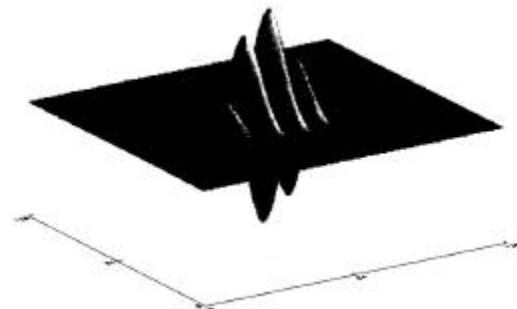
$$\mathbf{y}_{\vec{k}} = \frac{\vec{k}^2}{\mathbf{s}^2} \exp\left(-\frac{\vec{k}^2 \vec{x}^2}{2\mathbf{s}^2}\right) \left[\exp(i\vec{k}\vec{x}) - \exp\left(\frac{\mathbf{s}^2}{2}\right) \right] \quad (1)$$

missä hakasulkujen ensimmäinen termi määrittelee aaltofunktion värähtelevän osan ja toinen kompensoi nollataajuuden amplitudin. Vektori \vec{k} muuttaa Gauss-funktion leveyttä sekä aallonpituutta ja suuntaa. \mathbf{s} puolestaan määrää ikkunan leveyden ja aallonpituuden suhteen – lisäksi tarpeeksi suurilla \mathbf{s} :n arvoilla nollataajuuden amplitudista tulee merkityksetön. Kompleksinen Gabor-aaltofunktio $\mathbf{y}_{\vec{k}}$ koostuu parillisesta ja parittomasta osasta, ks. kuva 2.

a)



b)



kuva 2. Gabor aaltofunktion reaalinen (a) ja imaginäärinen (b) osa arvolla $|\vec{k}| = 0.72, \mathbf{f} = 45^\circ$ [3]

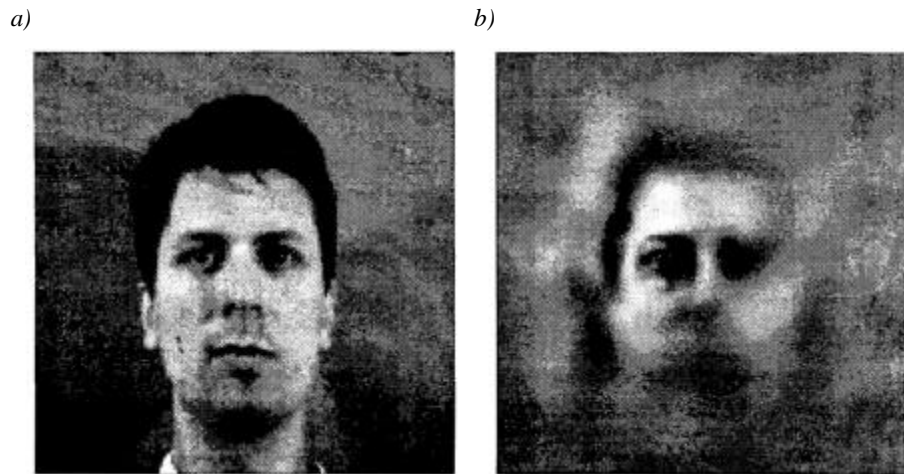
Gabor-aaltofunktion $\mathbf{y}_{\vec{k}}$ aallonpituutta ja suuntaa muuttelemalla saadaan mitattua kuvan kohdassa x_0 olevia piirteitä. Saatuja Gabor-kertoimia $G_{\vec{k}}$ merkitään funktiolla: [4]

$$G_{\vec{k}}(x_0) = \int \mathbf{y}_{\vec{k}}(\vec{x}_0 - \vec{x}) I(\vec{x}) d\vec{x} \quad (2)$$

Operaattori W kuvaa konvoluutiota kaikilla mahdollisilla \vec{k} :n arvoilla ja se lasketaan näytteistysruudukolla sekä spatiaali- (\vec{x}_0) että taajuustasossa (\vec{k}): [3]

$$(WI)(\vec{k}, \vec{x}_0) := \int \mathbf{y}_{\vec{k}}(\vec{x}_0 - \vec{x}) I(\vec{x}) d^2x = (\mathbf{y}_{\vec{k}} * I)(\vec{x}_0) \quad (3)$$

