

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Janez Cesar

**Določanje centra očesa s pomočjo  
krivulj enake intenzitete**

DIPLOMSKO DELO  
UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM RAČUNALNIŠTVO  
IN INFORMATIKA

MENTOR: prof. dr. Franc Solina

Ljubljana, 2013



Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljanje 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: 01898/2013

Datum: 04.02.2013

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

Kandidat: **JANEZ CESAR**

Naslov: **DOLOČANJE CENTRA OČESA S POMOČJO KRIVULJ ENAKE  
INTENZITETE**

**DETERMINATION OF THE EYE CENTER USING CURVES OF  
CONSTANT INTENSITY**

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija

Tematika naloge:

Kandidat naj pregleda trenutno stanje na področju sledenja obrazov na slikah in video posnetkih. Predvsem naj se osredotoči na oči, kot ene najbolj pomembnih značilk obraza. Sledenje očem je zelo pomembno za določanje pozornosti gledalca. Preuči naj metodo, ki uporablja običajno video kamero in omogoča primerljivo natančnost z najboljšimi metodami ter delovanje v realnem času.

Mentor:

prof. dr. Franc Solina

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic





## IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Janez Cesar, z vpisno številko **63010019**, sem avtor diplomskega dela z naslovom:

*Določanje centra očesa s pomočjo krivulj enake intenzitete.*

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Francem Solino,
- 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, dne 2. april 2013

Podpis avtorja:





*Mentorju prof. dr. Francu Solini se najlepše zahvaljujem za hiter pregled naloge ter koristne popravke in dobrodošle nasvete.*

*Rad bi se zahvalil viš. predavatelju Borutu Batagelju za strokovno svetovanje, potrpežljivost in spodbudo pri nastajanju diplomskega dela.*

*Hvala tebi Nastja, da si verjela vame, me optimistično spodbujala ter mi nesebično pomagala.*

*Iskrena hvala mami in očetu za vso podporo in finančno pomoč pri študiju.*

*Hvala tudi vsem ostalim, ki ste mi vsa ta leta stali ob strani.*



# Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Kratek pregled tehnik za sledenje premikom oči	3
3	Sledenje premikom očesa s pomočjo obdelave slik	7
4	Zanimive aplikacije	9
5	Natančno določanje centra očesa s pomočjo krivulj enake intenzitete	13
6	Testiranje	21
7	Rezultati	27
8	Zaključek	31



# Povzetek

V sklopu diplomske naloge smo pregledali trenutno stanje na področju razpoznavanja obrazov in delov obraza ter sledenja posameznim značilnicam oziroma oblikam. Osredotočili smo se predvsem na oči. Implementirali smo postopek za določanje lokacije oči na osnovi krivulj, ki jih tvorijo črte oziroma krivulje enakih intezitet na sliki. Te rezultate smo nato primerjali z obstoječimi metodami. Sledenje premikom oči in njihova lokalizacija se danes uporablja za številne raziskovalne in komercialne namene. Pregledali smo aktualne pristope za zaznavo oči, premike oči in določanje smeri pogleda. Osredotočili smo se na postopke, ki temeljijo na obdelavi slik in ne zahtevajo dodatne strojne opreme ali osvetlitve. Tehnologija sledenja pogledu bo v prihodnosti postala pomemben vmesnik za komunikacijo med človekom in računalnikom.



# Abstract

As part of the thesis we have examined the current state of facie recognition and recognition of facial parts as well as tracking the specific characteristics and forms. We focused mainly on the eyes. We implemented a procedure for determining the location of accurate eye center location using isofote curvature. These results was then compared to existing methods. Tracking the movement and localization of the eye is now used for many research and commercial purposes. We review current approaches to detect eye movements and determine the direction of view. We focus on procedures, which do not require additional hardware or lighting. Technology of detecting eye center location and gaze will become an important interface for communication between humans and computers.





# Poglavje 1

## Uvod

Določanje lokacije oči na sliki je osnovni korak pri bolj kompleksni nalogi sledenja očem. Sledenje premikom oči je postopek, s katerim določimo smer pogleda in točko v prostoru, na katero je oseba usmerila svojo vizualno pozornost. Začetki segajo daleč nazaj v prejšnje stoletje. Na področju psihologije se sledenje očem uporablja za preučevanje delovanja možganov, na primer zakaj ljudje usmerimo svojo pozornost na en objekt izmed množice, zakaj neko stvar gledamo dlje kot drugo. Eden bolj znanih poskusov na tem področju je Yarbusov poskus [1], ki je pokazal, da so trajektorije gibanja oči odvisne od naloge, ki jo poskuša oseba opraviti. To je pokazal s sledenjem premikom oči med opazovanjem umetniške slike. Do danes se je postopek za sledenje očem zelo razvil in se ne uporablja samo v psihologiji, temveč na mnogo različnih področjih. Postopek je postal pomemben v medicini (nevrologija, oftamologija, diagnosticiranje shizofrenije), v oglaševanju, pri preučevanju kvalitete oziroma učinkovitosti določene spletne strani ali televizijske oddaje. Sledenje očem se uporablja tudi za ugotavljanje osredotočenosti uporabnika pri določeni nalogi, zaznavanju utrujenosti pri uporabi naprav in vožnji ter ne nazadnje pri računalniških vmesnikih za hendikepirane osebe. V prihodnosti se lahko nadejamo takih uporabniških vmesnikov tudi v splošni uporabi, recimo na javnih računalnikih zaradi manjše ranljivosti.



## Poglavje 2

# Kratek pregled tehnik za sledenje premikom oči

Premiki oči pri ljudeh so sestavljeni iz hitrih, vnaprej programiranih rotacij očesnega zrkla (sakad), ki pogled usmerijo na izbrano lokacijo v prostoru in obdobju mirovanja (fiksacij), med katerimi možgani sliko obdelajo. Postopke za merjenje premikov oči in določanje smeri pogleda lahko razdelimo v tri skupine:

- elektrookulografija,
- kontaktne leče s tuljavo,
- postopki, ki temeljijo na video posnetku očesa (IR ali vidna svetloba).

Pri elektrookulografiji (Slika 2.1) na kožo okoli očesa pritrdimo elektrode in z njimi merimo spremembe električnega potenciala na koži, do katerih pride predvsem zaradi premikov očesa. Uporaba kontaktne leče z integrirano tuljavo je eden izmed najbolj invazivnih, a zelo natančnih postopkov. V oko se vstavi leča z vgrajeno tuljavo, premiki očesa pa se zaznavajo kot premiki te tuljave v elektromagnetnem polju (Slika 2.2). Najbolj razširjen in danes tudi najbolj raziskovan je postopek, kjer se obdeluje slika, pridobljena s pomočjo video kamere. Tu se s pomočjo kamere in določenih predobdelav (lociranje obraza, očesa) zajame sliko očesa in ob upoštevanju nekaterih karakteristik

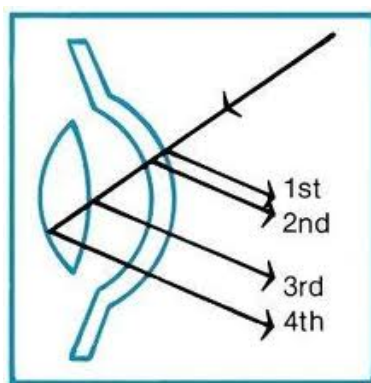


Slika 2.1: Elektrookulografija. Merjenje električnega potenciala na koži.

