

## Određivanje smera pogleda oka

---

*U ovom radu je opisan veoma ekonomičan uređaj za precizno određivanje tačke u prostoru u koju korisnik gleda. Opisana je konstrukcija hardvera koji se sastoji od naočara sa jakim okvirom i IC kamere koja snima oko, kao i algoritmi za obradu signala koji su implementirani u drajveru. Uređaj je u stanju da određuje putanju oka na poznatom rastojanju od objekta koji se gleda, ali ne u realnom vremenu, što se nameće kao prostor za unapređenje projekta radi šire praktične primene.*

---

### 1. Uvod

#### 1.1. Istorijat

Određivanje smera pogleda prvi put je korišćeno u psihologiji za promatranje percepcije ljudskog vida. Nekada se praćenje smera pogleda koristilo samo u psihologiji, a danas je spektar primene daleko veći. Veliku primenu ima u marketingu prilikom određivanja najuočljivijih mesta. Vojna i automobilska industrija takođe koriste ove uređaje za poboljšanje svojih sistema. Jedna od važnijih primena je svakako interfejs između računara i njegovog korisnika tj. HCI (Human Computer Interface). Mnoga istraživanja se bave mogućnostima da se pogledom kontrolišu razni procesi na računaru (Duchowski i Vertegaal 2003).

#### 1.2. Anatomija oka

Oko je organ osetljiv na svetlo. Sastoji se iz više celina, a najkorisnije pri njegovom praćenju su zenica, dužica, rožnjača i beonjača. Dužica je mišić koji kontroliše veličinu zenice, tj. količinu svetla koja pada na mrežnjaču. Važno je reći da boja du-

žice varira od čoveka do čoveka, ali se uvek bitno razlikuje od boje zenice (crne). Ova osobina predstavlja veliko olakšanje pri detektovanju karakterističnih regiona u oku.

#### 1.3. Tehnike praćenja oka

Postoji više pristupa ovom problemu, video praćenje, elektrookulografija i metoda sa sočivima koja izazivaju promene u magnetnom polju. Elektrookulografija predstavlja metodu kod koje se elektrode postavljaju blizu oka i prilikom pomeraja se detektuju male promene u električnom polju, takođe postoje i sočiva koja sadrže primese magnetnih materijala u sebi, u ovom slučaju se prilikom pomeraja registruju promene u magnetnom polju.

Najpraktičnija metoda primenjuje video praćenje, kod ovog postupka snima se korisnikovo oko dok gleda u neki objekat, a snimci se obrađuju na adekvatan način. I kod ovog pristupa postoji više rešenja. Prema načinu konstrukcije uređaja postoje pasivni i aktivni sistemi. Pasivan sistem zahteva da korisnik postavi glavu na tačno određeno mesto i da se ne pomera. Ovakvo rešenje kao rezultat daje nešto veću preciznost od aktivnog praćenja, ali je veliko ograničenje to što je glava fiksirana u jednoj tački. Aktivni sistemi omogućavaju da se korisnik nesmetano kreće (Duchowski i Vertegaal 2003).

Prema tome u kom delu spektra svetlosti snimaju kamere postoji podela na infracrveni i vidljivi spektar rada. Oba pristupa rade na sličnom principu, ali je razlika u regionima koje izdvajaju sa slike. Pri radu sa vidljivim delom spektra traži se ivica dužice, zbog izraženog kontrasta sa beonjačom (slika 1 levo). Ipak, rad sa infracrvenim spektrom je povoljniji,

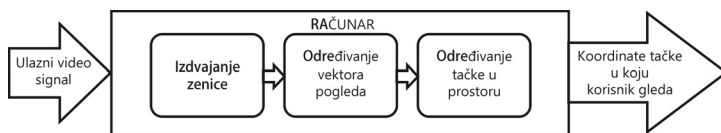
---

*Stefan Krsmanović (1992), Loznica, Dušana Pandurovića 8, učenik 2. razreda Tehničke škole u Loznici*

*Gavriilo Andrić (1991), Valjevo, Blok Nade Purić 2, učenik 3. razreda Valjevske gimnazije*

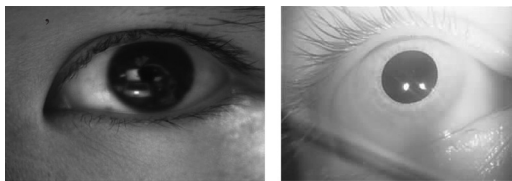
**MENTORI:**

*Marko Bežulj, student ETF u Beogradu*



Slika 2. Tok programa

Figure 2. Algorithm (from video input to the coordinates of the focus of the gaze)



