

VILNIAUS UNIVERSITETAS

Justas Kranauskas

ASMENS IDENTIFIKAVIMAS PAGAL VEIDĄ IR AKIES RAINELEŲ

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, informatika (09 P)

Vilnius, 2010

Disertacija rengta 2005-2009 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas:

doc. dr. Algirdas Bastys (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, informatika - 09 P)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Informatikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas:

prof. habil. dr. Feliksas Ivanauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, informatika - 09 P)

Nariai:

prof. dr. Algimantas Juozapavičius (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, informatika - 09P)

prof. dr. Vytautas Kleiza (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, informatika - 09P)

prof. habil. dr. Šarūnas Raudys (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, informatika - 09P)

prof. habil. dr. Adolfas Laimutis Telksnys (Matematikos ir informatikos institutas, fiziniai mokslai, informatika - 09P)

Oponentai:

doc. dr. Jonas Gediminas Punys (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, informatika - 09P)

doc. dr. Rimantas Vaicekuskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, informatika - 09P)

Disertacija bus ginama viešame Informatikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2010 m. vasario mėn. 11 d. 14 val. Vilniaus universiteto Informacinių technologijų centre.

Adresas: Šaltinių g. 1A, LT-03214, Vilnius

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. sausio mėn. 10 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bibliotekoje.

VILNIUS UNIVERSITY

Justas Kranauskas

PERSON IDENTIFICATION BY FACE AND IRIS

Summary of Doctoral Dissertation
Physical Sciences, Informatics (09 P)

Vilnius, 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius University in 2005-2009.

Scientific Supervisor

Assoc. Prof. Dr. Algirdas Bastys (Vilnius University, Physical Sciences, Informatics - 09 P)

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Informatics at Vilnius University:

Chairman

Prof. Dr. Habil. Feliksas Ivanauskas (Vilnius University, Physical Sciences, Informatics - 09 P)

Members

Prof. Dr. Algimantas Juozapavičius (Vilnius University, Physical Sciences, Informatics - 09 P)

Prof. Dr. Vytautas Kleiza (Kaunas University of Technology, Physical Sciences, Informatics - 09 P)

Prof. Dr. Habil. Šarūnas Raudys (Vilnius University, Physical Sciences, Informatics - 09 P)

Prof. Dr. Habil. Adolfas Laimutis Telksnys (Institute of Mathematics and Informatics, Physical Sciences, Informatics - 09 P)

Oponents

Assoc. Prof. Dr. Jonas Gediminas Punys (Kaunas University of Technology, Physical Sciences, Informatics - 09 P)

Assoc. Prof. Dr. Rimantas Vaicekaskas (Vilnius University, Physical Sciences, Informatics - 09 P)

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Informatics at Vilnius University Information Technology Center, at 2 p.m. on 11 February 2010.

Address: Šaltinių g. 1A, LT-03214, Vilnius.

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 10 January 2010.

A copy of doctoral dissertation is available for review at the library of Vilnius University.

1 Įvadas

1.1 Tiriamoji problema

Automatinis asmens identifikavimas pagal biometrinius požymius turi daugybę taikymų, pradedant patogiu prisijungimu prie informacinės sistemos ar pradedant darbą asmeniniu kompiuteriu ir baigiant panaudojimu aukšto saugumo lygio reikalaujančiose sistemose, tokiose kaip valstybių sienų kirtimo kontrolės ir demokratiškesnių rinkimų užtikrinimas. Patraukliausios biometrinės sistemos yra tos, kurioms nereikia kontakto su asmens kūnu, kad atliktų biometrinius matavimus, ir kurios gali užfiksuoti asmens biometrinius požymius be jokios sąveikos su sistemos naudotoju, netgi jam apie tai nieko nežinant.

Pastarąjį dešimtmetį ypač tapo populiarios biometrinės sistemos, pagrįstos atpažinimu pagal veidą. Buvo manoma, kad jos pigiai išspręs daugybę problemų, nes visame pasaulyje įdiegta galybė stebėjimo kamerų, kurios nekrenta į akis ir kurių pagalba būtų galima atlikti asmenų identifikavimą jų pačių apie tai net neinformuojant. Kol visuomenė diskutavo dėl tokiu būdu ribojamo privatumo, o didžiosios valstybės kariavo su terorizmu, diegdamos veidų stebėjimo sistemas visuose pagrindiniuose oro uostuose, mokslininkai sparčiai tobulino veidų atpažinimo algoritmus. Deja, didžioji patobulinimų dalis buvo atlikta, atpažįstant veidus aukštos kokybės nuotraukose, o tokie vaizdai yra tikra retenybė iš stebėjimo kamerų gaunamuose video srautuose. Nepaisant to, susidomėjimas veidų atpažinimo technologijomis nesumažėjo, ir net paskatino diegti stebėjimo sistemose vis tobulesnes aukštesnės raiškos stebėjimo kameras. Kita vertus, yra daugybė atpažinimo pagal veidą principų taikymo kitose srityse.

Tuo tarpu atpažinimas pagal akies rainelę jau gerą dvidešimtmetį reklamuojamas kaip pats stabiliausias ir tiksliausias būdas identifikuoti asmenį (išskyrus DNR). Be to, panašiai kaip ir veido, akies rainelės fotografiją galima gauti be tiesioginio kontakto su asmens kūnu.

Šio darbo tiriamoji problema yra asmens identifikavimas pagal biometrinius veido ir akies rainelės matavimus, kurie gali būti atlikti per atstumą arba net judant subjektui (pavyzdžiui, tiesiog praeinant pro kamera). Veido ir akies rainelės biometriniai

matavimai asmens identifikavimui gali būti naudojami tiek atskirai ir nepriklausomai, tiek ir kombinuojant juos kartu.

1.2 Darbo aktualumas

Veido atpažinimas – tai viena iš natūraliausių biometrių, nes žmonės sugeba atpažinti asmenis pagal veidą ypač gerai. Ir nors vieni iš naujesnių tyrimų parodė, kad egzistuoja veidų atpažinimo algoritmai, kurie atlieka šį darbą geriau už vidutinį žmogų, didelė jų taikymo įvairovė nuolat skatina tikslesnių ir nepriklausomų nuo kintančio apšvietimo, veido išraiškos, posūkio erdvėje, barzdos ar ūsų, akinių ar kitų išvaizdos keitimo būdų algoritmų kūrimą. Naujos vaizdo kamerų technologijos įgaliavo kartu su veidu nufilmuoti ir dažnai nepastebimą veido fone biometrią – akies rainelę. Nepaisant to, kad abi šias biometrikas naudojančios atpažinimo algoritmai yra nuolatos po truputį tobulinami, jų kombinavimas atpažinimo tikslumą pagerina žymiai geriau.

Rinkoje jau egzistuoja keletas tokių atpažinimo sistemų (taip pat buvo publikuoti keli pristatymai, daugiausiai reklaminio pobūdžio), kurios kombinuoja atpažinimą pagal veidą ir akies rainelę, pasinaudodamos naujomis vaizdo kamerų technologijomis. Tačiau jos dažnai remiasi tik akies rainelės atpažinimu, kadangi tokiu būdu galima panaudoti dvi beveik nepriklausomas biometrikas – dviejų akių raineles. Iš kitos pusės, filmuojant akies raineles per didesnę atstumą neišvengiamai atsiranda papildomas triukšmas, kuris nepasitaiko tradiciniuose akies rainelių filmavimo įrenginiuose, pastarieji, savo ruožtu, griežčiau riboja filmavimo sąlygas ir tokiu būdu gauna geresnės kokybės vaizdą. Tokiu būdu, filmuojant akies rainelę per didesnę, nei įprasta, atstumą gaunamas gerokai prastesnis atpažinimo tikslumas, todėl, papildomai panaudojus atpažinimą pagal veidą, tikimasi pagerinti bendrą atpažinimo tikslumą.

1.3 Darbo tikslai ir užduotys

Pagrindinis šio darbo tikslas yra išanalizuoti geriausius atpažinimo pagal veidą ir akies rainelę algoritmus, pasiūlyti, kaip patobulinti atpažinimo tikslumą ir greitį, bei realizuoti šiuos algoritmus, kad jie būtų visiškai paruošti asmens identifikavimo sistemai, kuri pasinaudotų abiejų biometrių stiprybėmis, sukurti. Iškeltiems tikslams

pasiekti buvo suformuluotos šios užduotys:

1. Išanalizuoti esamus atpažinimo pagal veidą ir akies rainelę metodus.
2. Pasiūlyti patobulinimus pradiniam veidų atpažinimo iš vienos veido fotografijos algoritmui, kurio pagrindas yra Gaboro požymiai, orientuojantis į greitį ir atpažinimo kokybę.
3. Ištestuoti ir įvertinti kiekvieno veidų atpažinimo žingsnio įtaką verifikavimo ir identifikavimo tikslumui.
4. Sukurti realiu laiku veikiančią akies rainelės vaizdo segmentavimo algoritmą.
5. Pasiūlyti naują lokaliais požymiais paremtą akies rainelės tekstūros kodavimo būdą.
6. Pasiūlyti naują lokalių požymių palyginimo metodą, kuris papildytų tradicinį binarinių požymių palyginimo būdą.
7. Pasiūlyti, kaip kombinuoti veido ir akies rainelės biometrikas vienoje asmens identifikavimo sistemoje ir įvertinti tokios sistemos charakteristikas.