določi smer pogleda. Ta pristop je najmanj invaziven, a še vedno lahko precej natančen. Natančnost se močno izboljša, če uporabimo namensko naslonjalo za glavo (Slika 2.4), s katerim onemogočimo gibanje glave in se osredotočimo samo na gibanje oči. Če v oko posvetimo z virom IR svetlobe, se zaradi strukture očesa pojavijo štirje odboji Purkinje-Sanson [6], (Slika 2.3), kateri so vidni tudi na posnetku IR kamere. Običajno se uporabi odboj od roženice, ki ga je tudi najlažje zaznati. Položaj očesa določimo iz razdalje med tem odbojem in središčem zenice. Za zaznavanje oči se lahko uporabi tudi navadna kamera, ki posname sliko v vidnem spektru, nato pa se na podlagi geometrijskih lastnosti zenice in šarenice ter drugih značilnosti očesa lahko določi lokacijo oči in smer pogleda. Če primerjamo metodo določanja središča očesa s pomočjo krivulj enakih intenzitet z drugimi metodami, kot na primer tiste, ki za določanje središča očesa uporabljajo IR svetlobo, vidimo, da je uporaba IR svetlobe močno orodje, saj so odboji IR svetlobe od struktur očesa zelo izraziti ter zanesljivi. Slaba stran uporabe IR svetlobe je neuporabnost na prostem ob sončnem vremenu, ker je v sončnem spektru veliko IR sevanja, IR svetloba iz umetnega vira pa je neugodna ob dolgotrajni uporabi, saj povzroča utrujenost, če pa je vir premočan, lahko celo poškoduje oko. Zelo učinkovita metoda je tudi upraba dveh slikovnih virov. Ena kamera posname sliko v vidni svetlobi, druga pa v infra rdeči svetlobi. Iz teh dveh slik izračunamo razliko, iz razlike pa ocenimo položaj centrov očes.



Slika 2.2: Leča z v vgrajeno tuljavo, za merjenje spremembe magnetnega polja.



Slika 2.3: Odboji Purkinje-Sanson. Odboji IR svetlobe od struktur v očesu.



Slika 2.4: Sledenje očesu z namensko napravo.



## Poglavje 3

# Sledenje premikom očesa s pomočjo obdelave slik

Za sledenje očem ni potrebna visoka natančnost oziroma hitrost sledenja, zato lahko uporabimo postopke, ki temeljijo na obdelavi slik oz. videa. Prednosti tega so veliko bolj prijazna izkušnja uporabnika zaradi neinvazivnosti takih postopkov, cenejši sistemi in manjše velikosti sistemov. V primerjavi z IR postopki so postopki s pomočjo obdelave slik oziroma videa bolj zanesljivi na prostem, in sicer zaradi močne prisotnosti IR sevanja v sončni svetlobi, IR postopki pa so tudi neustrezni za daljšo uporabo. Danes se raziskovanje na področju obdelave slik ukvarja z odpravljanjem težav pri prej naštetih metodah, brez zahteve po namenski in dragi strojni opremi, kot so infrardeče kamere visokih ločljivosti, senzorjev ter dodatni osvetlitvi. Cilj teh postopkov je z uporabo preproste spletne kamere določiti natančno lokacijo centra očesa. Seveda pa imajo ti postopki tudi svoje pomankljivosti. Pogosto je ločljivost slike nizka in tudi regija očesa lahko zavzema le nekaj deset pikslov, posnetki pa imajo tudi nizko frekvenco zajetih slik. Vse to omejuje natančnost zaznave centra očesa. Za določanje smeri pogleda moramo poznati položaj glave ter usmerjenost oči. S kombinacijo obojega lahko izračunamo absolutno smer pogleda. Nekateri pristopi se osredotočajo samo na položaj glave. Seveda taki pristopi ne morejo biti zelo natančni, saj nam da položaj glave

samo neko globalno smer, medtem ko lahko oči gledajo v drugo stran. Drugi pristopi se osredotočajo samo na položaj oči. Ti temeljijo na tem, da sta zenica in šarenica okrogli, in če jih na sliki gledamo od strani, vidimo elipse [2]. Na podlagi oblike in orientacije teh elips se lahko izračuna smer pogleda. Ker imata oba pristopa svoje prednosti in pomanjkljivosti, je logično, da se lahko pri iskanju položaja oči uporabita oba, kar ima za posledico hitrejši in bolj robusten sistem. Pristop, ki uporablja stereo vid in vnaprej pripravljeno šablono [3], zazna položaj obraza na vhodni sliki, nato na njem poišče koordinate značilnih točk, ki predstavljajo model obraza (kotički ust, oči itd.). S pomočjo teh značilnic se določi orientacijo obraza. Nato se za vsako oko izračuna relativno smer pogleda. Iz koordinat kotiĉkov očesa se določi središĉe očesa in njegov premer. Med kotiĉkoma očesa se s Houghovo transformacijo poišĉe položaj šarenice. Smer pogleda je potem definirana kot razlika med središĉem očesa in središĉem šarenice. Pri [4] pa se za doloĉanje smeri glave uporabi metoda izginjajoĉih toĉk, za doloĉanje usmerjenosti pogleda pa podatek o fazi odziva Gaborjevih filtrov, doloĉenih na slikovni regiji očesa. Ti filtri izhajajo iz ugotovitve, da je zenica vedno temnejše barve od neposredne okolice (šarenice in beloĉnice). Premiki očesa se zato preslikajo v ustrezne spremembe faze Gaborjevih odzivov, izraĉunanih na sliki očesa.

Eden od moĉnih naĉinov za odkrivanje šarenice znotraj očesa je, da se premikamo s primerjalno masko ustrezne oblike in velikosti po sliki očesa in išĉemo korelacije [5] med očesom in masko. Pomankljivost tega postopka je precejšnja raĉunska zahtevnost, potrebuje pa tudi zaĉetno inicializacijo za posameznega uporabnika.



## Poglavje 4

# Zanimive aplikacije

V splošnem delimo aplikacije na take, ki se ukvarjajo z diagnostiko in na interaktivne sisteme. Pri diagnostiki (v psihologiji, medicini) je cilj pridobiti objektivne in kvalitativne podatke o uporabnikovih vizualnih procesih in njegovi pozornosti. V psihologiji spremljajo obnašanje očesa med opazovanjem določenih scen in s pomočjo tega preučujejo iskalne strategije, vizualni spomin, branje in podobno. V medicini se uporablja za preučevanje delovanja vidnih centrov možganov, diagnosticiranje bolezni, kot je npr. shizofrenija, za katero je značilno netipčno obnašanje oči [7]. Postopek sledenja očem se uporablja tudi v marketinških analizah [8] (Slika 4.1), na primer pri zimskih športih. Sledenje očem gledalcev je namreč pokazalo, kako močno so gledalci osredotočeni na športnike in trenerje. Ne glede na prikazano vrsto zimskega športa, gledalci največkrat gledajo obraze ljudi. Ta ugotovitev bistveno poveča učinkovitost oglasnih površin v bližini obraza (ovratnik, vrat, kapa, čelada), pri čemer je vseeno ali gre pri prikazani osebi za športnika ali trenerja. Zato ni presenetljivo, da so takšna oglasna področja dosegla visoko vrednost. Raziskava prav tako ugotavlja, da gledalci pogosteje in dlje časa gledajo oglasne površine na toplih oblačilih, ki jih nosijo trenerji, člani strokovnega štaba ali športniki pred ter po nastopu, v primerjavi z oglasnimi površinami na oblačilih športnikov med nastopom. V primerjavi različnih športnih panog je opaziti pomembne razlike v dožemanju klasičnih oglasnih



Slika 4.1: Uporaba sledenja oči pri raziskavi trgov.