Slika 1. Slika oka u vidljivom spektru (levo) i infracrvenom (desno)

Figure 1. Image of the eye in the visible spectrum (left), and infrared spectrum (right)

jer se u oku jasno izdvaja samo zenica koja je skoro crne boje što znatno olakšava obradu slike (slika 1 desno). Pri radu sa infracrvenim spektrom potrebno je obezbediti osvetljenje oka koje se izvodi IC diodama, otežan je rad pri jakom sunčevom zračenju, zbog velikog odsjaja koji nastaje u zenici.

## 2. Materijal i metode rada

### 2.1. Pristup problemu

U radu je pokušana realizacija aktivnog sistema sa video praćenjem u infracrvenom spektru. Ovakav pristup omogućava korisniku veliku slobodu pri kretanju i širu primenu uređaja. Nedostatak je to što se pri jakom dnevnom svetlu javlja odsjaj u oku, jer se u dnevnom svetlu nalazi i infracrvena svetlost.

Algoritam se sastoji od tri faze, izdvajanje zenice, određivanje vektora pogleda i traženje tačke u prostoru u koju korisnik gleda (slika 2).

### 2.2. Metode rada

#### 2.2.1. Hardver

Pri realizaciji hardvera korišćene su naočare sa čvrstim okvirom, veb kamera, i infracrvene diode. Kako bi konstrukcija bila što lakša uklonjeno je sve sem neophodnih delova (CCD čip i optika). Pored plastike skinut je i filter sa objektivu koji onemogućava infracrvenoj svetlosti da dospe do čipa. Dodati je filter sastavljen od plave i crvene folije koji ne



Slika 3. Hardver

Figure 3. Hardware

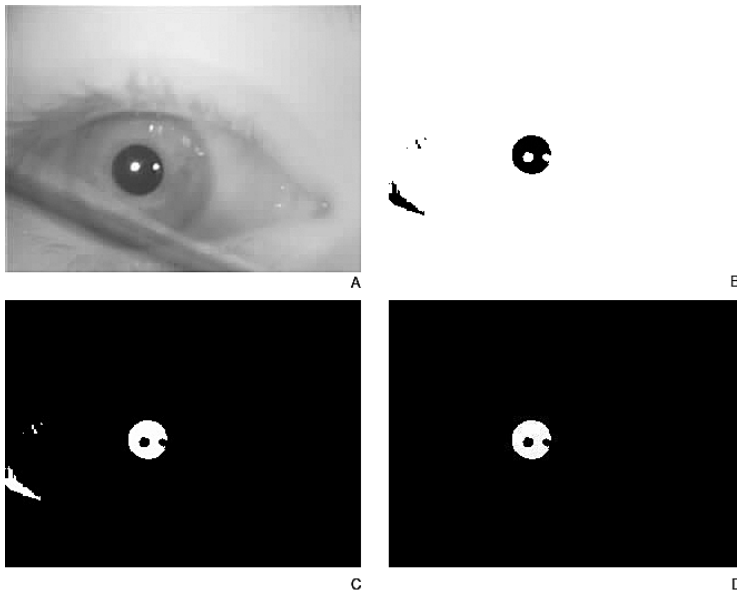
propušta vidljivu svetlost. Za osvetljavanje oka radi lakšeg uočavanja zenice korišćene su dve IC diode. Bitna prednost ovakvog rešenja je niska cena izrade (slika 3).

#### 2.2.2 Softver

##### 2.2.2.1. Izdvajanje zenice

Prototip dražvera je razvijen u programskom okruženju Matlab, koji poseduje veliki broj funkcija za obradu slike. Na samom početku se svaka slika konvertuje u grayscale (nijanse sive), pa zatim u binarnu sliku. Konvertovanje slike u nijanse sive podrazumeva to da se svakom pikselu u boji dodeli odgovarajuća vrednost između minimuma (crna) i maksimuma (bela) tj. između 0 i 255. Pri binarizaciji slike određuje se prag binarizacije (vrednost između 0 i 255) a potom se svaki piksel upoređuje sa pragom. Ukoliko je manji od praga dodeljuje mu se vrednost minimuma tj. crna boja, u suprotnom piksel je beo (Woods *et al.* 2004; Popović 2006).