1.4 Mokslinis naujumas

Pasiūlytas veidų atpažinimo metodas yra pagrįstas tradicine identifikavimo iš vienos veido fotografijos schema: realiu laiku veikiantis veido nuotraukoje aptikimas, Gaboro požymių išskyrimas ir klasikinis dviejų požymių vektorių panašumo įvertinimas. Nors šie žingsniai yra paprasti ir dažnai naudojami atpažinime pagal veidą, šiame darbe pasiūlyta unikali jų kombinacija ir detali kiekvieno žingsnio analizė:

- Geometrinė normalizacija - pasiūlyti optimalūs naudojamiems Gaboro požymiams veido dydis (buvo vertinamas atstumas tarp akių taškeliais) ir požymiams apskaičiuoti naudojamo stačiakampio dydis bei pozicija.
- Fotometrinių normalizacijų - buvo išanalizuoti trys metodai. Pirmasis jų neįtakoją atpažinimo pagal veidą kokybės pasirinktiems Gaboro požymiams, nors yra vienas iš modernesnių ir plačiai naudojamas kitose publikacijose, o kiti du

davė panašius rezultatus, t.y. žymiai pagerino atpažinimo kokybę. Tokiu būdu parodyta, kad tai esminis atpažinimo pagal veidą žingsnis.

- Naudojamų požymių kiekis - buvo pasiūlytas optimalus taisyklingas išretintas tinklėlis, kurio susikirtimo taškuose buvo skaičiuojami Gaboro požymiai.

Pasiūlytas ypač spartus Gaboro požymių apskaičiavimas erdvinėje srityje įgalino išskirti veido požymius iš veido fotografijos realiu laiku. Pasiūlytas metodas yra visada spartesnis už tiesioginį Gaboro požymių apskaičiavimą ir netgi greitesnis už jų skaičiavimą dažnių srityje, kai naudojamo vaizdo kraštinių dydžiai nėra patogūs greitajai Furjė transformacijai (taškelių skaičius horizontalia ir vertikalia kryptimis nėra dvejetainio laipsnis).

Gabor požymių palyginimo metodas taip pat buvo modifikuotas, dviem vienas kitą papildančiais būdais: vietoje vieno daugelio dimensijų požymių vektoriaus suformuojant daug požymių vektorių ne tik pagal Gaboro filtrų kryptis, kas jau yra sutikta literatūroje, kai Gaboro požymiu laikomi keletas to paties dažnio ir skirtingų krypčių Gaboro filtrų, bet ir pagal Gaboro filtrų dažnius. Pasiūlyta modifikacija nereikalauja papildomų požymių, pagerina atpažinimo tikslumą ir gali būti naudojama ne tik veidų, bet ir kitų objektų atpažinimui, kam dažnai yra naudojami Gaboro požymiai.

Galų gale, pasiūlytas veidų atpažinimo metodas tikslumu smarkiai lenkia ne tik kitus publikuotus veidų atpažinimo iš vienos fotografijos metodus, bet ir yra tikslesnis už tuos publikuotus algoritmus, kurie papildomai turi mokymo žingsnį, naudojančią dalį duomenų bazės veidų.

Pasiūlytas akies rainelės atpažinimo algoritmas yra pagrįstas naujovišku tekstūros kodavimo metodu, kurio pagrindą sudaro lokalūs daugelio skalių funkcijos skleidinio Teiloro eilutėmis ekstremumai. Dviejų lokalių ekstremumų aibių palyginimo metodas yra unikalus, nes sugeba ištaisyti smulkias akių rainelių segmentavimo žingsnių klaidas, be to, atpažinimo tikslumu prilygsta geriausiems publikuotiems algoritmams.

Pasiūlytas dar vienas tuo pačiu pagrindu tekstūros kodavimo metodas, kuris yra labai artimas tradiciniams Daugmano tipo binariniais požymiais. Jeigu abu metodai naudojami kartu (ką galima daryti be papildomų skaičiavimų požymių išskyrimo

žingsnyje), atpažinimo kokybė smarkiai gerėja ir pralenkia geriausius publikuotus metodus.

Parodyta, kaip veidų ir akies rainelės atpažinimo algoritmus galima kombinuoti panašumo reikšmių lygyje ir sėkmingai taikyti asmens identifikavimo sistemoje, tokiu būdu dar labiau pagerinant atpažinimo kokybę.

1.5 Praktinė reikšmė

Pasiūlyti veidų ir akies rainelių atpažinimo metodai yra visiškai paruošti ir gali būti naudojami kaip pagrindiniai algoritmai asmens identifikavimo sistemoje arba atskirai, arba kartu. Šiuolaikinis asmeninis kompiuteris sugebėtų atlikti išsamų asmens identifikavimą naudodamasis pasiūlytais metodais realiu laiku ypač dideliu tikslumu, o tai yra vienas svarbiausių kriterijų taikant biometriją realiose sistemose.

1.6 Ginamieji teiginiai

1. Padidintas Gaboro požymių išskyrimo iš veido fotografijos greitis neprarandant tikslumo įgalino panaudoti juos realaus laiko veidų atpažinimo metodui sukurti.
2. Išanalizuoti ir pasiūlyti geresni parametrai kiekvienam iš tipinio veidų atpažinimo iš vienos fotografijos metodo žingsniui. Tai leido pasiekti tokį verifikacijos ir identifikacijos tikslumą, kuris smarkiai lenkia tokio tipo algoritmus, ir yra palyginamas su metodais, kurie naudoja mokymo žingsnį ir daugiau nei vieną paveiksluką atpažinimui.
3. Pasiūlytas Gaboro požymių palyginimo metodas, kuris pakartotinai panaudoja tuos pačius požymius ir suformuoja didelį kiekį mažai dimensijų turinčių vektorių pagal Gaboro filtrų kryptis ir dažnius. Taip, be papildomų požymių išskyrimo, pasiekiamas tikslumas, kuris lenkia geriausius publikuotus metodus.
4. Pasiūlytas akies rainelės tekstūros kodavimo metodas daugelio skalių funkcijos skleidinio Teiloro eilutėmis dviem vienas kitą papildančiais būdais - tradiciniais binariniais požymiais ir nauju lokalių ekstremumų aibe.
5. Pasiūlyta lokalių ekstremumų aibių panašumo metrika, kuri eliminuoja mažus akies rainelės segmentavimo netikslumus ir kokybe nenusileidžia geriausiems

publikuotiems metodams.

6. Pasiūlytas metodas kombinuoti šiuos du skirtingus akies rainelės tekstūros pavaizdavimus atpažinime ir taip dar labiau pagerinti atpažinimo tikslumą.
7. Pasiūlytas metodas kombinuoti veido ir akies rainelės biometrikas, kad būtų pagerintas asmens identifikavimo tikslumas, kai akies rainelė filmuojama per didesnę nei įprasta atstumą. Kadangi pasiūlyti veido ir akies rainelės atpažinimo metodai yra šiek tiek panašūs - jie abu lygina tekstūras, tai juos paprasta kombinuoti panašumų įverčių lygyje. Atpažinimo tikslumas buvo įvertintas Multiple Biometrics Grand Challenge Version 2 testu, kuris parodė kad pasiūlytas metodas nenusileidžia geriausiems pasaulyje komerciniams algoritmams.

1.7 Darbo rezultatų aprobavimas

Darbo rezultatai buvo pristatyti šiose konferencijose:

1. "The Multiple Biometrics Grand Challenge Workshop III", 4 December 2009, Washington (USA) - tikslumo įvertinimui ir palyginimui pateikti veido, rainelės bei veido ir rainelės atpažinimo algoritmai.
2. "The 3rd IAPR/IEEE International Conference on Biometrics", 2-5 June 2009, Alghero (Italy) - skaitytas pranešimas "Iris Matching by Local Extremum Points of Multiscale Taylor Expansion".

2 Atpažinimas pagal veidą

2.1 Gaboro požymiai

Gaboro požymis tai kompleksinių Gaboro filtrų rinkinys:

$$\begin{aligned} G(x, y, \theta, f) &= e^{-\frac{x_\theta^2 + y_\theta^2}{2\sigma^2}} \cos(2\pi f x_\theta + \phi), \\ x_\theta &= x \cos \theta + y \sin \theta, \\ y_\theta &= -x \sin \theta + y \cos \theta, \end{aligned} \tag{1}$$

kur $\theta \in [0, \pi)$ yra filtro kryptis, f yra filtro dažnis, σ yra Gauso funkcijos parametras - standartinis nuokrypis, o $\phi \in \{0, \frac{\pi}{2}\}$ žymi realiąją ir menamąją kompleksinio filtro dalis.