površin. Vsaka športna panoga ima namreč svojo dinamiko, ki odločilno vpliva na vizualno pozornost gledalca. V tej študiji so si prizadevali ugotoviti tudi kateri elementi v vidnem polju vzbudijo pozornost gledalca, koliko časa gledalec zadržuje pogled na posameznih elementih, kako pogosto se gledalec osredotoči na določen element. Analiza omogoča tudi določanje zaporedja zaznavanja teh elementov in orientiranosti gledalčeve pozornosti. S pomočjo te tehnologije lahko ugotovimo ali je bil prikazani napis prebran oziroma zaznan v celoti. Končni rezultat je, da lahko pri sponzorskih raziskavah podamo bolj natančne informacije o tem, kakšno je gledalčevo zaznavanje oglašnih površin. V marketingu se med drugim ugotavlja tudi uspešnost reklamnih akcij, učinkovitost grafičnega oblikovanja, oglasov, vidljivost reklamnih pasic na spletnih straneh. Rezultati pomagajo izboljšati izkoriščenost oglaševanega prostora, pa tudi določajo ceno le tega. V oblikovalski industriji se poslužujejo sledenju pogledov za primerjavo učinkovitosti različnih uporabniških vmesnikov, na primer za razvoj kontrolnih plošč v pilotskih kabinah in armaturah avtomobilov, za primerjavo različnih zasnov menijev pri uporabniških vmesnikih itd. Pri učenju nekega opravila se spremenijo oziroma prilagodijo premiki oči, zato je možno s preučevanjem premikov pred in po treningu oceniti uspešnost učenja. Pri opravilih kot je vožnja, upravljanje z nevarnimi ali dragimi napravami, je zelo pomembno, da dlje časa ohranjamo dovolj nizko stopnjo utrujenosti in visoko zbranost. Raziskave ocenjujejo, da se od 5 do 25 odstotkov prometnih nesreč zgodi zaradi voznikove utrujenosti.

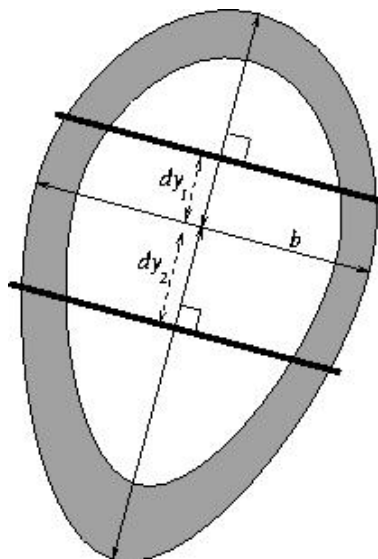
V avtomobilski industriji se zato razvijajo sistemi za ugotavljanje budnosti in zbranosti voznikov, s katerimi se ocenjuje stopnjo utrujenosti. Toyota je svoj varnostni sistem pred trkom izpopolnila z dodatnim sistemom za spremljanje voznikovega obraza z možnostjo zaznavanja dejstva ali so voznikove oči ustrezno odprte [9]. Lokalizacija oči je tudi temeljni korak za vse avtomatske razpoznavalnike obrazov. Ne samo analiza oči (odprti, polodprti, zaprti, itd.), ki nudi dragocene informacije, temveč tudi položaj oči na obrazu se na splošno uporablja kot referenca za iskanje drugih pomembnih delov obraza, kot so obrvi, usta in nos, ki se potem uporabijo za identifikacijo obraza in izraza na njem [10]. Sonijevi fotaparati [11] imajo vgrajen sistem za zaznavanje mežikanja, kamera posname več slik, nato pa izbere tisto, na kateri ima več ljudi odprte oči. Pri pametnih telefonih raziskovalci preučujejo nove tehnike za interakcijo. EyePhone [12] ima vmesnik, ki omogoča upravljanje telefona samo z uporabnikovimi očmi (premik smeri pogleda ali različno hitro zapiranje ter odpiranje očesa). Za sledenje uporabnikovega očesa telefon uporablja kamero nameščeno na sprednji strani. Pri tem uporablja še algoritme strojnega učenja. Za prototip izvajanja EyePhone vmesnika so uporabili telefon Nokia N810. Sistem je sposoben sledenja položaju očesa na zaslonu, kartiranje te pozicije ter klika, ki ga aktivira zaprtje očesa. Ameriško podjetje PixelOptics [13] je razvilo prototip elektronskih očal za daljnovidne, ki občutno ublažijo popačenja v spodnjem delu zornega kota očal. Elektronsko vezje, ki krmili tekoče kristale v lečah, dobi informacijo preko elektronskega tipala, ki zaznava kdaj uporabnik gleda naravnost in kdaj navzdol. Ko sistem za zaznavanje položaja oči dobi informacijo, pošlje električni impulz vezju, ki krmili tekoče kristale in ti v trenutku prilagodijo fokus. Za interaktivne sisteme velja, da zaznavanje premikov (sledilnik) služi kot vhodni sistem, torej se premiki oči uporabljajo kot oblika komunikacije z računalnikom. Za močno hendikepirane osebe je taka oblika komunikacije izjemnega pomena. S pomočjo prilagojene programske opreme lahko komunicirajo s sistemom in posledično z drugimi ljudmi. Samsungov razvojni laboratorij Samsung Creativity Lab [14] je razvil sistem, ki sicer s pomočjo namenske strojne opreme

služi namesto miške. Projekt je zanimiv, ker so javnosti podali tudi izvorno kodo [15]. Cilj interaktivnih sistemov pa ni samo pomoč hendikepiranim osebam. V prihodnosti bo verjetno možna zadovoljiva splošno namenska komunikacija s pogledom: od interaktivnih zemljevidov in računalniških iger, ki jih lahko krmilimo s pogledom, do navigacije in manipulacije z objekti v okoljih navidezne resničnosti. V kombinaciji z razpoznavanjem razpoloženja, gest in govora se bodo odprle možnosti navidezne resničnosti, kjer bo izkušnja uporabnika še bolj pristna kot pri današnjih sistemih.

## Poglavje 5

# Natančno določanje centra očesa s pomočjo krivulj enake intenzitete

Za robusten sistem je bilo potrebno najprej določiti pozicije obrazov na sliki, ki je trenutno v obdelavi. Za to nalogo smo uporabili algoritem avtorjev Viola in Jones [16]. Ta algoritem deluje zanesljivo v vseh svetlobnih razmerah, v primeru večih obrazov na sliki, prav tako mu različne poze obraza ter različne velikosti ne predstavljajo težav. Obrazi imajo tudi različne izraze. Ko smo ugotovili položaj obraza na sliki, smo nadaljevali z iskanjem oči. Regija, ki zajema oko, je tukaj mišljena širše. Ne le zenica in šarenica, temveč celotna regija, ki obsega tudi veke, trepalnice in obrvi. Ta splošna regija je večja in kot struktura prevladuje nad posameznimi enotami. Zato je bolj stabilna in jo je lažje locirati. Čeprav je proces, ki vključuje okoliške regije robustnejši, zmanjšuje natančnost, saj lahko imajo obrisi obrvi, ali pa senčenje okoli oči svoj center, ki se razlikuje od centra zenice. Mi smo uporabili znanje o geometrijski zgradbi obraza in tako omejili regijo. Prostorsko iskanje je omejeno s pravokotnim pasom na glavno os obraza. Model (Slika 5.1) sestavimo z dvema osema, ki se križata na sredini, in  $dy_1$ , ki omejuje pas višje od osi ter  $dy_2$ , ki omejuje pas nižje od vodoravne osi. Dolžini  $dy_1$  in  $dy_2$  lahko določimo



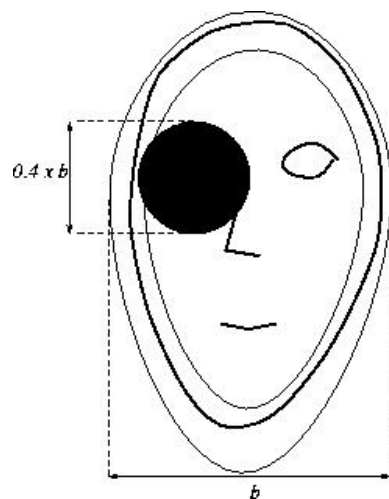
Slika 5.1: Antropološke značilnosti obraza. Zožanje regije na pas s pomočjo poznavanja geometrije obraza.

na podlagi analize obrazov iz baze podatkov.