Kao priprema slike za izdvajanje zenice prethode konvertovanje slike u nijanse sive (slika 4 A), a zatim i u binarnu sliku (slika 4 B). Ovo su dva veoma važna koraka jer se već posle binarizacije izdvoji zenica i ponekad još par manjih crnih objekata, koji se u narednim koracima uklanjaju. Pre nego što



Slika 4.  
 Koraci pri izdvajanju zenice  
 A – slika u nijansama sive  
 B – binarizovana slika  
 C – invertovana slika  
 D – izdvojena zenica

Figure 4.  
 Steps to allocate pupil  
 A – grayscale image  
 B – binary image  
 C – inverted image  
 D – allocated pupil

se izdvoji najveći objekat slika se invertuje (beli pikseli postaju crni i obratno), jer je to zahtev funkcije za izdvajanje najvećih objekata koja je implementirana u MATLABU (slika 4 C). Uklanjanje nepotrebnih objekata se vrši prebrajanjem belih tačaka koji zajedno čine celinu, najmanji se odbacuju i ostaje zenica kao najveća skupina (slika 4 D). Problem se javlja zbog odsjaja od dioda u zenici koji može pomeriti centar. Postupak koji se koristi u programu radi po principu popunjavanja belih polja unutar zenice. Nakon ovog koraka zenica je spremna za obradu.

Kako bi se odredio vektor pogleda, potrebno je odrediti centar zenice. Za ovaj korak postoje tri rešenja koja smo testirali.

Prvo rešenje se svodi na traženje najbolje elipse koja obavija zenicu, a zatim njenog centra. Drugi način je određivanje centra mase zenice. U trećem postupku se traže granični pikseli zenice i na taj način se dobijaju ivice pravougaonika čiji je centar ujedno i centar zenice.

Prva metoda, tj. traženje elipse koja najviše odgovara obliku koji je preostao na slici, zahteva da se odredi ivica zenice (slika 5). Nakon toga se kroz svaku tačku ivice provlače elipse i elipsa koja na svom obodu ima najviše tačaka koje pripadaju ivici zenice izdvaja se kao najbolja. Ovaj postupak je veoma precizan, ali zahteva dugo vremena za obradu svake slike. Kao moguće poboljšanje ove metode potrebno je smanjiti broj tačaka koje čine ivicu

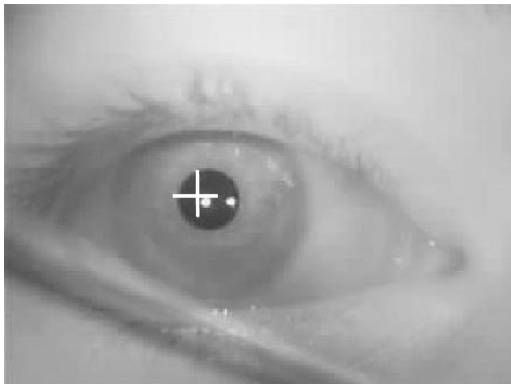
zenice, na taj način se višestruko smanjuje broj elipsa koje se provlače kroz svaku tačku što rezultira ubrzanjem programa.

Drugi način za izdvajanje centra je da se odredi centar mase tela (slika 6), to se postiže sabiranjem vrednosti  $h$  i  $u$  ose svakog piksela koji pripada zenici, a zatim određivanjem srednje vrednosti za svaku osu. Te vrednosti predstavljaju koordinate centralne tačke. Rezultat koji se dobije unosi veliku grešku u račun, ali obrada slike je brza. Greške koje se javljaju su posledica odsjaja koji stvaraju diode na ivici