Darbe pasiūlomas metodas, kaip išnaudojant Gaboro filtrų simetriją (anti-simetriją) ir Gaboro požymio simetriją (anti-simetriją) pagal kryptis galima ypač paspartinti Gaboro požymių apskaičiavimą bet kokio išretinto tinklelio susikirtimo taškuose. Kadangi tai įgalina apskaičiuoti visus Gaboro požymius pasirinktame tinklelyje realiu laiku, būtent tokia struktūra ir buvo naudojama visame darbe skirtingai nuo tradicinių metodų, kurie bando sukurti žmogaus veido modelį ir skaičiuoti Gaboro požymius ant reikšmingų veido taškų, pvz., antakių, akių, nosies, burnos kontūrų ir pan.

2.2 Pradinis algoritmas

Asmens identifikavimui pagal veidą buvo pasirinktas toks pradinis algoritmas:

1. Panaudoti akių centrus kaip atskaitos taškus, pagal kuriuos bus geometriškai normalizuojama veido nuotrauka.
2. Geometriškai normalizuoti veidą pritaikant afininę transformaciją iki 128×128 dydžio vaizdo, kuriame kairė ir dešinė akis atitinkamai atsidurtų pozicijose $(32, 32)$ ir $(96, 32)$.
3. Pasirinkti išretintą 10×10 susikirtimo taškų turintį tinklelį.
4. Pasirinkto tinklelio susikirtimo taškuose skaičiuoti klasikinius 5 dažnių ir 8 orientacijų Gaboro požymius.
5. Paversti kompleksinius Gaboro filtrų atsakus $g_c = g_{c,real} + i g_{c,imaginary}$ į jų absoliučias reikšmes $g_{c,magnitude} = \sqrt{g_{c,real}^2 + g_{c,imaginary}^2}$.
6. Suformuoti $100 \times 5 = 500$ 8-ių dimensijų vektorių.
7. Dviejų atitinkamų Gaboro požymių palyginimui naudoti kampo tarp vektorių kosinusą. Paimti vidutinį panašumų tarp vektorių įvertį kaip galutinį panašumo tarp dviejų veidų įvertį.

2.3 Testavimas

Visos veidų atpažinimo variacijos buvo testuojamos naudojant FERET duomenų bazę ir FERET veidų atpažinimo testavimo protokolą. Visa duomenų bazė padalinta

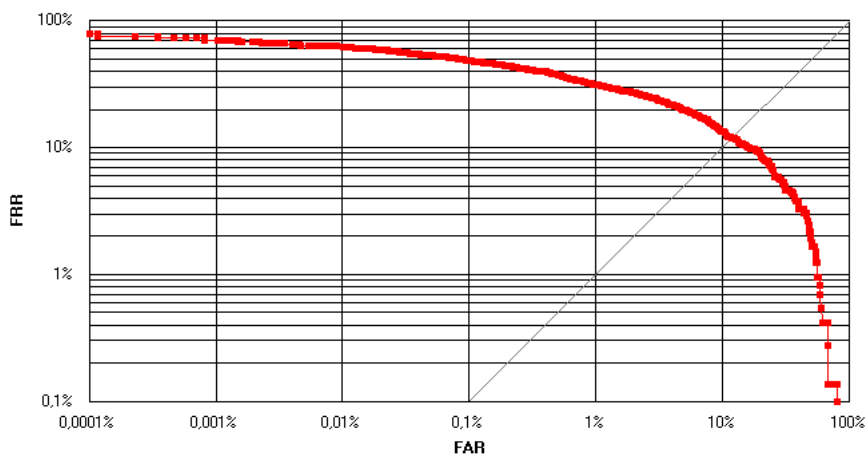
į tokias dalis:

1. Fa - tai 1196 nuotraukos, simuliuojančios į duomenį bazę įtrauktus asmenis.
2. Fb - tai 1195 nuotraukos, kurios nufotografuotos tą pačią dieną ir naudojant tokį patį apšvietimą, kaip ir Fa nuotraukose.
3. Fc - tai 194 nuotraukos, fotografuotos tą pačią dieną, kaip ir Fa nuotraukos, tik su kita kamera ir kitu apšvietimu.
4. Dup1 - tai 722 nuotraukos, kurios nufotografuotos kitomis dienomis nei Fa nuotraukos, bet ne vėliau, kaip po metų.
5. Dup2 - tai 234 nuotraukos, kurios nufotografuotos vėliau nei po metų nuo Fa nuotraukų.
6. Training - tai 736 nuotraukos, kurios gali būti naudojamos algoritmų su mokymo žingsniu mokyme.

Toliau eksperimentai bus vadinami Fb, Fc, Dup1, Dup2, kai visos nuotraukos iš atitinkamos duomenų bazės dalies yra lyginamos su visomis nuotraukomis iš Fa duomenų bazės dalies. Eksperimentui buvo naudojamos tik rankomis sužymėtos akių koordinatės, kurios pateiktos kartu su FERET duomenų baze. FERET testavimo protokolas numato tokias užduotis:

1. Verifikavimas - atpažinimo kokybė vertinama DET kreive.
2. Identifikavimas - atpažinimo kokybė vertinama kaip identifikavimo dažnis *Rank1*, kuris žymi, kiek procentų atvejų bandant atpažinti veidą, jis yra panašiausias į to paties žmogaus veidą, įtrauktą į duomenų bazę.

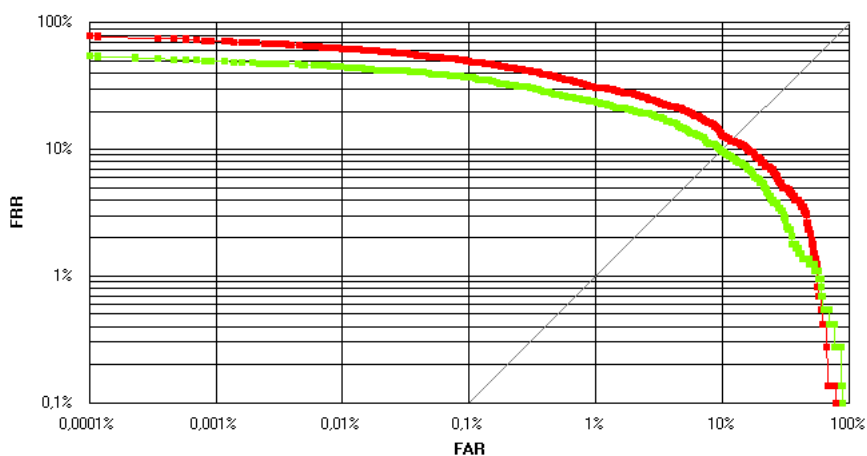
Algoritmo parametrus derinsime naudodamiesi Dup1 eksperimentu. Taigi anksčiau aprašyto pradinio algoritmo verifikavimo tikslumas pavaizduotas 1 pav., o identifikavimo tikslumas *Rank1* yra 65.24%.



1 pav.: Pradinio algoritmo verifikavimo tikslumas (identifikavimo tikslumas - $Rank1 = 65.24\%$).

2.4 Pradinio algoritmo tobulinimas

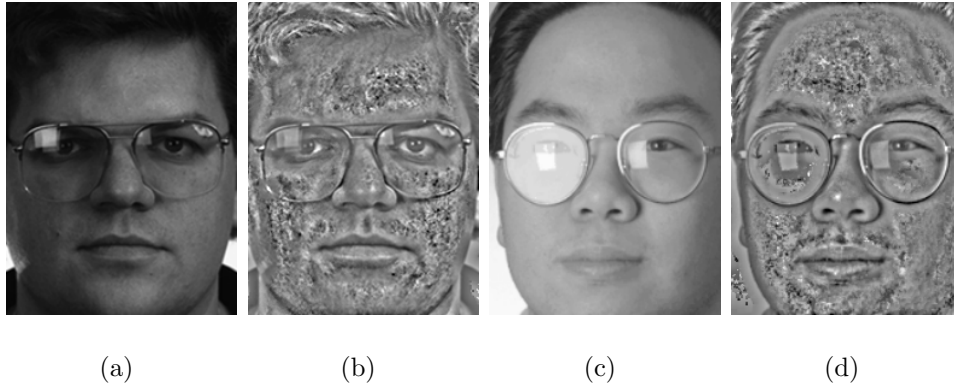
Darbe pasiūlytas geometrinis veido nuotraukos normalizavimo būdas pagerina verifikavimo tikslumą (žr. 2 pav.), o identifikavimo tikslumas pakyla iki $Rank1 = 80.33\%$.



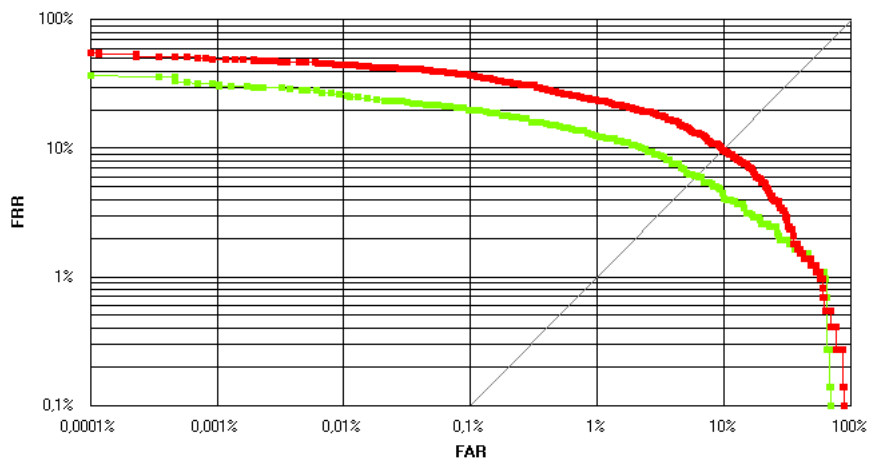
2 pav.: Verifikavimo tikslumo pagerėjimas nuo pradinio algoritmo (raudona kreivė) iki optimalių geometrinės normalizacijos parametrų panaudojimo (žalia kreivė).