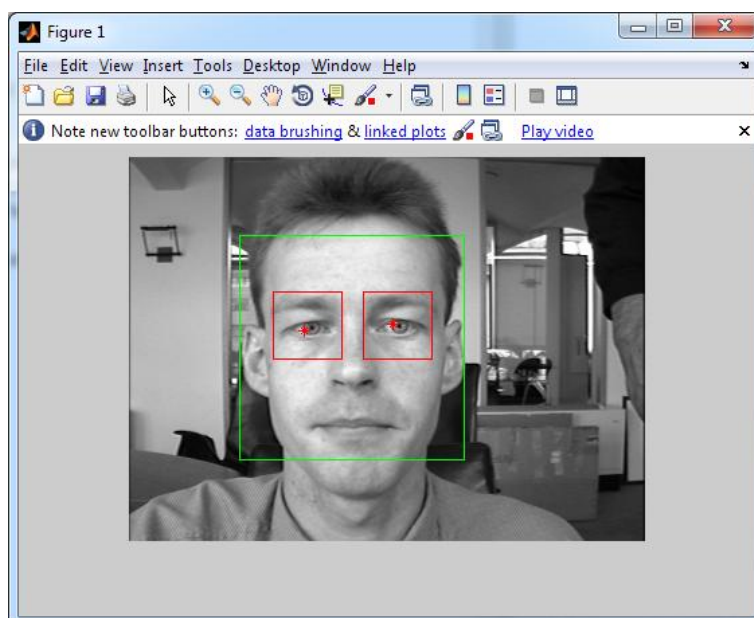
Ker vemo, kakšna je približna dimenzija obraza, lahko okvirno na podlagi širine ugotovimo velikost regije oči. Širina obraza  $b$  je v razmerju s premerom regije očesa  $2r$ :  $2r = 0,4 * b$  (Slika 5.2).

Zaradi lažjega računanja smo območje omejili s kvadratom kot je prikazano na sliki 5.3.

Po uspešnem lociranju regije očesa se osredotočili na iskanje centra očesa. Ideja, katero smo uporabili, temelji na tem, da so oči sestavljene iz radialno simetričnih vzorcev s podobno svetlostjo (intenziteto). Vendar pa v nasprotju z drugimi metodami, ki se osredotočajo in opirajo na simetričnost, tukaj uporabimo izofote (krivulje, ki povezujejo območja z enako intenziteto) [17]. Izofote na sliki so krivulje, ki povezujejo točke enake intenzitete (podobno kot izohipse na zemljevidu povezujejo kraje z isto nadmorsko višino). Ker se izofote ne sekajo ali stikajo, lahko sliko vedno opišemo z izofotami. Imajo pa še dodatno pozitivno lastnost, in sicer da so neodvisne od rotacij in linearnih sprememb osvetlitvenih pogojev.



Slika 5.2: Natančnejše določanje regije iskanja očesa.



Slika 5.3: Antropološke značilnosti obraza. Primer določanja iskalne regije pri našem programu.

Za boljšo predstavitev vpeljemo lokalni koordinatni sistem, kjer ima vsaka točka svoj lokalni koordinatni sistem, ki je nastavljen tako, da kaže v smer maksimalne spremembe intenzitete, ki je določena z gradientom. Vektorja  $\hat{w}$ ,  $\hat{v}$  sta definirana kot:

$$\hat{w} = \frac{L_x \cdot L_y}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}; \quad \hat{v} = \perp \hat{w} \quad (5.1)$$

$L_x$  in  $L_y$  sta odvoda prvega reda funkcije  $L(x, y)$  v  $x$  in  $y$  dimenziji. V tem koordinatnem sistemu je krivulja enake intenzitete definirana kot,

$$L(v, w(v)) = \textit{konstanta}, \quad (5.2)$$

krivulja pa je določena z drugim odvodom  $w$  tangenta vektorja  $w$ . Z odvodom po  $v$  dobimo:

$$L_v + L_w w' = 0; \quad w' = -\frac{L_v}{L_w} \quad (5.3)$$

Ker vemo da je  $L_v = 0$ ; dobimo  $w' = 0$ ; Z odvajanjem po  $v$  naprej dobimo:

$$L_v v + L_{(vw)} w' + L_{(ww)} w'^2 + L_w w'' = 0 \quad (5.4)$$

Če rešimo enačbo za  $\kappa = w''$  in ker vemo da je  $w' = 0$  sledi:

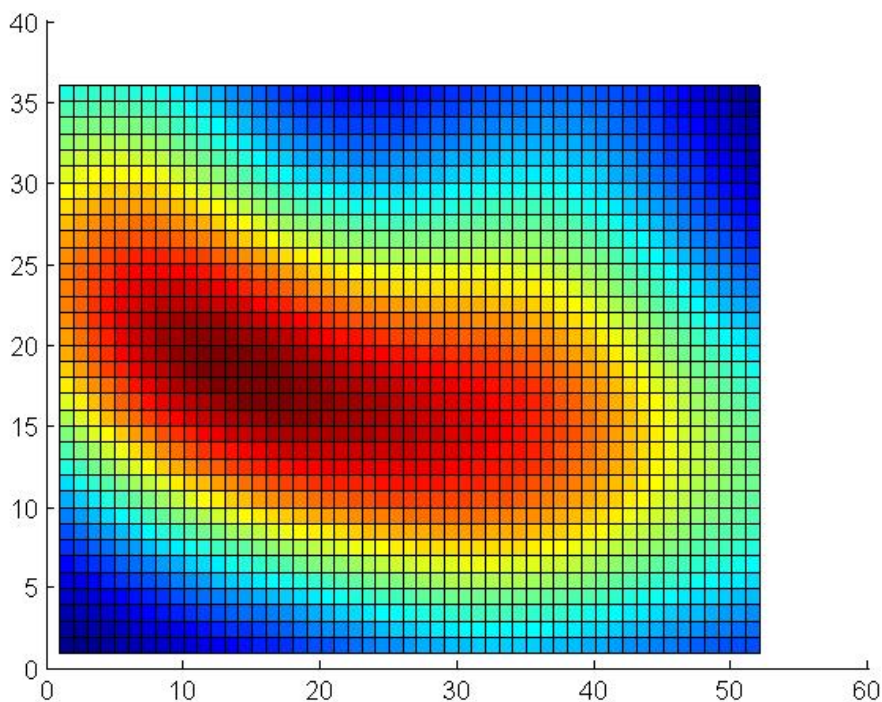
$$\kappa = -\frac{L_v v}{L_w} \quad (5.5)$$

V kartezičnih koordinatah to postane:

$$\kappa = \frac{L_v v}{L_w} = \frac{(L_y^2 * L_{(xx)} - 2L_x L_{(xy)} L_y + L_x^2 L_{(yy)})}{(L_x^2 + L_y^2)^{\frac{2}{3}}} \quad (5.6)$$