Gabor-aaltofunktioiden hyviä puolia ovat niiden reagoivuus reunaviivoihin sekä invarianttius kuvan globaalien intensiteetin ja kontrastin muutoksille. Myös hahmontunnistuksessa esiintyvät turhat piirteet kuten pään asennot ja ilmeet eivät vaikuta paljoa Gabor-aaltofunktioiden arvoihin. Lisäksi Gabor-aaltofunktioita suosivat neurobiologiset samankaltaisuudet; nisäkkäiden visuaalinen aivokuori sisältää neuroneita, joiden herkkyysskäyrät ovat Gabor-aaltofunktioiden kaltaisia. [1] Jo yhdestä pisteestä saatujen Gabor-kertoimien $G_{\vec{k}}$ avulla voidaan palauttaa suhteellisen hyvän kuvan approksimaatio, jossa pisteen lähellä olevat piirteet palautuvat tarkkoina kauempien jäädessä sumeiksi, ks. kuva3. [4]



kuva 3. Alkuperäinen (a) ja rekonstruoitu (b) kuva. Rekonstruktiossa käytettiin 144 Gabor-kertoimen arvoa keskipisteen ollessa vasemmassa silmässä. [4]

Vaikka Gabor-aaltofunktiot reagoivat suuresti reunaviivoihin, on niissä myös haittapuolensa – reunan kohdalla vaste WI ei ole tasainen piikki, vaan se oskilloi ominaistaajuudellaan aallonpituudella $2p/k$. Tämä voidaan kuitenkin välttää käyttämällä WI :n itseisarvoa, jolloin se saadaan käyttäytymään monotonisesti. [3]

2.2.2 Solmujen laskenta

Taulukon solmujen A_x^l arvot lasketaan näytteistämällä W viiden logaritmisesti hajautetun taajuuden k_v ja kahdeksan suunnan f_m mukaan, joita indeksoidaan $n \in \{0, \dots, 4\}$ ja $m \in \{0, \dots, 7\}$: [3]

$$\vec{k}_{nm} = k_n e^{if_m} \quad (4)$$

missä

$$k_n = k_{\max} / f^n \quad (5)$$

ja

$$f_m = \frac{pm}{8} \quad (6)$$

jossa kertoimella f säädellään Gabor-aaltofunktioiden etäisyyksiä taajuustasossa sekä kertoimella k_{\max} sen leveyttä. Kertoimia k_{\max} ja f valittaessa kannattaa myös muistaa kuvan kohinaisuudesta ja kuva-alueen käytön rajoittuneisuudesta johtuvat taajuusrajoitukset, eli suurilla taajuuksilla sekä leveillä Gabor-aaltofunktioilla esiintuleva laskostuminen.

Saaduista W :n arvoista muodostetaan itseisarvoistamalla x_0 :n piirvektori eli suihku

$$J_{nm}(x_0) := \left| (WI) \left(\vec{k}_{nm}, \vec{x}_0 \right) \right| \quad (7)$$

2.2.3 Solmujen särmien laskenta

Solmujen särmät sisältävät kahden solmun väliset suhteelliset paikat, joita tarvitaan tunnistusvaiheessa estämään graafin solmujen leviäminen naapureidensa ulkopuolelle. Solmujen \vec{x}_i ja \vec{x}_j suhteelliset paikat lasketaan yksinkertaisesti Euklidisena pituusvektorina:

$$\vec{\Delta}_{ij} := \vec{x}_j - \vec{x}_i, \quad (i, j) \in E \quad (8)$$

missä E on solmujen särmäpisteet.

2.3 Elastinen graafinsovitusalgoritmi

Graafinsovituksessa annettua graafia I sovitetaan malligraafiin M siten, että joukko $\{x_i^I\}$ solmunkohtia optimoivat sekä solmujen että niiden särmien paikat malligraafin suhteen. Saatu sovitus lasketaan kahden eri kustannusfunktion avulla. Piirvektoreille J^I ja J^M määritellään seuraava kustannusfunktio

$$S_v(J^I, J^M) := \frac{J^I \cdot J^M}{\|J^I\| \|J^M\|} \quad (9)$$

joka on osoittautunut vastustuskykyiseksi vaihtelevasta valaistuksesta johtuvia kontrastieroja vastaan. [3]

Solmujen etäisyyksille $\bar{\Delta}^I$ ja $\bar{\Delta}^M$ määritellään kustannusfunktio

$$S_e(\bar{\Delta}_{ij}^I, \bar{\Delta}_{ij}^M) := (\bar{\Delta}_{ij}^I - \bar{\Delta}_{ij}^M)^2 \quad (10)$$