Darbe pasiūlytas fotometriniškai geometriškai normalizuoto veido nuotraukos normalizavimo būdas (žr. 3 pav.) taip pat žymiai pagerina verifikavimo tikslumą (žr. 4 pav.), identifikavimo tikslumas pakyla iki $Rank1 = 88.23\%$. Iš testuotų trijų fotometrinių normalizacijos būdų (vaizdo savidalmens normalizacija (angl. self-quotient image normalization, SQI), lokali vidurkio ir variacijos normalizacija (angl.

local mean and variance normalization, LNORM) ir lokalus histogramos išlyginimas (angl. local histogram equalization, LHE)), SQI atpažinimo kokybės nepagerino, o likę du žymiai pagerino atpažinimo kokybę. Tokie paprasti fotometrines normalizacijos būdai buvo pasirinkti todėl, kad buvo siekiama maksimalaus požymių išskyrimo greičio.



3 pav.: Veido nuotraukos prieš (a), (c) ir po LNORM normalizacijos naudojant spindulį $r = 7$ (b), (d).



4 pav.: Verifikavimo tikslumo pagerėjimas nuo optimalių geometrinės normalizacijos parametrų panaudojimo (raudona kreivė) iki optimalių fotometrines normalizacijos parametrų panaudojimo (žalia kreivė).

Optimizuojant Gaboro požymių skaičių buvo analizuojami keli variantai: parinkti tankesnę išretintą tinklę ir/arba pridėti papildomų tarpinių Gaboro filtrų dažnių ir orientacijų. Eksperimentai parodė, kad papildomi tarpiniai Gaboro filtro dažniai ir orientacijos didina atpažinimo tikslumą greičiau nei atitinkamai tankina-

mas išretintas tinklelis. Tokiu būdu identifikavimo tikslumas buvo pagerintas iki $Rank1 = 90.17\%$.

Toliau buvo pasiūlyta papildomai formuoti Gaboro požymių vektorius ne tik pagal orientacijas bet ir pagal dažnius. Tokiu būdu nekeičiant požymių skaičiaus buvo pasiektas identifikavimo tikslumas $Rank1 = 92.94\%$, o paderinus ankstesnių žingsnių parametrus - $Rank1 = 94.60\%$.

Derinant parametrus buvo sukurti tokie parametrų rinkiniai:

1. $Proposed_{BASELINE}$ - pradinio algoritmo parametrų rinkinys.
2. $Proposed_{FINAL}$ - godaus parametrų parinkimo rezultatas.
3. $Proposed_{LHE+F_ONLY}$ - tai $Proposed_{FINAL}$, tik fotometrinei normalizacijai naudojama LHE, o Gaboro požymiai lyginami formuojant vektorius iš Gaboro filtrų atsakų tik pagal dažnius.
4. $Proposed_{GN_PHN_REV}$ - tai $Proposed_{FINAL}$, tik minimaliai paderinti geometrinės ir fotometrinės normalizacijos parametrai.
5. $Proposed_{LOW_DIM}$ - tai $Proposed_{GN_PHN_REV}$, bet naudojant klasikinius Gaboro požymius.

Jų identifikavimo tikslumo rezultatai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė: Identifikavimo tikslumas, pasiektas visuose FERET eksperimentuose.

Method	Experiment			
	Fb	Fc	Dup1	Dup2
$Proposed_{BASELINE}$	91.05	93.81	66.90	61.97
$Proposed_{FINAL}$	99.92	100.00	92.94	88.89
$Proposed_{LHE+F_ONLY}$	100.00	100.00	91.55	87.18
$Proposed_{GN_PHN_REV}$	99.75	100.00	94.60	93.59
$Proposed_{LOW_DIM}$	99.75	100.00	92.38	88.89

Pasiūlytas veidų atpažinimo metodas su parametrų rinkiniu $Proposed_{GN_PHN_REV}$ gali atlikti požymių išskyrimo operaciją 50 veidų per sekundę greičiu, o šiek tiek mažesnio tikslumo $Proposed_{LOW_DIM}$ - 125 veidų per sekundę greičiu.

3 Atpažinimas pagal akies rainelę

3.1 Akies rainelės išorinio ir vidinio kontūrų suradimas

Vienas esminių atpažinimo pagal akies rainelę žingsnių yra rainelės išorinio ir vidinio kontūrų, kurie toliau yra naudojami rainelės tekstūros geometrinei normalizacijai, suradimas. Šiame darbe pasiūlytas realiu laiku veikiantis rainelių segmentavimo algoritmas:

1. Skirtingais laiko momentais filmuotų puskadrių video triukšmo pašalinimas.
2. Atspindžių aptikimas ir pašalinimas.
3. Triukšmo mažinimas.
4. Apytikslis vyzdžio centro suradimas.
5. Antros eilės išvestinių pagal spindulį nuo surasto vyzdžio centro apskaičiavimas.
6. Pozicijų, kuriose antros eilės išvestinės kerta nulį, grupavimas į jungius kontūrus.
7. Jungių kontūrų atstumų iki surasto vyzdžio centro skirstinio apskaičiavimas.
8. Skirstinių grupavimas į vidinį ir išorinį rainelės kontūrus.
9. Vidinio ir išorinio kontūrų grupių aproksimacija Furjė eilutėmis.

Naudojantis surastais kontūrais atliekama akies rainelės tekstūros geometrinė normalizacija paverčiant ją į pseudo polinę koordinačių sistemą klasikiniu "rubber sheet" metodu.

3.2 Rainelės tekstūros pavaizdavimas

Gerai žinoma Teiloro eilutės išraiška

$$u(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u^{(n)}(a)}{n!} (x - a)^n \quad (2)$$

sako, kad pakankamai reguliari funkcija gali būti atstatyta iš Teiloro eilutės koeficientų $\frac{u^{(n)}(a)}{n!}$. Šiame darbe rainelės tekstūrai aprašyti yra naudojami pirmi du eilutės

nariai (pirmoji ir antroji išvestinės). Fiksuotai skalei σ

$$(u' * D_\sigma p)(x) = 1/\sigma \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi/\sigma)u'(\xi - x) d\xi, \quad (3)$$

ir

$$(u'' * D_\sigma p)(x) = 1/\sigma \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi/\sigma)u''(\xi - x) d\xi, \quad (4)$$

kur

$$p(x) = \frac{\operatorname{sech}(x)}{\pi}, D_\sigma p(x) = \frac{p(x/\sigma)}{\sigma}. \quad (5)$$

Iš tiesų, tai tas pats, kas signalo sąsūka su įvairių skalių glodintais lyginių ir nelyginių funkcijų filtrais. Norint gauti stabilesnius filtravimo rezultatus filtrus reikia papildomai glodinti statmena kryptimi su mažesne σ reikšme. Šiame darbe naudotos filtrų reikšmės pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė: Išvestinių ir glodinimo parametrai.

Skalė ir filtro tipo indeksas s	Glodinta išvestinė	Horizontalios krypties $\sigma_x = \sigma$	Vertikalios krypties $\sigma_y = \sigma$
0	u_x	$\frac{6}{8}$	$\frac{1}{2}$
1	u_x	$\frac{9}{8}$	$\frac{1}{2}$
2	u_x	$\frac{15}{8}$	$\frac{1}{2}$
3	u_{xx}	$\frac{9}{8}$	$\frac{1}{2}$
4	u_{xx}	$\frac{15}{8}$	$\frac{1}{2}$
5	u_{xx}	$\frac{24}{8}$	$\frac{1}{2}$
6	u_y	$\frac{1}{2}$	$\frac{9}{8}$
7	u_{yy}	$\frac{1}{2}$	$\frac{15}{8}$

3.3 Reikšmingiausių lokalių ekstremumų išrinkimas

Anksčiau aprašytas būdas generuoja daugybę lokalių ekstremumų, todėl norint kontroliuoti jų skaičių, o kartu ir palyginimo greitį bei požymių šablono dydį buvo naudojama tokia procedūra:

1. Akies rainelė padalinama į 16 sektorių.

2. Lokalūs ekstremumai vokų zonoje eliminuojami vienu iš būdų:
 - (a) Surandama iškili sritis, kuri gaubia tik matomą rainelės dalį.
 - (b) Ignoruojami sektoriai 0, 1, 2, 7, 8, 13, 14, ir 15, nes juos dažniausiai dengia vokai.
3. Palikti nedaugiau kaip K didžiausių ekstremumų kiekvienoje skalėje ir aktyviame sektoriuje.