Z definicijo krivulje se lahko lotimo iskanja njenega centra. Ker je ukrivljenost krivulje obratno sorazmerna z radijem, lahko enačbo obrnemo in izrazimo radij kroga, katerega (lahko tudi smo del) predstavlja krivulja. Radij sam nam ne pomaga veliko, če ne vemo orientacije in smeri kamor kaže. Orientacija se lahko izračuna iz gradienta, usmerjen pa je vedno proti največji razliki v svetlosti. Predznak krivulij je odvisen od intenzitete na drugi strani, če je zunanja stran svetlejša, je predznak pozitiven. Z množenjem gradienta z





Slika 5.4: Povečana slika IC akumulator-ja .

obratno vrednostjo krivulje, dualnost krivulje poskrbi, da lahko ločimo smer centra. Ker se gradient lahko zapiše kot:

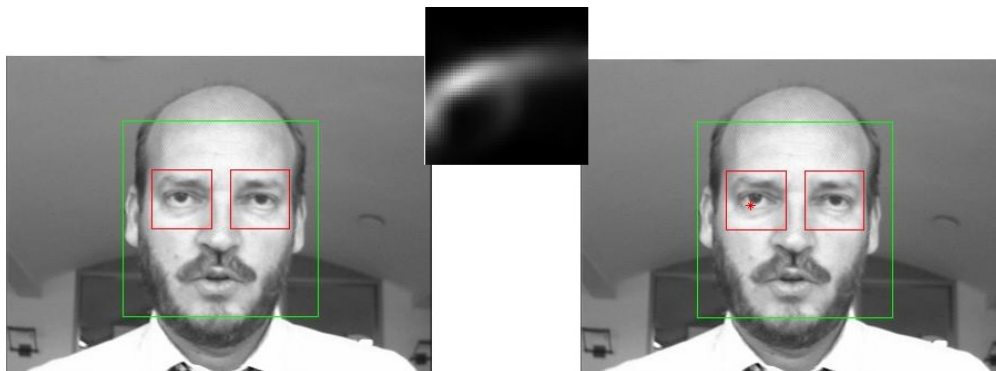
$$\frac{L_x, L_y}{L_w} \quad (5.7)$$

dobimo:

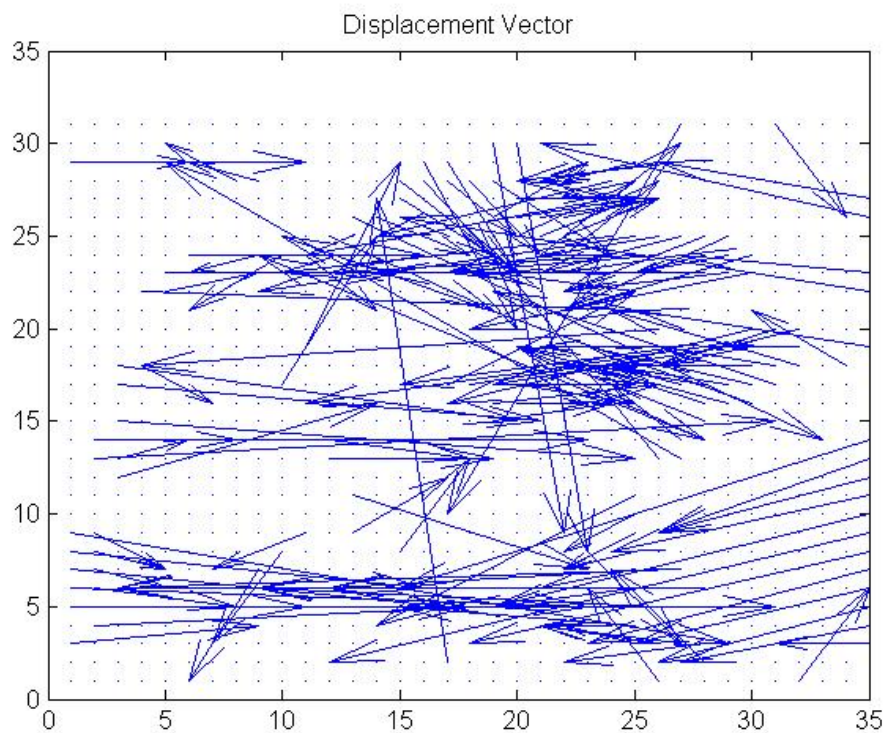
$$D(x, y) = \frac{L_x, L_y}{L_w} * \left( -\frac{L_w}{L(vv)} \right) = -\frac{L_x, L_y}{L_w} = \frac{(L_x, L_y)(L_x^2 + L_y^2)}{(L_y^2 L(xx) - 2L_x L(xy) L_y + L_x^2 L(yy))} \quad (5.8)$$

kjer  $D(x, y)$  predstavlja vektorje (Slika 5.6), ki kažejo na izračunano pozicijo centra. Te centre nato preslikamo v tabelo (Slika 5.4) *mapa centrov krivulj ali IC akumulator* (Slika 5.5).

Ker vsak vektor določi približno pozicijo centra, lahko akumulator zgledimo z gaussovim filtrom, tako da na koncu vsake skupine centrov, ki so



Slika 5.5: Iz natančneje locirane slike očesa se izračuna mapa centrov krivulj, nato pa se iz tega določi maksimalni center.



Slika 5.6: Vektorji, ki kažejo na izračunano pozicijo centra.

relativno skupaj, tvorijo en izračunan center. Nadalje pa lahko doprinos vsakega vektorja pri iskanju centra še utežimo. V realnem svetu nimamo nobenega zagotovila, da so meje objekta enake intenzitete, torej da rob oziroma mejo objekta opisuje samo ena izofota. Če bi v takem primeru dovolili glasovanje vsaki izofoti, bi dobili nesmiselne rezultate, saj oblika izofot ne ustreza obliki objekta. Da se izognemu temu, moramo zagotoviti, da glasujejo samo relevantne izofote, to so tiste, ki sledijo robu objekta. S pomočjo operatorja *ukrivljenost* dobimo več informacije o povezanosti krivulj in meje objekta. *Ukrivljenost* nam pove koliko je krivulja ukrivljena:

$$\text{ukrivljenost} = \sqrt{(L_{\zeta}^2xx) + 2L_{\zeta}^2xy + L_{\zeta}^2yy)}. \quad (5.9)$$

Operator *ukrivljenost* ima nizek odziv na ravnih površinah in robovih, velik pa tam, kjer je gostota izofot maksimalna. Gostota izofot je maksimalna okoli robov objekta, to pa pomeni, da izofote, kjer ima *ukrivljenost* maksimalni odziv, zelo verjetno sledijo robovom objekta in tudi glasujejo za isti lokalni center. Prednost uporabe *ukrivljenosti* v primerjavi s pristopom iskanja robov je v tem, da vsak slikovni element lahko prispeva k odločitvi, s seštevanjem glasov pa dobimo visok odziv na izofotah z istim centrom (z upoštevanjem, da se te krivulje nahajajo na robu). Te visoke odzive imenjemo *izocentri* ali na kratko *IC*. Pri iskanju očesa lahko izkoristimo tudi barvo zenice in šarenice. Ker je predznak izofote krivulje odvisen od svetlosti na zunanji strani krivulje, lahko predvidevamo, da negativni predznak pomeni spremembo gradienta iz svetle v temno območje. S pomočjo tega razlikujemo temne in svetle centre. Ker je pri očesu beločnica svetlejša kot roženica in šarenica, lahko ignoriramo glasove, ki jih prispevajo izofote z pozitivno ukrivljenostjo. Metoda se dobro obnese tudi pri zelo močni osvetlitvi, saj se svetli glasovi ne upoštevajo. Dobro se obnese tudi pri zabrisanih oziroma nejasnih slikah. V praksi pa se srečamo še z določenimi svetlobnimi pogoji ter napakami zaradi napol zaprtih oči, kjer veke zakrivajo del očesa. Tukaj lahko pričakujemo, da bomo dobili napačen maksimalni *IC* ali na kratko *MIC*. V praksi se za izboljšanje uporabi algoritem *Mean Shift* ter