Nämä yhdistämällä saadaan lopullinen kustannusfunktio

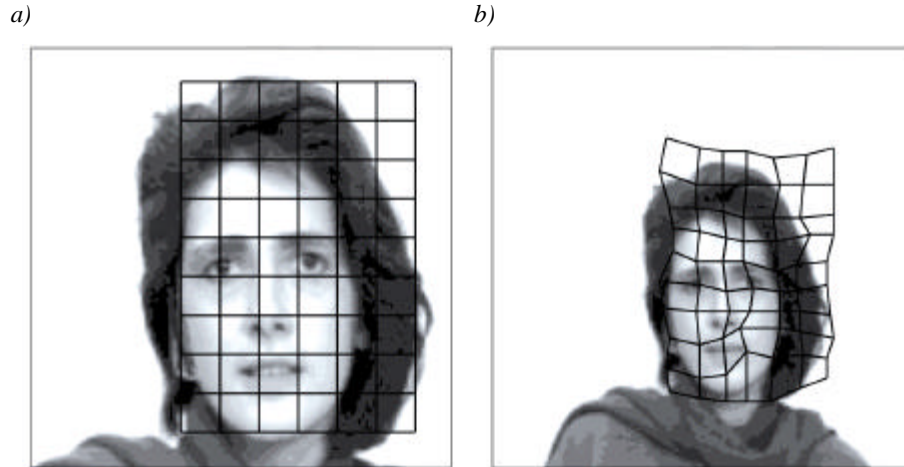
$$C_{total}(\{x_i^I\}) := \mathbf{I} C_e + C_v = \mathbf{I} \sum_{(i,j) \in E} S_e(\bar{\Delta}_{ij}^I, \bar{\Delta}_{ij}^M) - \sum_{i \in V} S_v(J^I(x_i^I), J^M) \quad (11)$$

jossa \mathbf{I} kontrolloi graafin jäykkyyttä sakottaen graafia \mathbf{I} suhteessa malligraafiin \mathbf{M} . Graafin \mathbf{I} jäykkyyttä voidaan myös muuttaa sovituksen edetessä – pidettäessä aluksi graafi täysin jäykkänä eli $\mathbf{I} \rightarrow \infty$ se voidaan kohdistaa malligraafiin käyttäen laskennassa vain C_v :tä kunnes minimi saavutetaan. Kokeissa tämä vaihe on osoittautunut erittäin vakaaksi ja nopeaksi, eikä sen laskennassa tarvita kuin osaa solmupisteistä ja Gabor-aaltofunktioiden taajuuksista. [3] Tämän jälkeen voidaan \mathbf{I} :n arvo laskea äärelliseen arvoon graafin solmupisteiden vääristymisen sallien. Solmupisteiden paikkoja muutetaan satunnaisesti kunnes löydetään C_{total} :n paikallinen minimi. Kumpaakin vaihetta voidaan pitää simuloidun jäähdytyksen kaltaisena.

2.4 Elastisen graafinsovitusalgoritmin laajennus

ZN-face järjestelmässä on elastista graafinsovitusalgoritmia laajennettu huomaamalla mahdollisuus skaalata graafia eri kokoon kuin malligraafi, ks. kuva 4. Menetelmä sallii jopa $\pm 20\text{-}30\%$:n kokoerot, joka on huomattavaa kahdesta eri syystä: [1]

- Optimoidessa graafia kahteen eri suuntaan sekä samalla skaalaamalla sitä etsintävaruutta laajennetaan yhdellä dimensiolla, joka kasvattaa virhetulkinnan mahdollisuutta. Käytännön kokeissa näin ei kuitenkaan käynyt, vaan menetelmä käyttäytyi stabiilisti eri parametrien arvoilla
- Periaatteessa graafin skaalaaminen vaatisi myös Gabor-aaltofunktioiden skaalaamista, joka puolestaan lisäisi tarvittavaa prosessointitehoa. Käytännössä skaalaamattomat Gabor-aaltofunktiot toimivat hyvin skaalattujen approksimaationa. Tämä voidaan käsittää Gabor-aaltofunktioiden ominaisuuksien avulla – ne reagoivat parhaiten kuvan teräviin reunoihin, jotka skaalatessakin pysyvät lähes alkuperäisen kaltaisina.