(a) originalus vaizdas (b) iškili sritis, atmetus vokus (c) rainelės dalinimas į sektorius

5 pav.: Lokalių ekstremumų eliminavimas vokų srityje dviem būdais. Aktyvūs sektoriai žymimi balta spalva, o neaktyvūs - pilka spalva (c).

3.4 Panašumo įvertis

Fiksuotiems poslinkiams x ir y ašimis α ir β dvi lokalių ekstremumų aibės lyginamos funkcija

$$s(f_i^A, f_j^B; \alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & \text{jei } s_i^A \neq s_j^B \text{ arba } z_i^A \neq z_j^B; \\ |DX - |x_i^A - x_j^B - \alpha||_+ \times \\ \times |DY - |y_i^A - y_j^B - \beta||_+, & \text{kt. atv.} \end{cases} \quad (6)$$

Čia DX ir DY riboja, kiek toliausiai gali būti nutolę požymiai x ir y kryptimis, o

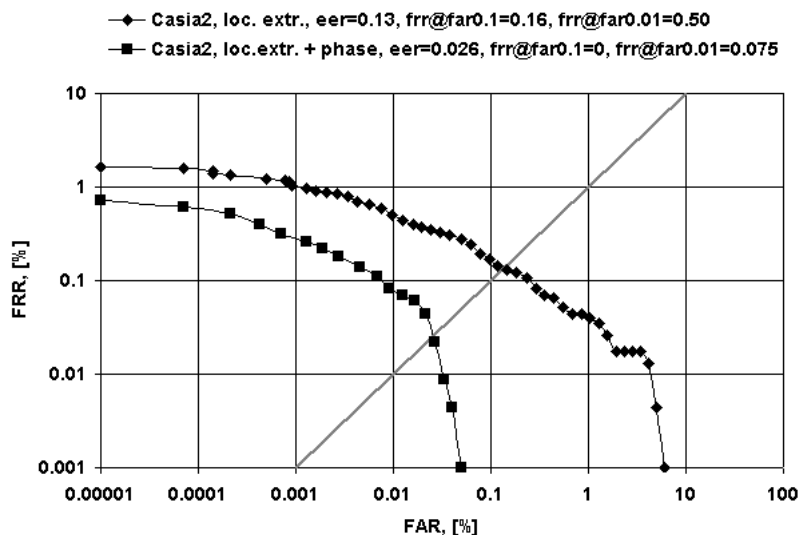
$$|a|_+ = \begin{cases} a, & \text{jei } a > 0; \\ 0, & \text{kt. atv..} \end{cases} \quad (7)$$

Tokia palyginimo funkcija kompensuoja rainelės posūkį plokštumoje ir nežymias segmentacijos klaidas palyginimo metu. Kadangi požymius lyginame anksčiau minėtuose sektoriuose, tai, papildomai pasinaudodami dinaminio programavimu, galime išlygiuoti sektorių poslinkius, maksimizuodami panašumo įvertį.

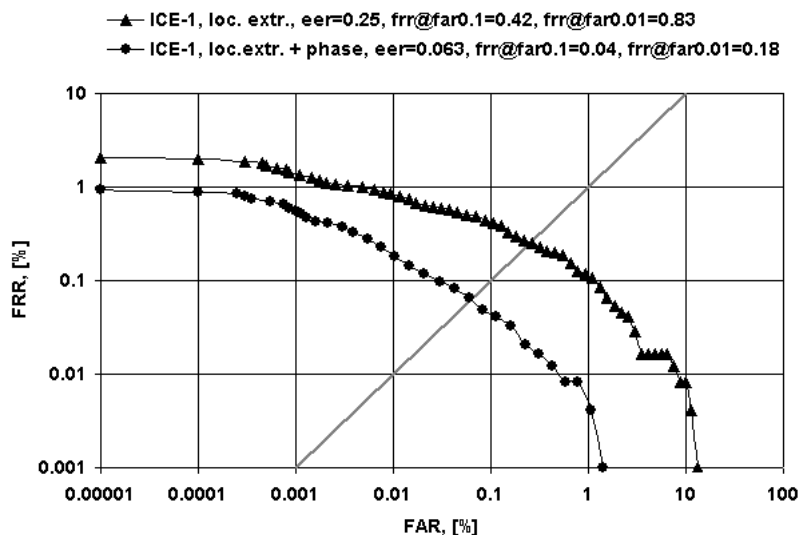
Jeigu vietoj lokalių ekstremumų paieškos daugelio skalių filtrais filtruotas signalas binarizuojamas su fiksuotu slenksčiu 0, tai gaunami klasikiniai binariniai požymiai, kurie gali būti lyginami, naudojant Hemingo atstumą. Jeigu tai bus daroma sektoriais, kaip ir lokaliems ekstremumams, o sektorių panašumas maksimizuojamas išlygiuojant sektorių poslinkius, tai gautas metodas taip pat bus atsparus nežymioms segmentacijos klaidoms.

3.5 Eksperimentų rezultatai

Testavimui buvo naudojamos keturios labiausiai paplitusios duomenų bazės: Casia 1.0, Casia 2.0 (device1), Casia 3.0 (interval) ir NIST ICE-1. Testavimo rezultatai parodė, kad pavaizduojant akies rainelės tekstūrą gaunamas ypač kompaktiškas požymių rinkinys, kurį galima užkoduoti vidutiniškai 600 baitais, tuo tarpu binariniai požymiai papildomai prideda fiksuotus 2048 baitus. Casia 1.0, ir Casia 3.0 (interval) duomenų bazėms pasiūlyti metodai idealiai atpažino visas akių raineles, t.y. galima parinkti tokį panašumo įverčio slenkstį, kad algoritmas nedarytų nei vienos klaidos. Toliau pateiktos DET kreivės (žr. 6 pav. ir 7 pav.), kuriose pavaizduota, kaip du skirtingi akies rainelės tekstūrų pavaizdavimai pagerina vien tik lokaliais ekstremumais pagrįsto metodo atpažinimo kokybę.



6 pav.: Casia 2.0 (device 1) duomenų bazė (žemiau esanti kreivė žymi kombinuoto metodo tikslumą).



7 pav.: ICE-1 duomenų bazė (žemiau esanti kreivė žymi kombinuoto metodo tikslumą).

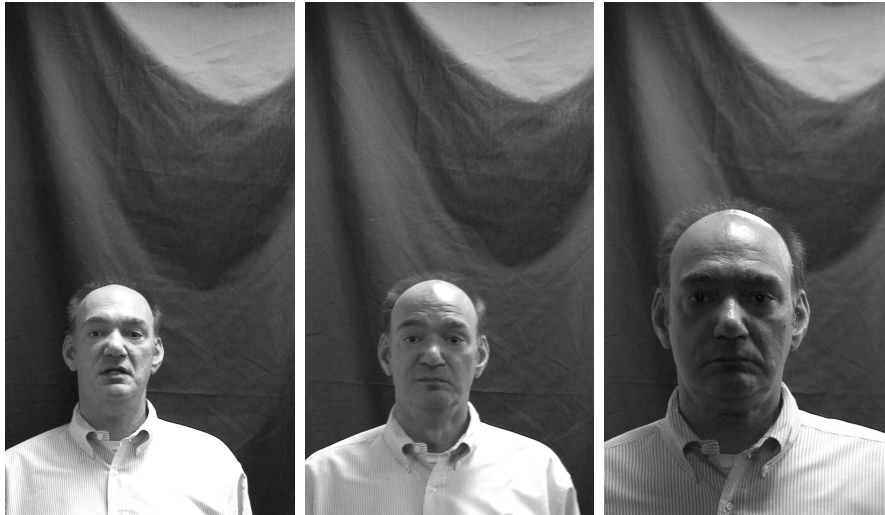
4 Atpažinimas pagal veidą ir akies rainelę

Darbe pasiūlyti veido ir akies rainelės atpažinimo algoritmai naujų technologijų dėka gali būti sujungti į vieną sistemą, kuri identifikuotų asmenis pagal keletą biometrinių požymių vienu metu. Pastaruoju metu stengiamasi sukurti rainelės atpažinimo sistemas, kurios tai darytų iš didesnio nei įprastinio keliasdešimties centimetrų atstumo. Pirmas tokios sistemos žingsnis - tai veido ir akių veide paieška. Suradus veidą yra tikslinga jį taip pat panaudoti atpažinimui. 2009 metais organizuoto Multiple Biometrics Grand Challenge testo antroji dalis pateikė eksperimentą Portal Challenge, tinkantį darbe siūlomos kombinuotos biometrinės sistemos testavimui. Kol kas veidai ir akies rainelės buvo filmuojami skirtingais įrenginiais. Pro įrenginį einantys subjektai buvo filmuojami dviem skirtingais įrenginiais: veidai - buitine kamera HD raiška, o rainelės - 4 milijonų taškelių raiškos specializuota kamera, žr. 8 ir 9 pav.

