

METODA ZA PRAĆENJE POKRETA OKA NA OSNOVU ODREĐIVANJA POZICIJE DUŽICE NA SLIKAMA

A METHOD FOR EYE TRACKING BASED ON IRIS LOCALIZATION IN IMAGES

Predrag Lugonja, Borislav Antić, Vladan Minić, Dragan Letić, Dubravko Čulibrk, Vladimir Crnojević
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Sadržaj – Konstrukcija robusnog i efikasnog algoritma za lociranje i praćenje dužice oka na slici predstavlja izazov u kompjuterskoj viziji. U radu je predloženo jedno rešenje za postravljeni problem koje se može koristiti u sistemima za ispitivanje subjekata u cilju proučavanja psihovizuelnih mehanizama za detekciju značajnih delova u slici. Algoritam se sastoji od modula za segmentaciju dužice oka na osnovu boje i modula za određivanje pozicije dužice oka u svakom frejmu video sekvence. Segmentacija na osnovu boje ostvarena je pomoću Mahalanobisovog rastojanja, koje je određeno na osnovu prethodno estimirane kovarijanse dužice oka u RGB kolor prostoru. Precizno određivanje pozicije dužice oka u slici omogućeno je geometrijskim tehnikama za izračunavanje centra dužice i njenog prečnika. Predloženi algoritam je testiran na video sekvencama u kojima su okularni pokreti snimljeni sa velike blizine i pokazuje odlične rezultate u pogledu tačnosti i brzine izvršavanja.

Ključne reči – Praćenje dužice oka na slici, segmentacija na osnovu boje, određivanje vizuelno značajnih detalja na slici.

Abstract – Developing a robust and efficient eye tracking algorithm is a challenge in the area of computer vision. In this paper an algorithm for eye tracking is proposed that can be used in systems for psychophysical experimental studies on visual saliency. It consists of a module for color based iris segmentation and a module for iris location estimation in each frame of a video sequence. Mahalanobis distance that is obtained from the previously estimated iris covariance in RGB color space is used for color based segmentation of iris. Precise iris localization in an image is realized using geometric techniques for calculation of iris center and the diameter. The described algorithm is tested on video sequences that capture ocular movements recorded from close up and it performs excellent in terms of accuracy and execution rate.

Keywords – Eye tracking, color based segmentation, visual saliency detection

1. UVOD

Čovek pokušava da reši problem praćenja oka više od sto godina. Prve tehnike za praćenje oka su bile izuzetno invazivne. Među njima se izdvajaju one koje su bile zasnovane na direktnom mehaničkom kontaktu sa rožnjačom ili korišćenjem elektroda koje su postavljene oko oka i merenjem razlike potencijala detektovale pokret oka. Dodge i Cline su 1901. predložili prvu preciznu, neinvazivnu metodu, koja se zasnivala na refleksiji svetlosti od rožnjače. Metoda je pratila samo horizontalne pokrete koji su beleženi na fotografskom papiru. Vecina modernih sistema za praćenje oka koristi sliku za praćenje oka.

Pokreti oka predstavljaju najbrže i najčešće pokrete u ljudskom organizmu. Brzi simultani pokreti oba oka, koji se nazivaju sakade, imaju ugaonu bzinu veću od 500°/sec. Što se oko okrene za veći ugao to je njegova ugaona brzina veća. Dužina trajanja sakada je svega 50ms. Ovi pokreti mogu da se dese i tri puta u jednoj sekundi[4]. Predloženi sistem ima dovoljnu brzinu da detektuje ove pokrete.

Na tržištu se mogu naći gotovi sistemi za praćenje oka, ali je cena tih sistema izuzetno velika. Predloženi sistem po svojim preformansama parira tim sistemima za mnogo nižu cenu.

Sistemi za praćenje oka koji se trenutno sreću mogu se podeliti u dve grupe. U prvu grupu spadaju sistemi koji snimaju lice ili još širi kadar i na njemu detektuju oko. Postoje dva principa rešavanja ovog problema. Prvi koriste snimke dobijene infracrvenom kamerom[5][6][7]. Sistemi koji prate oko na osnovu infracrvene svetlosti zasnivaju se na snažnoj refleksiji infracrvene svetlosti od dužice oka. Ovo predstavlja jednostavan i veoma tačan metod za detekciju oka. Ozbiljan problem predstavlja činjenica da je za ovaj metod potrebna dodatna oprema, gde spadaju infracrveni izvor svetlosti i infracrvena kamera. Drugo rešenje problema, gde se snima krupan kadar, jeste da se koriste "obične" kolor kamere. Smith u radu [8] koristi boju za segmentaciju lica. Na pronadjenom licu vrši se detekcija oka. Pošto boja kože varira od osobe do osobe, ovaj sistem nije robusan. U sistemu koji je predložio Baluja[9] za pronalaženje oka koristi se

neuralna mreža. Najveći problem ovog sistema je potreba za velikim brojem slika oka da bi se iztrenirala neuralna mreža.