strojno učenje. *Mean Shift* se uporabi direktno na *IC* akumulatorju, z razmislekom, da imajo najrelevantnejši *MIC* najbolj gosto okoliško porazdeljene glasove, in da napačni *MIC* nikoli niso prav daleč do pravih. Iskalno okno algoritma začne na najdenem *MIC* in potem iterira k regiji z maksimalno distribucijo. Po nekaj iteracijah pa je *izocenter* najbližji centru iskalnega okna določen za nov izračunan center očesa. Strojno učenje pa uporabi drugo idejo. Namesto osredotočanje na en *MIC*, se raje osredotoči na  $n$  najbolj relevantnih in med njimi razlikuje z določeno klasifikacijo. Z algoritmom SIFT se izračuna deskriptor na centru okna okoli določenega *MIC*. Tu se tudi predvideva, da je center očesa. Izračunan deskriptor potem primerjamo s knjižnico že izračunanih deskriptorjev, ki smo jih dobili na testni množici in z uporabo KNN klasifikatorja, ki je eksperimentalno dosegel tudi najboljše rezultate, izberemo najrelevantnejši *MIC*.

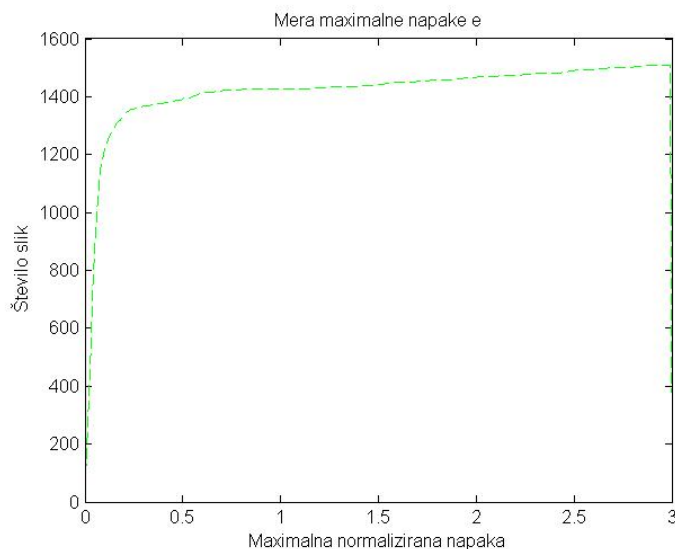
# Poglavje 6

## Testiranje

Za preverjanje natančnosti algoritma smo uporabili javno dostopno bazo BioID [18]. Bazo sestavlja 1520 sivinskih slik, 23 različnih oseb. Velikost slik je  $384 \times 288$ . Slike so bile posnete v različnih svetlobnih pogojih (različni časi dneva), različnih prostorih, različnih orientacijah ter imajo različne velikosti obrazov. Veliko oseb nosi očala, na nekaterih slikah so oči zaprte ali pa obrnjene stran od kamere. Problem predstavlja tudi močan odboj svetlobe od očal, ki popolnoma skrije oči, slike, ki vsebujejo zaprte oči ali zelo svetle oči. Kontrola našemu algoritmu je podana v tekstovni datoteki, ki v tabeli za vsako sliko poda točno lokacijo levega ter desnega očesa, podane z  $x, y$  koordinatami. Za ugotavljanje napake smo vpeljali tako imenovano *maksimalno normalizirano napako*, ki temelji na izračunu najslabšega zadetka očesa in se uporabi kot mera za določanje natančnosti lokacije očesa. Mero je vpeljal avtor Jesorsky [19] in je definirana kot:

$$e = \frac{\max(d_{(levo)}, d_{(desno)})}{w} \quad (6.1)$$

kjer sta  $d_{(levo)}$  in  $d_{(desno)}$  evklidska razdalja med lociranim (izračunanim) očesom in pravo pozicijo očesa v priloženi datoteki. Razdalja med očesoma v priloženi datoteki je  $w$ . Za izračun *maksimalne normalizirane napake* se uporabi najslabše locirano oko, torej lokacija očesa, pri katerem se razdalja od pravega centra očesa najbolj razlikuje. Razdalja se potem normalizira z raz-

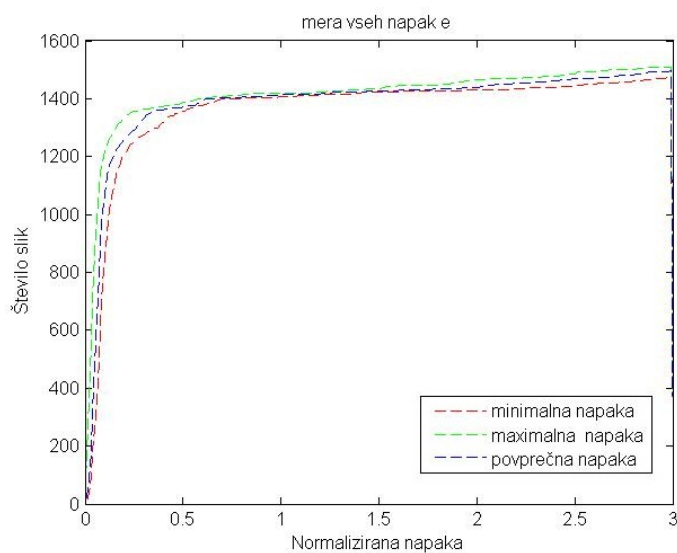


Slika 6.1: Mera napake za maksimalno napako  $e$ .

daljo med očesoma. Za prikaz zgornje meje natančnosti algoritma vpeljemo še *minimalno normalizirano napako*, ki se od *maksimalne* razlikuje le po tem, da uporabimo najboljše locirano oko namesto najslabšega. *Povprečno napako* izračunamo kot povprečje minimalne ter maksimalne normalizirane napake. Grafi prikazujejo natančnost metode za različne mere napake  $e$ .  $Y$  os predstavlja število slik, potek krivulje pa kaže na koliko slikah je bila izračunana napaka manjša ali enaka določeni vrednosti, na  $x$  osi pa se nahaja vrednost napake  $e$ .

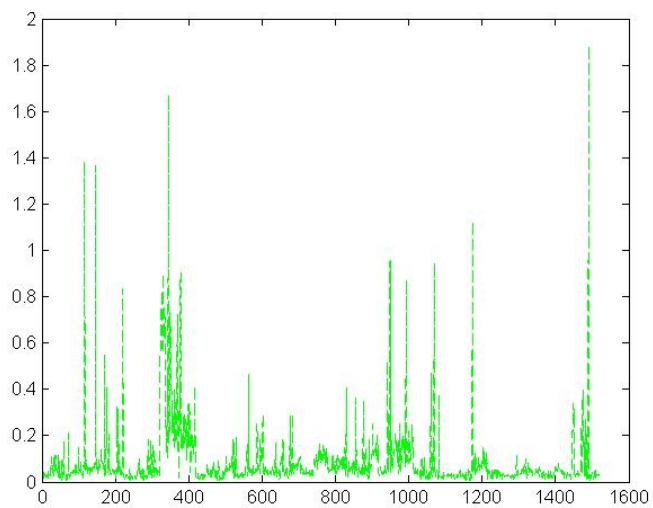
Mera napake za maksimalno napako je prikazana na (Slika 6.1), mera napak, ki upošteva vse meritve skupaj pa na (Slika 6.2).