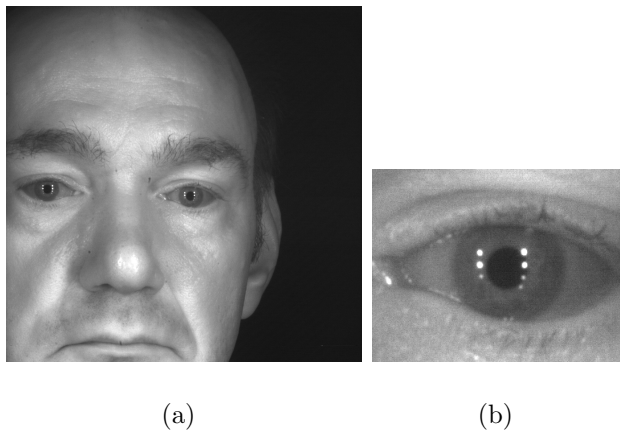
Darbe buvo pasiūlytas akių aukštos raiškos vaizduose paieškos metodas, kuris išnaudojo specifinį įrenginio naudojamą apšvietimą:

1. Suglodonti gautą vaizdą skirtingomis skalėmis σ_1 ir σ_2 bei pritaikyti vaizdo normalizavimo funkciją kiekviename taške:

$$I(x, y) = \frac{I_{\sigma_1}(x, y) - I_{\sigma_2}(x, y)}{I_{\sigma_1}(x, y) + I_{\sigma_2}(x, y)}. \quad (8)$$



8 pav.: Keletas kadru iš buitinės kameros video (1080×1920 taškų).



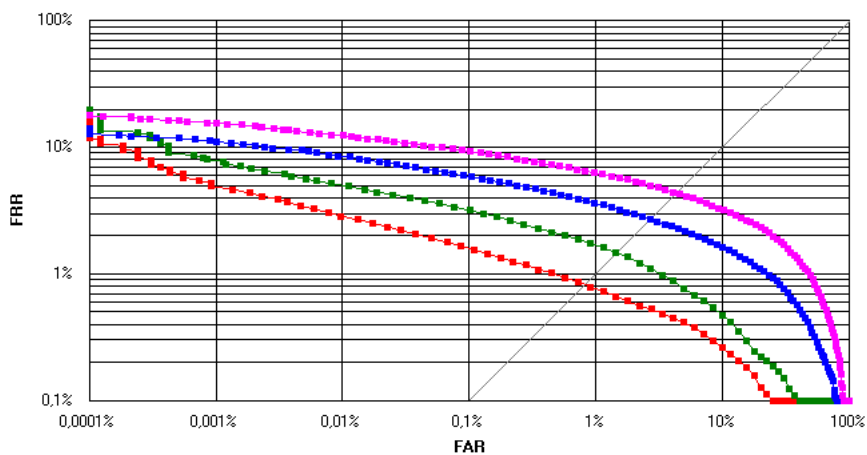
9 pav.: Vienas kadras iš NIR video (2048×2048 taškų) (a) ir iš to paties kadro iškirptos rainelės vaizdas (320×240 taškų) (b)

2. Surasti mažo ploto sritis, kurios gaunamos pritaikius normalizuotam paveikslui fiksuotą slenkstį.
3. Sugrupuoti vertikalčiai ir horizontalčiai išsidėsčiusias sritis: grupė iš mažiausiai trijų vertikalčiai išsidėsčiusių sričių, turinčių bent vieną kaimyną iš kairės arba dešinės, laikoma kandidatu į akis, kurios spėjamas apytikslis centras yra grupę sudarančių sričių centrų koordinatų vidurkis.
4. Jeigu surasti bent du kandidatai, jie laikomi kaire ir dešine asmens akimis. Jeigu kandidatų mažiau, ieškomos tokios grupės, kurios beveik tenkina 3 žingsnyje keliamus reikalavimus.

5. Jeigu surastos dvi akys, jos naudojamos atpažinime, kaip kairė ir dešinė akys, t.y. kairių akių rainelės nelyginamos su dešinių akių rainelėmis. Jeigu surasta tik viena akis, ji lyginama ir su kairių, ir su dešinių akių rainelėmis.

Pasiūlytas metodas 85% vaizdų surado bent po vieną akį. Kadangi akies rainelės atpažinimui buvo galima naudoti keletą kadru, tokių video sekų, kuriose buvo atpažinimui tinkamų akių, bet nei viename kadre nebuvo surasta nors viena akis, neatsirado.

Kai norima kombinuoti atpažinimą pagal keletą biometrinių požymių, dažniausiai tai atliekama panašumo įverčių lygyje. Tačiau iš pradžių panašumo įverčius reikia priversti prie vienos skalės. Teigiama, kad z -score panašumo įverčių normalizacija yra optimali, jeigu kelis įverčius norima sujungti į bendrą panašumo įvertį pasinaudojant sumos taisykle, kai skirtingiems asmenims priklausančių biometrinių požymių skirstinys yra panašus į Gauso funkciją. Laimei tai galioja abiem darbe pasiūlytiems - veidų ir akių atpažinimo - metodams ir tokią normalizaciją buvo galima taikyti atliekant šį eksperimentą. Visų keturių eksperimento dalių gautos DET kreivės yra pavaizduotos 10 pav. Šie rezultatai buvo pristatyti "The Multiple Biometrics Grand



10 pav.: Kombinuoto veido ir rainelės atpažinimo metodo DET kreivės MBGC eksperimentams *5CL* (raudona kreivė), *5CR* (žalia kreivė), *5UL* (mėlyna kreivė) ir *5UR* (violetinė kreivė).

Challenge Workshop III" renginyje, kaip vienintelis sprendimas iš nekomercinės organizacijos. Pasiūlytas metodas tikslumu prilygo geriausiems rezultatus parodžiusiems komerciniams algoritmams.

5 Rezultatai ir išvados

Šiame darbe buvo pristatyti du modernūs algoritmai, skirti asmens identifikavimui pagal veidą ir akies rainelę. Naudojant tik asmeninį kompiuterį ir atitinkamą filmavimo įrangą trys moduliai, naudojantys šiuos algoritmus, gali pradėti dirbti lygiagrečiai, kai tik aptinkamas veidas: vienas - atpažinimui pagal veidą, ir dar du kiekvienai iš surastų akių - atpažinimui pagal akies rainelę. Visi kartu jie gali dirbti realiu laiku su ypač dideliu atpažinimo tikslumu, kuris yra tinkamas realioms asmens identifikavimo sistemoms.

Atpažinimo pagal veidą modulyje veido nuotrauka užkoduoja Gaboro požymiais taip, kad vėliau juos būtų galima sparčiai palyginti. Iš pradžių veido nuotrauka geometriškai normalizuojama, t.y. privedama prie vieno mastelio taip, kad akių centrai atsidurtų fiksuotose pozicijose, tada Gaboro požymiai tolygiai paskirstomi po visą veidą išretinto tinklelio susikirtimo taškuose. Visų pirma, naudojant tokią metodiką nebereikia ieškoti daugiau nei dviejų požymių (dviejų akių centrų), pagal kuriuos būtų paskirstomi Gaboro požymiai. Antra, daug paprasčiau valdyti Gaboro požymių skaičių. Ir trečia, išretinto tinklelio struktūra įgalina apskaičiuoti Gaboro požymius erdvinėje srityje ypač sparčiai, neprarandant tikslumo, pasinaudojant apibendrintu Gaboro filtro atskiriamumu ir simetrija darbe pasiūlytu metodu.

Geometrinei veido nuotraukos normalizacijai buvo panaudotas paprastas, bet labai efektyvus veidų išlygiavimas pagal du taškus (akių centrus) metodas. Buvo atlikta serija eksperimentų, kurie padėjo surasti optimalius pasirinktiems Gaboro požymiams normalizacijos parametrus. Papildomai buvo ieškoma, koku stačiakampiu reikia apriboti normalizuoto veido tekstūrą. Rezultatai parodė, kad stačiakampis, į kurį patenka kakta ir smakro kontūras, yra pranašesnis už kvadratą, į kurį patenka tik sritis nuo antakių iki apatinės lūpos. Tokiu būdu pasirinkus teisingus geometrinio normalizavimo parametrus, pavyko pagerinti identifikavimo tikslumą *Rank1* nuo 65.24% iki 80.33%.

Fotometrinei veido nuotraukos normalizacijai, kuri dažniausiai taikoma norint eliminuoti apšvietimo variacijas, buvo pritaikyti trys metodai: self-quotient image normalization (SQI), local mean and variance normalization (LNORM) ir lo-

cal histogram equalization (LHE). Eksperimentai parodė, kad SQI normalizacija beveik neįtakoja identifikavimo tikslumo naudojamiems Gaboro požymiams, tuo tarpu LNORM ir LHE normalizacijos maždaug vienodai pagerino identifikavimo tikslumą *Rank1* nuo 80.33% iki 88.23%.

Darbe taip pat buvo analizuojama, kaip, padidinus Gaboro filtrų skaičių Gaboro požymyje, galima dar pagerinti atpažinimo kokybę. Eksperimentai parodė, kad, pridėjus daugiau filtrų į Gaboro požymį, gaunamas didesnis tikslumas, nei atitinkamai padidinus Gaboro požymių tankį veido nuotraukoje. Kartu su pasiūlytu nauju Gaboro požymių palyginimo metodu, kuris suformuoja vektorius pagal Gaboro filtrų kryptis bei dažnius ir skaičiuoja vidutinį šių vektorių panašumų įvertį, identifikavimo tikslumą *Rank1* pavyko pagerinti nuo 88.23% iki 92.94% (arba net 94.60%, jeigu paderinamos gretimos parametrų reikšmės, kurios duoda panašų atpažinimo tikslumą atskiruose žingsniuose). Nors parametrai buvo parinkti, naudojant tik vieną iš FER-ET eksperimentų, kituose eksperimentuose pasiūlyti parametrų rinkiniai taip pat pralenkė geriausias publikuojamus rezultatus.