Drugi pristup praćenja oka zasniva se na kameri fiksiranoj na glavi osobe čije se oko prati. I ovde imamo sisteme koji se zasnivaju na snimanju oka u infracrvenom delu spektra. U radu [11], predstavljen je metod koja oko detektuje na osnovu refleksije infracrvene svetlosti od oka. Metoda se naziva "svetla zenica." U radu [10] prikazana je metoda "tamne zenice." On se zasniva na principu da ukoliko se oko osvetli sa infracrvenom svetlosti koja pada pod normalnim uglom na zenicu, tada zenica upija infracrvenu svetlost i tako da na mestu zenice u slici imamo jako male vrednosti. I ovde su metode zasnovane na infracrvenoj svetlosti izuzetno precizne, ali i opet je potrebna dodatnu oprema.

Algoritam prestavljen u ovom radu snima oko sa kolor kamerom fiksiranom za glavu osobe čije oko snimamo. Rešenje se sastoji od dela za segmentaciju dužice oka na osnovu boje, korišćenjem Mahalanobisovog rastojanja i dela za precizno određivanje pozicije centra dužice oka i njenog prečnika.

U drugoj glavi rada objašnjena je metoda koja je korišćena za segmentaciju slike na osnovu boje. Objasnjene geometrijskih operacija koje su potrebne da bi se precizno odredila pozicija centra i poluprečnik dužice oka dat je u trećoj glavi. U četvtoj glavi su prikazani eksperimentalni rezultati. Peta glava predstavlja zaključak i izložen je plan daljih istraživanja.

2. SEGMENTACIJA NA OSNOVU BOJE

Predloženi sistem zasniva se na segmentaciji slike koja je dobijena kolor kamerom fiksiranom za glavu osobe čije oko pratimo. Kamera koja je fiksirana u mnogome olakšava posao praćenja oka. Da nije fiksirana prvo bi bilo potrebno detektovati i pratiti lice na snimku, a tek posle toga bi se vršila detekcija i praćenje oka. Pošto se dobija slika samog oka, korak detektovanja lica je suvišan. Na ovaj način značajno ubrzavamo obradu i vršimo preciznije praćenje.

Sistem nije upotpunosti automatizovan. U prvom frejmu potrebno je obeležiti dužicu oka. Ovaj korak je od presudne važnosti za kvaliteta praćenja, jer informacije koje se tada dobiju koristite se za klasifikaciju do samog kraja obrade snimka.

Euklidsko rastojanje je logična izbor za brzo i jednostavno klasifikovanje. Ono predstavlja meru udaljenosti u trodimenzionalnom koordinatnom sistemu, pa se lako može primeniti u segmentaciji na osnovu boje, jer je i prostor boje trodimenzionalan. Euklidsko rastojanje ima dve velike manjkavosti. Prva se ogleda u izuzetno velikoj osetljivosti u situacijama kada su podaci dati u različitim skalama. Problem sa skalom ne postoji jer tri promenljive imaju isti opseg vrednosti. Druga manjkavost je ta da je euklidsko rastojanje slepo u odnosu na korelisanost podataka. Zbog ovog drugog problema, odlučili smo se da za segmentaciju na osnovu boje koristimo Mahalanobisovo rastojanje[1].

Za računanje Mahalanobisovog rastojanja vektora od skupa vektora potrebno je da znamo srednju vrednost i kovarijansnu matricu datog skupa. Ukoliko sa x obeležimo

trodimenzionalni vektor $x = (x_1, x_2, x_3)$, tada je Mahalanobisovo rastojanje dato izrazom[2]:

$$D(x) = \sqrt{(x - \mu)^T C^{-1} (x - \mu)}, \quad (1)$$

gde je C^{-1} inverzna kovarijansna matrica, a $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)$ srednja vrednost skupa vektora od kog rastojanje računamo. Jednostavnim poredjenjem vrednosti D sa pragom dobija maska tačaka koje su po svojim karakteristikama bliske krakteristikama dužice oka. Posto se srednja vrednost i kovarijansna matrica dobijaju na osnovu piksela obeleženih u prvom frejmu, kvalitetno obeležavanje je ključ dobre segmentacije.