kuva 4. Mallin talletuksessa käytetty graafi (a) sekä siihen ZN-face järjestelmällä sovitettu graafi (b). [1]

Tämän lisäksi algoritmi muodostaa pienimmän kustannusfunktion aikaan saavalle malligraafille M samankaltaisuusarvon $M \in [0,1]$, jota verrataan referenssimallejen M_{ref} samankaltaisuusarvoon. Tiettyjen ehtojen

$$c_i(M, M_{ref}) > t_i \quad (12)$$

täyttyessä kuvan I ja malligraafin M sovitaan täsmävän ja henkilö todetaan oikeaksi. Termillä t_i tarkoitetaan hyväksymiskynnystä.



3. Toteutus

ZN-face järjestelmä koostuu tavallisesta PC:stä, kuvankaappaajasta ja konsolista, johon sisältyy kamera, näyttö sekä tunnusluvun lukija, ks. kuva5a. [1] Kamera on sijoitettu puoliläpäisevän peilin taakse, jota kääntämällä mahdollistetaan erikokoisten henkilöiden tunnistus. Kohdistettuaan itsensä kamerakuvan keskelle, käyttäjä laukaisee kuvankaappauksen ja antaa tunnuskoodin. ZN-face ei suinkaan tunnista annettua kuvaa kaikkien hahmojen joukosta, vaan tarkistaa sen vain annetun henkilöllisyyden kohdalla vertaamalla sitä henkilöstä muodostettuihin malligraafeihin sekä erillisiin referenssigraafeihin. Lopullinen tunnistuspäätös tehdään kaavan 12 mukaan.

a)



b)

ZNFACE - Protokollinformation	
An Verifikationsstation aufgenommenes Bild	Gespeichertes Bild zur eingegebenen PIN
10012000	konen003
	
An Verifikationsstation eingegebene PIN	Name zur eingegebenen PIN
0012	Konen, Wolfgang
gefundene PIN	Datum / Uhrzeit
0012	17.11.94 15:04
Ergebnis der Verifikation	Station
OK (400)	Haupteingang (2)
OK	Übernahme in Galerie
Bild	
Bild + Graph	

kuva 5. ZN-face järjestelmän prototyypä (a) ja käyttöliittymä (b). [2]

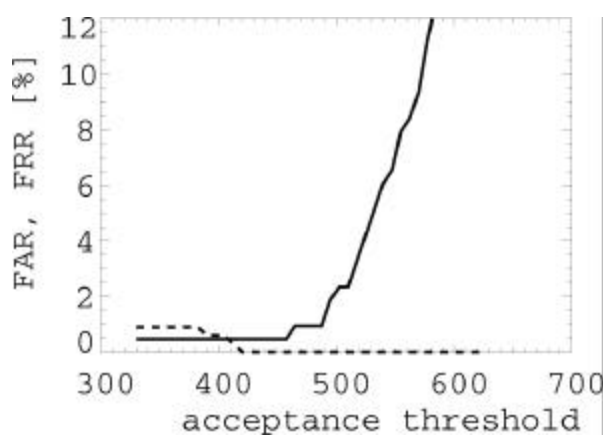
Vaikka kuvan kaappaamisessa käytetään puoli-automaattista menetelmää, jossa itse käyttäjä vaikuttaa lopulliseen tulokseen, ei järjestelmä kuitenkaan välty vaihteluilta pään koossa, suunnassa ja ilmeissä. Myös kameran ja peilin kääntämisessä syntyy virhettä alkuperäiseen, edestä otettuun kasvokuvaan verrattuna. Nämä vaihtelut eivät onneksi vaikuta kovin paljoa elastisen graafinsovitusalgoritmin toimintaan, joka käsittelee jopa silmälasien suuruiset poikkeamat. Jäljelle jäävien häiriötekijöiden vuoksi voidaan järjestelmään tallettaa saman kasvokuvan useita eri versioita.

ZN-face on myös erittäin nopea. Alkuperäinen elastinen graafinsovitusalgoritmi on käännetty tavalliselle PC:lle. Laskenta-aika on saatu optimoitua täydessä tunnituksessa n. 3,5s pituiseksi 90Mhz Pentium-tasoisella laitteella, ilman erillisiä laskentaa nopeuttavia laitteita. Nopeus on osaksi saatu aikaan pelkällä henkilöllisyyden tarkistamisella, eli läpikäytävien graafien määrää on saatu alennettua referenssigrافیen lisäksi vain tunnistettavaan henkilön graafien tasolle. Tämä ominaisuus yhdessä graafin pienen koon (1.6 kB) kanssa mahdollistaa myös suurten tietueiden hallinnan – järjestelmään voidaan syöttää jopa yli tuhat tunnistettavaa kasvoa.