Atpažinimo pagal akies rainelę modulyje buvo pasiūlytas efektyvus akių rainelių segmentavimo algoritmas. Pagrindinis jo privalumas - tai greitis ir galimybė aprašyti akies rainelės vidinį ir išorinį kontūrus sudėtingesnėmis nei apskritimai formomis, kurios leidžia tiksliau atlikti geometrinę akies rainelės tekstūros normalizaciją. Pastaroji buvo atliekama, naudojant klasikinį "rubber sheet" metodą.

Akies rainelės tekstūrai koduoti buvo pasiūlytas metodas, paremtas lokalių ekstremumų paieška funkcijų daugelio skalių skleidiniuose Teiloro eilutėmis. Pasiūlytas metodas yra pranašesnis už vienmačiais ekstremumais paremtus kitų autorių siūlomus metodus. Kadangi gaunamas lokalių ekstremumų kiekis yra milžiniškas, buvo pasiūlytas efektyvus būdas jų skaičiui riboti, pasirenkant tik tam tikrą kiekį reikšmingiausių ekstremumų kiekviename iš 16 sektorių, kurie vėliau taip pat panaudojami, lyginant lokalius ekstremumus. Dvi lokalių ekstremumų aibės, lyginamos pasiūlytu metodu, efektyviai eliminuoja akies rainelės posūkį plokštumoje, kaip ir tradiciniai Hemingo atstumu pagrįsti metodai, o taip pat ištaiso nedideles, bet dažnas akies rainelės segmentacijos klaidas. Pasiūlytas akies rainelių atpažinimo metodas tikslumu nenusileidžia geriausiems publikuotiems algoritmams.

Funkcijų daugelio skalių skleidiniai Teiloro eilutėmis prieš ieškant lokalių ekstremumų gali būti binarizuoti, naudojant vieningą slenkstį 0, ir tokiu būdu gauti binariniai požymiai yra ekvivalentūs klasikiniams požymiams, kurie lyginami skaičiuojant Hemingo atstumą. Tačiau panaudojus tuos pačius 16 sektorių, kaip ir lokalių ekstremumų atveju, galima papildomai taisyti nedideles segmentacijos klaidas ir gauti dar vieną šiek tiek kitaip akies rainelės tekstūrą aprašantį metodą. Darbe pasiūlyta šių dviejų metodų kombinacija smarkiai pagerina rainelių atpažinimo tikslumą ir tuo pačiu pralenkia geriausius publikuotus algoritmus.

Veido ir akies rainelės kombinavimas buvo atliktas panašumo įverčių lygyje, kadangi abu metodai lygina tekstūras ir pasižymi panašiomis savybėmis, pritaikius klasikinę z -score normalizaciją, kuri yra optimali, kai panašumo įverčių tarp skirtingų asmenų skirstinys yra panašus į Gauso funkciją. Atlikti eksperimentai su Multiple Biometrics Grand Challenge Version 2 testais parodė, kad tokiu būdu galima pagerinti atpažinimo kokybę, net jeigu skirtingų modulių atpažinimo tikslumas skiriasi kelis kartus.

Visi šiame darbe iškelti tikslai buvo pasiekti ir visos užduotys įvykdytos. Visi rezultatai yra dokumentuoti šiame darbe. Darbo metu buvo sukurtas ypač greitas ir tikslus asmens identifikavimo pagal veidą ir akies rainelę metodas. Darbo autoriui yra žinomi tik keletas tokių sistemų pavyzdžių pasaulyje (dažniausiai tai komerciniai prototipai). Tai ir yra pagrindinis šio darbo įnašas biometriją tyrinėjantiems specialistams ir mokslininkams.

Mokslinių publikacijų sąrašas

1. Justas Kranauskas: Accelerated Calculation of Gabor Features in Spatial Domain. *Electronics and Electrical Engineering*, no. 1 (97), pp. 39-44, 2010.
2. Algirdas Bastys, Justas Kranauskas, Rokas Masiulis: Iris Matching by Local Extremum Points of Multiscale Taylor Expansion. *Advances in Biometrics, Third International Conference, ICB 2009, Alghero, Italy, June 2-5, Proceedings*, vol. 5558, pp. 1070-1079, 2009.
3. Algirdas Bastys, Justas Kranauskas, Rokas Masiulis: Iris Recognition by Local

Extremum Points of Multiscale Taylor Expansion. *Pattern Recognition*, vol. 42, no. 9, pp. 1869-1877, 2009.

4. Andrej Kisel, Alexej Kochetkov, Justas Kranauskas: Fingerprint Minutiae Matching without Global Alignment Using Local Structures. *Informatika (Lithuanian Academy of Sciences)*, vol. 19, no. 1, pp. 31-44, 2008.

Apie autorių

Justas Kranauskas įgijo informatikos bakalauro ir magistro kvalifikacinius laipsnius Vilniaus universiteto Matematikos ir informatikos fakultete. 2005-2009 - Vilniaus universiteto doktorantas.

Person Identification by Face and Iris

Research Area

Automatic person identification using biometric characteristics has huge potential and thousands of applications starting from everyday personal computer login applications and finishing by high security demanding systems like national level border cross control or an instrument to safeguard democratic elections. The most attractive technologies are those which do not need a contact to perform the biometric measurements and those which can capture person's biometrics without any interaction with the user.

In the last decade, facial recognition was thought to be a holly grail in biometrics because of huge amount of already installed surveillance cameras in the world and possibility to perform person identification even without informing him about that. While society was debating about the privacy concerns and countries were fighting terrorists by installing facial screening systems in all the major airports, scientists improved facial recognition accuracy by an order of magnitude. However, major improvements were done mostly for facial images captured in controlled environment at high resolution which is not the case of typical surveillance cameras. That didn't reduced interest in person identification by face because new imaging technologies enabled getting face images at high enough resolutions. It's only the matter of time

when these technologies will be installed everywhere. On the other hand, there are plenty of other applications which can benefit from face recognition.

Iris recognition was always marketed as most stable and accurate biometric measurement which can be used for person identification (except perhaps DNA). Additionally, similar to face, it can also be "measured" without a contact and interaction with a person.

The research area of this work is person identification by the biometric measurements (that can be done at a distance and on the move) - face and iris images, independently as unimodal and combined as multimodal biometric systems.

Problem Relevance

Face recognition is one of the most natural biometrics because humans are extremely good at recognizing persons by their faces. Recent studies showed that some face recognition algorithms already surpass humans at matching faces. Nevertheless, high number of applications always demand better accuracy and robustness to such factors as changing illumination, expression, pose, aging, facial hair, glasses, etc. Emerging new imaging technologies suggested to use better image capturing devices which enabled capturing additional biometrics together with face - iris texture. Although, recognition algorithms for each of these biometrics are improved constantly, fusing them together results in even more significant boost in recognition accuracy.

Recently, several commercial systems which use this concept became available and several publications were also published, mostly presenting previously mentioned commercial systems. However, they focus on iris recognition which is more stable and accurate than face recognition. Additionally, usually two irises are captured simultaneously, which further improves accuracy of iris only recognition systems. On the other hand, capturing irises at the distance and on the move must introduce additional noise, which is not present in typical iris recognition systems which capture irises in more constrained conditions. This results in lower than expected accuracy from the most stable and accurate biometrics. Thus, we believe that in such case adding face modality will further improve accuracy of iris only recognition systems.

Research Object

This thesis research object is person identification at a distance using combination of face and iris biometric modalities which complement each other by being the least intrusive (face recognition part) and most accurate (iris recognition part) biometrics.

The Objectives and Tasks of the Research

The main objective of this thesis is to analyze current state-of-the-art face and iris recognition algorithms, and propose the improvements to increase recognition accuracy and speed. Furthermore, to implement core ready-to-use person identification algorithms for a multi-modal biometrics system utilizing the strengths of both biometric modalities.

In order to achieve these objectives the following tasks were formulated:

1. To analyze existing face and iris recognition methods.
2. To propose an improvement to a baseline face recognition from single image algorithm based on Gabor features both in speed and accuracy.
3. To evaluate impact of each face recognition step to identification and verification accuracy.
4. To create a real-time iris segmentation method.
5. To propose a new representation of iris texture based on local features.
6. To propose a new iris matching method which could complement traditional binary Hamming distance based matching of phase-based iris texture representation.
7. To combine face and iris biometric modalities in one person identification system and evaluate its performance.

Scientific Novelty

The proposed face recognition method is built on traditional face identification from single image scheme: real-time face detection, followed by extraction of Gabor features and classic vectors' similarity measure for comparison of two features sets.