Napaka po posamezni sekvenci (Slika 6.3) prikazuje napako za posamezno sliko. Tu lahko za vsako sliko vidimo, kakšna napaka je nastala pri računanju središča očesa. Večje špice na grafu prikazujejo napačno detekcijo obraza, manjše špice, velikosti okoli 0.5 pa slabo detektiran center očesa (napaka našega algoritma). Na grafu se npr. lepo vidi občutno slabši rezultat od slike BioID\_0320.pgm do BioID\_0410. Na teh slikah (Slika 6.4) se nahaja oseba z očali, na katerih pa je včasih prisoten še močen odblesk. Problem

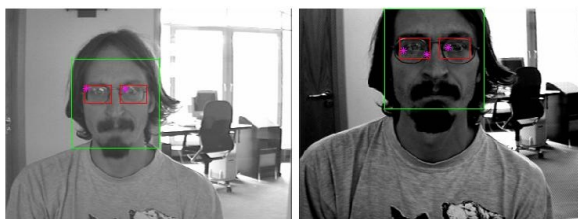


Slika 6.2: Prikaz vseh napak (maksimalna, povprečna in minimalna) .

predstavljajo tudi svetlejšje oči, saj tam šarenica in roženica manj prispevata k izračunu centra, večjo vlogo pa prevzame nadočesni lok ter obrv. Na slikah (Slika 6.5), kjer so oči temnejše in na široko odprte se metoda obnaša boljše.



Slika 6.3: Mera napake po posamezni sliki.



Slika 6.4: Primera slik z motečimi elementi, kjer center očesa ni pravilno določen: levo) viden odsev, desno) oseba nosi očala





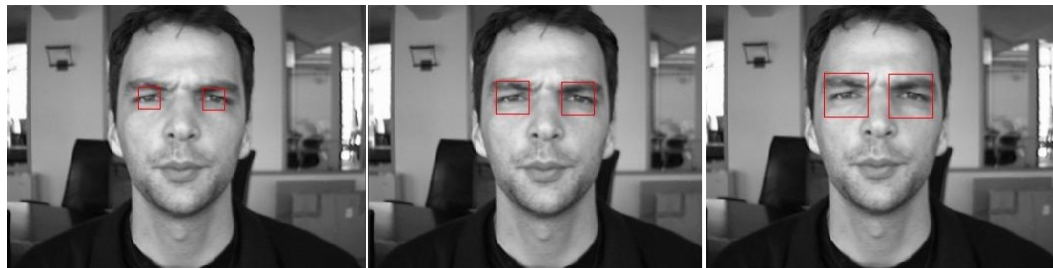
Slika 6.5: Primera slik, kjer metoda deluje dobro.



# Poglavje 7

## Rezultati

Poleg predstavljene metode na osnovi krivulj enake intenzitete v kombinaciji z algoritmom avtorjev Viola in Jones [16] za iskanje obrazov, smo metodo za primerjavo preizkusili še na regiji, katero smo pridobili iz informacije o poziciji oči, ki je priložena vsakemu obrazu v posebni datoteki. Metoda avtorjev Viola in Jones ni omejena samo na iskanje obrazov, temveč se lahko v postopku učenja naučimo tudi vzorce očes, ki jih predstavimo z xml datoteko. Za primerjavo smo uporabili algoritem avtorjev Viola in Jones in za detekcijo oči uporabili datoteko *haarcascade\_eye.xml* [20] ter *ojoD.xml* [21]. Vsaka xml datoteka je bila naučena na različnih naborih slik, zato se tudi rezultati med njima nekoliko razlikujejo. Prvi postopek iskanja centra očesa po metodi krivulj enake intenzite poteka tako, da na sivinski sliki najprej lociramo obraz. Predvidene pozicije oči nato izluščimo na podlagi antropoloških značilnosti obraza (če poznamo pozicijo obraza, poznamo tudi okvirno regijo, kjer naj bi se nahajalo oko). Na tako pridobljeni manjši sliki, ki predstavlja oko in njegovo ožjo okolico nato poženemo algoritem. Algoritem vrne matriko, kamor so preslikani glasovi posameznih slikovnih elementov. Z iskanjem območij z največjo gostoto glasov nato poiščemo najverjetnejše središče očesa. V drugem primeru pa postopek začnemo tako, da informacijo o poziciji oči, ki je priložena vsakemu obrazu v posebni tekstovni datoteki, uporabimo za določitev regije iskanja očesa. S tem smo se izognili napakam, ki jih prinese



Slika 7.1: Primeri različno velikih regij iskanja. 1.) Stranica regije  $a = \frac{1}{3}$  medočesne razdalje  $w$ , 2.)  $a = \frac{1}{2} * w$ , 3.)  $a = \frac{2}{3} * w$

uporaba algoritma avtorjev Viola in Jones. Tako smo lahko našo metodo preizkusili na regiji očesa brez napačno najdenih regij. Med testiranjem smo ugotovili, da je rezultat odvisen tudi od velikosti regije. Zato smo naknadno izvedli še nekaj meritev z različnimi velikostmi regije (Slika 7.1). Regija je kvadrat s stranico  $a$ , ki je odvisna od razdalje med očesoma  $w$ . Središče kvadrata sovpada s centrom očesa. Naknadno smo izvedli še meritev, kjer se center očesa ne nahaja na sredini regije.

Rezultate metod smo primerjali z rezultati v članku [17], kjer je bila metoda na osnovi krivulj tudi prvič predstavljena. Za primerjavo metod smo uporabili podatkovno bazo slik BioID [20].

V (Tabeli 7.1) so predstavljeni rezultati meritev iz članka. Nadalje so predstavljeni rezultati meritev metode krivulj enake intenzitete v kombinaciji z algoritmom avtorjev Viola in Jones, kjer algoritem za prepoznavanje obrazov na sliki ne najde 45 primerov obrazov ali pa prepozna 89 primerov obraza na napačnem področju slike, kar vse pripomore k slabšemu rezultatu. Nato sledijo rezultati uspešnosti metode, kjer je regija očesa znana. Ti rezultati objektivneje kažejo, s kolikšno natančnostjo deluje iskanje oči s pomočjo krivulj z enako intenziteto. Rezultat je delno odvisen tudi od velikosti regije, na kateri poganjamo algoritem. Najboljše rezultate daje velikost regije, ki ima stranici veliki kot polovica razdalje med očesoma. Pri manjših regijah k rezultatu prispeva že majhnost regije, saj je na manjšem območju manj verje-

ukaz/metoda	( $e \leq 0.05$ )	( $e \leq 0.10$ )	( $e \leq 0.25$ )
Rezultati metode iz članka:			
Najboljše oko	93.32%	95.39%	99.00%
Povprečno oko	77.15%	82.11%	96,35%
Rezultati naše metode:			
z uporabo alg. Viola in Jones:			
Najboljše oko	48.88%	82.30%	95.66%
Povprečno oko	12.43%	52.11%	86.84%
Na znani regiji:			
Regija: $a = w * \frac{1}{2}$			
Najboljše oko	72.43%	86.25%	97.24%
Povprečno oko	39.93%	72.70%	92.37%
Regija: $a = w * \frac{1}{3}$			
Najboljše oko	70.59%	82.50%	94.21%
Povprečno oko	41.84%	66.45%	83.68%
Regija: $a = w * \frac{2}{3}$			
Najboljše oko	26.97%	84.28%	98.29%
Povprečno oko	06.51%	46.45%	92.76%
Regija: $a = w * \frac{1}{2}$ , center zamaknjen			
Najboljše oko	18.62%	78.75%	95.53%
Povprečno oko	02.30%	39.87%	89.61%
Viola in Jones			
haarcascade Najboljše oko	68.82%	85.86%	90.79%
haarcascade Povprečno oko	28.95%	64.47%	71.78%
ojoD Najboljše oko	69.61%	88.33%	91.86%
ojoD Povprečno oko	39.31%	63.43%	67.55%