Slika 5. Metoda izdvajanja elipse

Figure 5. Ellipse extraction method

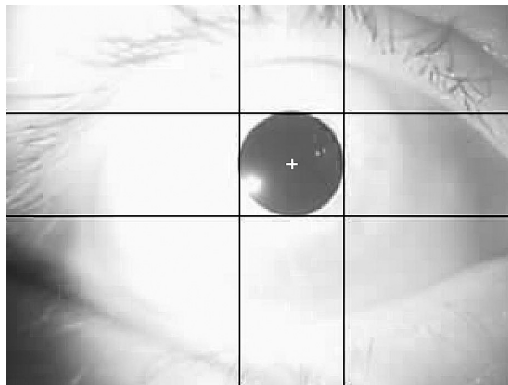


Slika 6. Metoda centra mase

Figure 6. Mass center method

zenice. Na ivici se javljaju rupe koje menjaju srednje vrednosti za svaku osu i mogu pomeriti centar za više od pet piksela. Postoje mogućnosti da se problem reši hardverskom ili softverskom metodom. Hardverska metoda podrazumeva drugačiji način osvetljenja, tako što će diode osvetljivati difuznu pločicu koja će odbijati raspršenu svetlost ka oku, pa je odsjaj manji. Drugi način je da se nađe odsjaj diode, koji je najsvetlija površina na slici, i da se zatim izdvoji ivica ovog polja. Nakon toga se određuje koliko tačaka ivice ima crne „komšije“, tj. tačke same zenice, ako taj broj pređe određeni prag celo polje se zacrni. Ovaj postupak bi doprineo preciznosti ali bi znatno usporio algoritam.

U trećem slučaju (slika 7) se vrši pretraga duž svake kolone, odnosno reda matrice koja predstavlja sliku. Pretraga počinje od krajnjih piksela jedne a zatim i druge ivice slike. Ispituje se boja svakog piksela, a ukoliko je bela to znači da pripada zenici i tu se pretraga obustavlja, a koordinate te tačke se pamte. Četiri tačke koje se pamte pripadaju ivicama pravougaonika u koji je upisana zenica. Nezavisno od položaja zenice, centar pravougaonika će uvek biti i njen centar (slika 13). U poređenju sa prethodne dve metode obrada slika je znatno brža, a rezultati koje daje su precizni i prikazani su u tabeli 1. U nekim slučajevima pojavljuje se greška koja može uticati na pomeranje centra zenice za vrednost od jednog do dva piksela. Izostavlja se korak popunjavanja rupa od dioda, jer se koriste samo ivične tačke zenice. Zbog svih karakteristika koje ovaj



Slika 7. Metoda pravougaonika

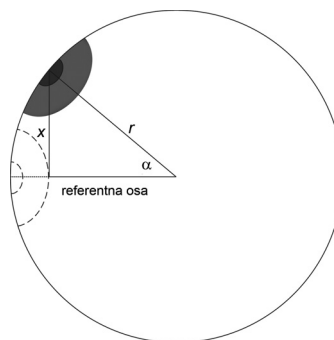
Figure 7. Rectangle method

metod poseduje izabran je kao najbolje rešenje za pronalaženje centra zenice.

U sva tri slučaja sistem se može ubrzati lokalizovanjem pretrage, jer se oko između dve slike može pomeriti samo za  $n$  tačaka, što se može iskoristiti za smanjenje polja u kom se traži zenica. Ipak, poboljšanje ima osetnog efekta samo kod prve metode.

#### 2.2.2.2 Određivanje vektora pogleda

Ono što prvo treba da se uradi jeste da se pronađe referentna tačka, tj tačka koja je izvedena iz centra zenice u trenutku kada je korisnik gledao pravo. Vektor se određuje tako što se preko poznatog poluprečnika oka i poznatog rastojanja „novog centra“ od referentnog određuje ugao u svakoj ravni (slika 8):



Slika 8. Određivanje vektora pogleda

Figure 8. Determination of gaze vector

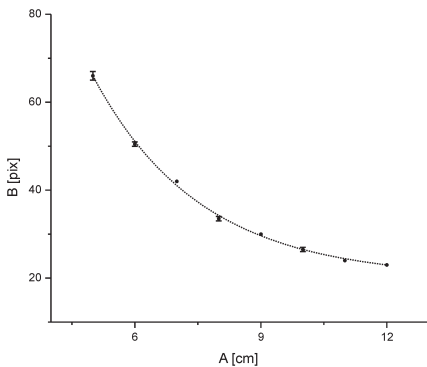
$$\alpha = \arcsin \frac{x}{r} \quad (1)$$

gde je  $\alpha$  – ugao pomeraja zenice u jednoj od ravni,  $r$  – poluprečnik oka, a  $x$  – rastojanje od referentne tačke po jednoj od osa.

Pri računanju ugla javlja se problem, jer poluprečnik oka i koordinata nisu u istim mernim jedinicama. Kako bi se jedinice uskladile potrebno je izvršiti pretvaranje centimetara u piksele. Poznata dužina u centimetrima snimana je sa različitih (poznatih) rastojanja kamerom pri rezoluciji 240×320, a zatim su prebrajani pikseli koju ta dužina zahvata na slici. Sa tim rezultatima nacrtan je grafik (slika 9) u programu Origin kroz čije tačke je fitovana eksponencijalna kriva (formula 2):

$$y = 325.6 \cdot e^{-0.4 \cdot x + 20} \quad (2)$$

gde je  $x$  – rastojanje u centimetrima, a  $y$  – dužina jednog centimetra u pikselima.