Although, the smallest components of the algorithm are ordinary and they are often used in facial recognition, a unique combination with deep analysis of each component is created in this thesis:

- Geometric normalization - optimal resolution and cropping parameters for the proposed features were found.
- Photometric normalization - three methods were analyzed. The first method does not influence face recognition accuracy if the proposed features are used. The other two are comparable and both significantly improve face recognition accuracy. It was shown that it is an essential step in facial recognition.
- Number of used features - an optimal density of regular grid (which controls number of used features) was found.

The proposed accelerated calculation of Gabor features enables real-time conversion of face image to facial features set. It is always faster than direct calculation and faster than convolution in frequency domain when image dimensions are not convenient for fast Fourier transform.

Gabor features similarity score was modified to use the same responses of Gabor filters in two complementary ways: by forming vectors along different directions and scales. The proposed modification to Gabor features similarity calculation can be straightforward extended to other object recognition tasks.

Finally, the proposed method is more accurate than best of the published algorithms, which do not require training step, by an order of magnitude, and even more, it is still more accurate than those algorithms, which are based on training step.

The proposed iris recognition method is built on proposed novel representation of texture - a set of local extrema of multiscale Taylor expansion.

Completely different from traditional ones iris matching method is proposed. It is designed to cope with inaccuracies of iris segmentation step. Combined with a real-time iris segmentation step it gives similar recognition accuracy as current state-of-the-art iris recognition algorithms.

Additionally, we showed how the proposed iris texture representation can be converted into traditional phase-based representation. If both methods are used simul-

taneously (this does not introduce additional complexity in feature extraction step), iris recognition accuracy is improved significantly and becomes higher than any published results on the tested recently created public iris datasets of different quality.

Finally, we showed how both algorithms can be easily fused at a score level and successfully used together in a complete person identification system to further improve recognition accuracy.

Practical Significance of the Work

The proposed face and iris recognition methods are ready to be deployed as core algorithms of person identification system either as single modality, or a combination of both biometric modalities. A modern personal computer can perform person identification based on the proposed methods in real time which is an important criteria for real-world applications.

Defended Propositions

1. Improved Gabor features extraction from facial image speed by an order of magnitude without any loss in the accuracy of Gabor filters responses. This enables to use Gabor features based recognition methods in real time.
2. Analyzed and proposed better parameters for each step of typical face recognition from single image method. This allowed to achieve identification and verification accuracy, which is comparable with accuracy of the methods which additionally incorporate a training step and require to have a representative training set of facial images.
3. Proposed Gabor features comparison method which reuses responses of Gabor filters along directions and scales. Thus, without any additional features improves identification and verification accuracy to the better than any known published results.
4. Proposed iris texture representation by a set of multiscale Taylor expansions. The proposed representation can be encoded in two different and complemen-

tary ways - traditional binary phase-based and novel extrema-based, thus, creating two different iris texture representations.

5. Proposed similarity metrics to compare the proposed iris texture representations encoded as a sets of two-dimensional extrema points. The proposes similarity metric can cope with minor errors in iris segmentation step and gives similar accuracy as existing state-of-the-art iris recognition methods.
6. Proposed a way to combine two different iris texture representations to further improve recognition accuracy.
7. Proposed a way to combine face and iris biometric modalities to improve person identification accuracy when iris images are captured at a distance because getting a face image at the same time is a cheap operation. The proposed face and iris recognition algorithms are similar in nature - they both compare texture, thus resulting similarities scores can be easily used in fusion of different biometric modalities at scores level. It was evaluated in Multiple Biometrics Grand Challenge Version 2.

Thesis Structure

This thesis is organized as follows. Chapter 2 reviews face recognition from single still image problem. A survey is followed by an introduction to method of accelerated calculation of Gabor features in spatial domain. Gabor features make the foundation for a baseline face recognition algorithm, which is further significantly improved by deep analysis of each face recognition step - geometric normalization, photometric normalization, number and position of used Gabor features, and proposed similarity metric. The accuracy is evaluated on FERET - most popular face recognition protocol and dataset.

Chapter 3 reviews iris recognition from single still image problem. A survey is followed by the description of the proposed real-time iris segmentation method. Classic iris texture geometric normalization by rubber sheet method is presented. It is followed by introduction to proposed iris texture representation by local features as local extrema of multiscale Taylor expansion and a similarity metric for robust com-

parison of created features sets. Further, a way to convert the proposed iris texture representation into classic phase-based method is presented. Developed iris recognition algorithms are evaluated on largest publicly available iris datasets - CASIA and ICE. Finally, evaluation results are presented for all datasets.

Chapter 4 presents evaluation results for previously introduced face and iris recognition algorithms on the Multiple Biometrics Grand Challenge Version 2 Portal Challenge experiment. Iris localization method is extended to work with specific very high resolution NIR face images, which contain part of the face and usually one or two irises visible. This experiment requires fusion of biometric modalities. The results of fusion at score level are presented.

Summary and Conclusions

In this thesis, we presented two state-of-the-art algorithms for two different biometrics modalities which can be measured at a distance - face and iris. After a successful face detection three modules can start their work in parallel on a nowadays CPU: one for facial recognition and the other two for each of the detected eyes. We described the possible implementations of such modules in details. All of them can work in real-time and with really high accuracy suitable for real-world applications.

In face recognition module, Gabor features were chosen to encode facial features into a compact representation which can be later used for rapid comparison of human faces. We chose to normalize face image geometrically and use a regular grid to place Gabor features over the face. The benefit of such approach is threefold. Firstly, there is no need to manually locate facial features for training step, which is eliminated at all. Secondly, optimization of number and locations of used features becomes much simpler. And finally, regular grid structure can be exploited to calculate Gabor features very efficiently in spatial domain. We showed how structure of regular grid and generalized separability of Gabor filter can be used to speed up the calculation of Gabor features in spatial domain. It is almost as fast as calculating them in frequency domain without the loss of precision, if Gabor features are required for each pixel in the image. But if regular grid is not so dense, for example, every 10^{th} pixel in the image, the proposed method is more than 10 times faster than calculating Gabor

features in frequency domain.

For geometric face image normalization a simple yet effective method of aligning faces by two reference points (centers of eyes in our case) was used. It was followed by a series of experiments to find out what resolution face images are the best for the chosen Gabor features. Additionally, the tightness of cropping face in face images was analyzed. It was shown that tight rectangular crop, which includes full forehead and usually full chin but no ears, is superior to square crop, which includes facial features from eyebrows to lower lip.

For photometric normalization, which is usually performed to eliminate lighting variations, three methods were analyzed: self-quotient image normalization, local mean and variance normalization and local histogram equalization. It was shown that self-quotient image normalization does not improve facial recognition accuracy if Gabor features are chosen as facial features descriptors. The other two complement Gabor features with additional invariance to lighting variations and perform similar both in terms of speed and accuracy.

Finally, we showed how number of Gabor filters used in Gabor features can improve face recognition accuracy. We showed that extending Gabor features by adding more frequencies and orientations is more valuable than extending number of Gabor features by using denser regular grid. Furthermore, a new similarity metric for calculating similarity between two Gabor features was proposed. A combined similarity metric gave the best face identification accuracy on the most popular face recognition accuracy evaluation FERET database.

In iris recognition module, an efficient iris segmentation method was proposed. Its main strength is the speed, which is comparable to face detection speed. Additionally, it can describe iris inner and outer boundaries by a more complex than simple circle contours, which can significantly improve iris recognition accuracy. For geometric iris image normalization a classic rubber sheet method was implemented.

For iris texture describing features, we proposed to use local extremum points of multiscale Taylor expansion. The proposed multiscale two-dimensional features were superior to one-dimensional extrema suggested by other authors. Number of local extremum points was unacceptably large, thus, we proposed an efficient way to reduce

it by choosing the most significant texture descriptors. Furthermore, a completely unique method of calculating similarity between two iris features sets was described. Two compact representations of iris texture are compared by eliminating in-plane rotation between the irises as in classic Hamming distance based methods. But additionally, iris deformations along the radius are eliminated, which not only deals with extreme pupil contractions and dilations but also copes with little inaccuracies in segmentation step. The proposed iris recognition method is comparable with other state-of-the-art methods.

Finally, we implemented a classic phase-based version of our features, which can be compared by a Hamming distance. We showed how to extend it by using warped similarity, similar to our proposed similarity metric. A simple sum of normalized similarity scores gave superior results on recent iris recognition databases by outrunning all the other published iris recognition algorithms to the best of our knowledge.

Fusion module, is constructed based on fusion at score level after z -score normalization. Literature study showed that it is optimal when impostor scores distribution is Gaussian-like and no additional information about genuine scores distribution is available. Experiments with MBGC Version 2 Portal Challenge confirmed that two biometric modalities complement each other even if their recognition accuracies differ by several times.

All declared objectives were achieved and all tasks were completed while preparing this thesis. All results were carefully documented and presented in this text. Highly accurate and fast, multi-modal person identification by face and iris biometric modalities method was created during this research. Only several such systems (usually as proprietary prototypes) in the world were known to the author by the time this thesis was prepared. This is the main contribution of this thesis to the biometrics community.

About the Author

Justas Kranauskas received both the Bachelor and Master degrees in Informatics at Vilnius University, Faculty of Mathematics and Informatics in 2003 and 2005. In 2005-2009 - Phd student at Vilnius University.