Ohjelman helppokäyttöisyyden lisäämiseksi on siihen toteutettu Windows-pohjainen käyttöliittymä, joka käytön lisäksi mahdollistaa helpon ylläpidon, ks. kuva 5b.

4. Testaus ja tulokset

Menetelmää testattaessa on muistettava kyseessä olevan kulunvalvontajärjestelmä, jolloin pelkkä tunnistettujen kasvojen lukumäärä ei riitä kuvaamaan järjestelmän toimivuutta – testitulosten täytyy kertoa kuinka hyvin järjestelmä hylkää järjestelmässä olemattomien ihmisten kasvot. Nämä virheet on jaettu biometristen tutkimuksen mukaan väärään hylkäämiseen (False Rejection Rate, FRR) ja väärään hyväksyntään (False Acceptance Rate, FAR). Kuvassa 6 nähdään 800 tunnistuksen tulokset (400 oikeaa henkilöä, 400 huijaria) hyväksymiskynnyksen t_i funktiona. [2] Liian alhainen hyväksymiskynnys nostaa väärin hyväksymisten määrää, kun taas liian korkeana se hylkää liiaksi oikeita kasvoja. Näiden arvojen yhdistetty minimi löytyy leikkauspisteestä, jossa sekä FRR että FAR saavat arvon 0.5%. Koska kyseessä on kulunvalvontajärjestelmä, voidaan väärin hyväksymisten määrää pitää huonompana ominaisuutena. Siksi hyväksymiskynnys kannattaa asettaa turvalliselle alueelle (FAR \sim 0%), joka silti tuottaa vaadittavan väärin hylkäämisten määrän (FAR < 1%). Menetelmää on myös esitelty monissa näyttelyissä, kuten CeBit '95 ja '96:ssa, jossa se toimi odotetusti aidossa ympäristössä. Kesästä 1995 lähtien järjestelmää on käytetty myös eräässä suuressa yhtiössä, jossa se on saanut käyttäjien keskuudessa hyvän vastaanoton.



kuva 6. FFR (kiinteä viiva) ja FAR (pisteiviiva) hyväksymiskynnyksen funktiona. [2]

5. Yhteenveto ja pohdinta

ZN-facen toiminta voidaan tiivistää kolmeen eri vaiheeseen [1]:

1. Kuvan konvolointiin jokaisen graafissa käytetyn Gabor-aaltofunktion kanssa
2. Kuvan sovituseseen talletettuun graafiin muuttamalla paikkaa, kokoa ja sisäistä rakennetta. Sakkotermin muuntelulla ohjataan graafin muuntumista sekä vältetään graafin liika vääristyminen.
3. Saadun graafin vertaamiseen malli- ja referenssigraafeihin, sekä hyväksymispäätöksen tekemiseen kaavan 12 avulla.

Vaikka ZN-face mahdollistaa nopean ja varman tunnistuksen on siinä silti parantamisen varaa. Elastinen Graafinsovitusalgoritmi on herkkä varjoille, vaatien siten tasaisen valaistuksen, eikä se myöskään toimi monimutkaisemmilla kuvilla. ZN-face kehitetään edelleen ja siihen ollaan lisäämässä täysin automaattista kasvokuvien kaappaamista sekä kasvontunnistusta monimutkaisemmista kuvista.

6. Viitteet

- [1] W. Konen, F. Schulze-Krüger. Zn-Face: A system for access control using automated face recognition. Int. Workshop on Face and Gesture Recognition, 1995.
- [2] M. Hormel, W. Konen, S. Fuhrmann, A. Flugel. Neural systems for complex identification tasks: the access control system ZN-Face and the alarm identification SENECA. Int. Conference on Artificial Neural Networks, 1995
- [3] M. Lades, J. Vorbrüggen, J. Buhmann, J. Lange. Distortion invariant object recognition in the dynamic link architecture. IEEE Transaction on Computers, 42:300-311, 1993.
- [4] J. Buhmann, J. Lange, C. von der Malsburg. Distortion invariant object recognition by matching hierarchically labeled graphs. Int. Conference on Neural Networks, 1989