Slika 9. Zavisnost broja piksela od rastojanja

Figure 9. Number of pixels vs. distance

Vektor pogleda oka određen je  $\mathbf{B}(\alpha, \beta, r)$  određen je uglom pomeraja zenice u x-ravni ( $\alpha$ ), uglom pomeraja zenice u y-ravni ( $\beta$ ) i poluprečnikom oka ( $r$ ).

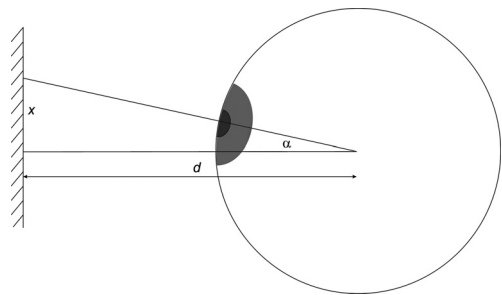
2.2.2.3 Određivanje tačke u prostoru u koju ispitanik gleda

Nakon određivanja vektora pogleda ( $\mathbf{B}$ ) potrebno je odrediti i tačku u prostoru u koju korisnik gleda. Da bi se dobio takav podatak potrebno je znati rastojanje objekta koji se posmatra od oka. Ovaj podatak je problem, jer se rastojanje tačaka u koje se posmatra stalno menja usled kretanja korisnika. Ipak,

ako se uređaj koristi za rastojanja koja su stalna (platno, monitor) ovaj problem se neće javljati (slika 10). Ako je rastojanje fiksno  $x$  i  $y$  koordinate dobijaju se sledećom formulom:

$$x = d \tan \alpha$$

gde je  $x$  – jedna od koordinata tačke u koju se gleda,  $\alpha$  – ugao pomeraja zenice u jednoj od ravni, a  $d$  – rastojanje od centra oka do površine u koju se gleda.



Slika 10. Određivanje tačke u koju ispitanik gleda

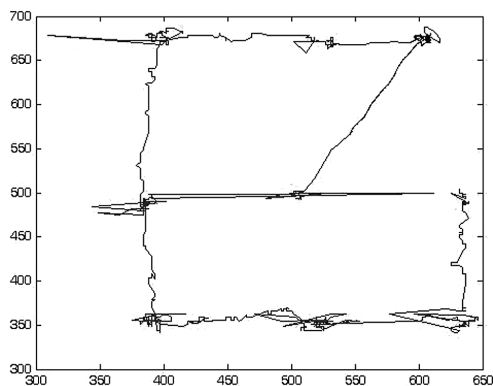
Figure 10. Determination of the observed point

#### 2.2.2.4 Uklanjanje treptaja

Prilikom treptaja zenica nije više najtamniji objekat. Tada se dešava da se kao najtamniji objekat izdvoji neki od manje osvetljenih delova slike. Kako bi se izbegli slučajevi da se u račun unose pogrešni podaci napravljen je filter koji uklanja ove tačke. Sastoji se od dva sloja. Prvi sloj uklanja tačke čije su vrednosti uglova veće od 25°, a drugi sloj meri međusobno rastojanje između dve susedne tačke. Meranjem je utvrđeno da najveće dozvoljeno rastojanje iznosi 70 piksela, a svaka tačka koja je udaljena za više od navedene vrednosti se uklanja (slike 11 i 12).

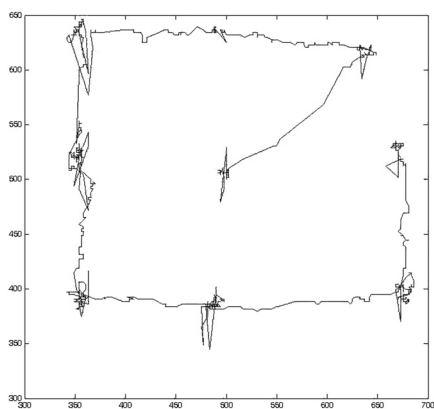
### 3. Rezultati

Merenja su vršena na rastojanju od jednog metra od ploče na kojoj su iscrtana četiri kvadrata stranice 0.26 m što odgovara tangensu ugla od 15°, ova četiri kvadrata zajedno predstavljaju radnu površinu (slika 13). Ovaj ugao je odabran iz razloga što čovek kada sa pomenutog rastojanja gleda nešto što je na većim uglovima pomera celu glavu. Radna površina sadrži