Tabela 7.1: Rezultati meritev.

tno, da bo izračunan center daleč stran od pravega. Razlike smo opazili, tudi če smo znano regijo zamaknili, se pravi da iskan center očesa ni bil na sredini regije, temveč pomaknjen bolj proti robu. Rezultati so se znatno poslabšali, saj v iskanje niso bile vključeni vsi slikovni elementi, ki bi lahko glasovali za pravi center. Pri uporabi metode avtorjev Viola in Jones za iskanje oči z uporabo datoteke haarcascade\_eye.xml je algoritem na bazi BioID prepoznal še 799 oči ki jih na sliki ni bilo. Na 102 slikah pa ni našel nobenega očesa, kar pri celotnem naboru slik pomeni 6,7 % . Z uporabo datoteke ojoD.xml pa je prepoznal še 1148 oči katerih na sliki ni bilo. Na 60 slikah pa ni našel nobenega očesa. Uporaba algoritma Viola in Jones z datoteko ojoD.xml, je zaradi velikega števila lažnih oči, veliko bolj nezanesljiva. Rezultati pridobljeni s kombinacijo detekcije obraza in naše metode so občutno slabši v primerjavi s temi, ko je regija že znana. Ta razlika se pojavi zaradi nekoliko večje začetne regije, saj pri detekciji obraza ne moremo zelo natančno locirati regije očesa in tako lahko pride iskani center očesa v skrajni rob regije. V primerjavi z rezultati iz članka pa razlike nastanejo predvsem zaradi boljše interpretacije mapiranih rezultatov, saj so v članku v postopek vključili še metodo Mean Shift ter SIFT z uporabo KNN klasifikatorja. Verjetno je del krivde za slabši rezultat tudi v implementaciji same metode. Metoda avtorjev Viola in Jones za iskanje oči relativno natančno določi center očesa, vendar pa ga pesti veliko število napačno ugotovljenih oči. Kar 26% je lažno ugotovljenih oči, ter 3,3% primerov, kjer oči sploh ni našel. Iz tega sledi, da zanašanje samo na ta pristop ni dovolj zanesljivo. Tudi uporaba metode Viola in Jones za lociranje obraza ima pomankljivosti, čeprav je za detekcijo obraza na voljo več značilnosti, se v 2,7% primerov zgodi, da obraza na sliki ne najde. Prav tako je 5.4% primerov, ko lažno zazna obraz.

## Poglavje 8

### Zaključek

V diplomski nalogi smo predstavili metodo, ki za določanje centra očesa izkoristi krožne simetrije, ki jih tvorijo izofote (krivulje enakih intenzitet). Metoda je robustna, ne zmotijo jo različne poze obraza, odporna je na linearne spremembe svetlosti in rotaciji, težave pa lahko predstavljajo slike na katerih so osebe z očali, kjer se pojavijo odbleski. Metoda je časovno nezahtevna in tako primerna za uporabo v realnočasnih sistemih. Zaradi uporabe MatLab-a pri implementaciji nismo dosegeli take časovne učinkovitosti, saj je bilo za obdelavo ene slike potrebno približno desetinko sekunde, se pa z lahko metodo z ustrezno optimizacijo pohitri, da deluje detekcija v stotinki sekunde. Metoda je primerna za obdelavo slik v nizki resoluciji, vendar pa je vezana na prisotnost očesa v sliki. Zaradi nizke časovne zahtevnosti, je metoda primerna za uporabo tudi v kombinaciji z drugimi pristopi. Pričakujemo, da bo v prihodnosti z uporabo te metode možno hitro in natančno slediti uporabnikovemu pogledu z uporabo preproste kamere.





# Literatura

- [1] A. L. Yarbus (1967), Eye Movements and Vision, Plenum, New York.
- [2] J. G. Wang, E. Sung, R. Venkateswarlu (2005), Estimating the eye gaze from one eye, Computer vision and image understanding, vol. 98, str. 83-103.
- [3] Y. Matsumoto, A. Zelinsky (2000), An algorithm for real-time stereo vision implementation of head pose and gaze direction measurement, Proceedings AFGR 2000, str. 499-504.
- [4] Weidenbacher U., Layher G., Bayerl P. , H. Neumann (2006), Detection of head pose and gaze direction for humanEcomputer interaction, Perception and Interactive Technologies, str. 9E19
- [5] N. Bhoi, M. N. Mohanty (2010). Article:Template Matching based Eye Detection in Facial Image. International Journal of Computer Applications, vol.12, št. 5, str. 15-18.
- [6] Fukumoto, I. TENCON 99. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference, vol.2 str. 1166 – 1169
- [7] Jason R. Tregellas, Ph.D.; Jody L. Tanabe, M.D.; David E. Miller, Ph.D.; Randal G. Ross, M.D.; Ann Olincy, M.D.; Robert Freedman, M.D. The American Journal of Psychiatry, vol. 161, št. 2
- [8] Falkenau J. Dem Wintersport-Fan über die Schulter geschaut Jahrbuch Sponsoring 2011 str 43–46.

- 
- [9] Toyota Pre-crash Safety System. JCN Newswires Toyota Enhances Pre-crash Safety System With Driver-monitoring Function Sept 7, 2005
- [10] de Brito Leite, Gomes, H.M. Veloso, L.R. ,C.E. ; de Carvalho, J.M. A Learning-based Eye Detector Coupled with Eye Candidate Filtering and PCA Features, str. 187–194, 2007.
- [11] Sony eye blink detection cameras <http://gizmodo.com/5155145/sony-cyber+shot-line-now-with-blink-detection> 2009.
- [12] E. Miluzzo, T. Wang, Andrew T. Campbell EyePhone: activating mobile phones with your eyes Conference: ACM SIGCOMM Conference - SIGCOMM , str. 15-20, 2010
- [13] Revija Življenje in tehnika Sever V. avg. 2011 let. LXII str. 6
- [14] <http://bestproductfeedback.com/samsung-released-the-code-of-your-eye-mouse-eyecan-and-announces-the-launch-of-kits-to-assemble-at-home>. february 2012.
- [15] <http://www.eyecanproject.org/p/english.html>.      january      2013.  
<http://code.google.com/p/eyecan/>
- [16] P. A. Viola, M. J. Jones, "Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features," v zborniku IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), Kauai, HI, USA, dec. 2001, str. 511-518.
- [17] 7. R. Valenti, T. Gevers (2008), Accurate Eye Center Location and Tracking using Isophote Curvature, Proceedings CVPR 2008, Anchorage, Alaska, USA, str. 1-8.
- [18] <http://www.bioid.com/index.php?q=downloads/software/bioid-face-database.html>. Baza slikovnih datotek obrazov.
- [19] O. Jesorsky, K. J. Kirchberg, R. Frischholz (2001). Robust face detection using the Hausdorff distance,. Proceedings AVBPA 2001, str.90-95.

- [20] [http://www-personal.umich.edu/~shameem/haarcascade\\_eye.html](http://www-personal.umich.edu/~shameem/haarcascade_eye.html) Datoteka opisov za algoritem Viola in Jones.
- [21] [http://en.pudn.com/downloads151/sourcecode/middleware/detail657522\\_en.html](http://en.pudn.com/downloads151/sourcecode/middleware/detail657522_en.html). Datoteka opisov za algoritem Viola in Jones.