Slika 11. Putanja oka bez filtera

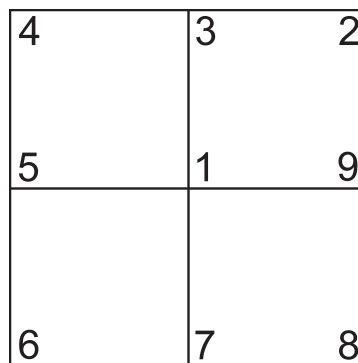
Figure 11. The path of the eye without the filter



Slika 12. Putanja oka sa filterom

Figure 12. The path of the eye with a filter

devet tačaka, tako da je vršeno isto toliko merenja. Korisnik je sniman dok gleda prvo u centralnu (referentnu) tačku (tačka 1 na slici 13), a zatim u neku od preostalih osam. Kao uzorak iz snimaka je uzeto po 150 slika za testiranje. Na svakoj slici je izračunato u kom smeru je orijentisano oko, odnosno pod kojim je uglom u odnosu na referentni položaj. Pre svih merenja na isti način određeno je koji od tri pristupa problemu je najbolji. Najbolje rezultate dala je treća metoda, obrada slike je najbrža (sedam slika u sekundi), a tačnost pri određivanju centra je u rangu sa prvom metodom. Rezultati koji su dobijeni prikazuju tačnost, ali i ponovljivost uređaja.



Slika 13. Radna površina

Figure 13. Workspace

Tabela 1. Rezultati merenja

Tačka	x-osa [°]	y-osa [°]
1	0.19±0.12	-0.03±0.17
2	16.2±0.4	12.8±0.2
3	2.5±0.2	12.8±0.4
4	-11.4±0.5	2.8±0.2
5	-11.9±0.3	0.03±0.13
6	-11.3±0.2	-13.6±0.3
7	-2.1±0.4	-13.6±0.5
8	14.8±0.2	-12.84±0.3
9	16.8±0.2	0.53±0.15

## 4. Diskusija

Rezultati koji su dobijeni ukazuju na grešku do 3.59° koja je posledica dveju okolnosti. Prva okolnost je sam poluprečnik oka koji je različit kod svake osobe (1.25 cm prosečna vrednost poluprečnika oka), a druga je osobina oka da stalno pravi male pokrete, tj. da nikada ne miruje.

Ovi pokreti su najveći uzrok greške i nije ih moguće ukloniti, zbog same prirode oka.

Uređaj pravi malu i prihvatljivu grešku, koja se može smanjiti povećanjem rezolucije slike.

Dalja unapređenja sistema podrazumevaju dodavanje druge kamere i rad u realnom vremenu. U zavisnosti od toga da li je za normalno fun-

kcionisanje uređaja potrebna tačna slika u koju korisnik gleda ili su potrebne samo koordinate tačke koristi se kamera u boji odnosno IC kamera. Kamera u boji ima za cilj prikazivanje vidnog polja korisnika i tačke u koju on gleda. Javlja se problem ukoliko rastojanje između korisnika i radne površine nije stalno. Ako se uređaj koristi za kontrolu računara problem razdaljine se rešava uvođenjem IC kamere i četiri IC diode koje bi ograničile radni prostor. Na taj način bi u svakom trenutku znali položaj i rastojanje glave u odnosu na radnu površinu.

## 5. Zaključak

Sistem se trenutno može koristiti za određivanje putanje oka pri posmatranju objekta na konstantnom rastojanju. Kao unapređenje planirano je da se uređaj dovoljno ubrza za rad u realnom vremenu i da se osposobi za praktičnu primenu.

## Literatura

Duchowski A., Vertegaal R. 2003. *Eye-Based Interaction in Graphical Systems: Theory & Practice*. London: Springer

Popovic M. 2006. *Digitalna obrada slike*. Beograd: Akademska misao

Woods R. E., Eddins S. L., Gonzalez R. C. 2004. *Digital image processing using MATLAB*. Pearson: Prentice Hall

---

*Stefan Krsmanović and Gavriilo Andrić*

## Determining the Direction of the Gaze

In this paper a very cost-effective device for determining the precise point in space which a person views is developed. A description of the hardware, which consists of glasses with a strong frame and IC camera that captures the eye, is given, as well as several algorithms for processing signals that have been implemented in the driver. The device is able to determine the path of the eye to the given distance of the observed object, but not in real time, which could be improved for better practical application.