3. GEOMETRIJSKE TEHNIKE ZA IZRAČUNAVANJE CENTRA I PREČNIKA DUŽICE OKA

Da bi se pojednostavio proces praćenja oka, pretpostavilja se da spoljna ivica dužice oka predstavlja krug, a da njen centar predstavlja tačku koja se prati. Na ovaj način umnogome se uprošćava algoritam, a da pri tome se ništa nije izgubljeno na kvalitetu praćenja.

Pronalazanje krugova u slici je čest problem, pa zato postoje mnogi algoritmi koji ga rešavaju (Hough-a transformacija). Osnovni problem kod ovih algoritama jeste da njihova brzina nije velika. Pored problema u brzini pokazuje se da oni vrlo često ne uspevaju da pronadju krug i u situacijama kada je veći deo dužice vidljiv i pravilno isegmentiran. Kao što se može videti na Sl. 1. dužica oka je vrlo često zaklonjena sa gornje i donje strane kopcima. Posle segmetacije takvih slika, iz dobijene maske, a ne poznavajući osobine te maske, nije moguće pronaci krug. Zbog gore navedenih razloga gotova rešenja ne mogu da koriste, te se znajući karakteristike segmentirane maske, pomoću par jednostavnih geometrijskih operacija, pravi rešenje koje sa velikom brzinom i tačnošću detektuje krug koji predstavlja ivicu dužice.

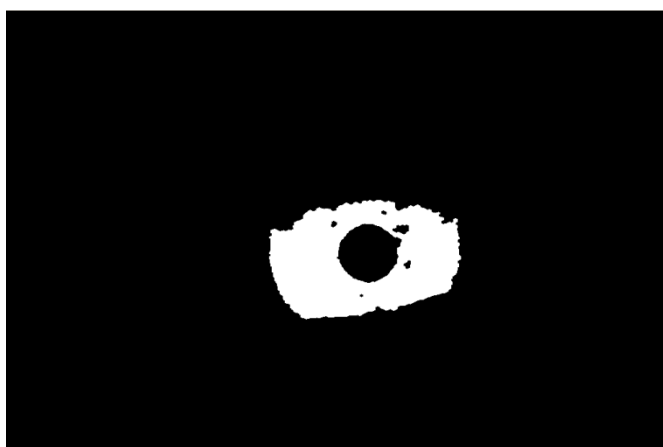
Masku, koja se dobija segmentacijom na osnovu Mahalanobisovog rastojanja, prvo je potrebno jednostavnim morfološkim operacijam filtrirati. Posle fitriranja maska se sastoji od nekoliko nezavisnih kontura, gde najveća kontura reprezentuje dužicu, a ostale konture u daljoj obradi se zanemaruju. I pored morfološke obrade dobijena kontura nije glatka. Pošto segmentacija po boji koja je primenjena, sa parametrima koji su zadati, nikada neće detektovati beonjaču, rapavost nastaje usled nesavršene detekcije dužice. Da bi se ne utralisala rapavost, a samim tim dobila kontura koja vernije reprezentuje dužicu, izvršava se konveksno zatvaranje date maske. Ova struktura se može predstaviti sa manje tačaka, sto će umogome ubrzati obradu.

Posmatrajući Sl. 1. uočava se da je granica izmedju kapaka i dužice oka linija čiji je nagib u svakoj tački u odnosu na horizontalu mali. Krećući se duž konture mogu se pronaći tačke koje ispunjavaju ovaj uslov. Te tačke treba ne pripadaju kružnici pa ih treba izuzeti. Cilj je zadržati samo tačke koje predstavljaju granicu izmedju beonjače i dužice.

Primenom jednostavnih geometrijskih operacija sa velikom preciznošću se može odrediti centar kruga. Ukoliko se zna da je neka struktura kuržna, odabirom bilo koje tačke na ivici



a)



b)

Sl. 1. a) Dužica zaklonjena kopcima
b) Maska dužice oka dobijena segmentacijom na osnovu Mahalanobisovog rastojanja

konture i tačke koja je najudaljenija od nje, dobija se prečnik kruga opisanog oko konture, a na sredini duži koju formiraju ove dve tačke nalazi se centar kruga. Algortam je jednostavan, ali se vrlo retko može primeniti. To su situacije kada je izuzetno velik deo kruga vidljiv, a potrebna je izuzetno velika brzina, a mala precizost detekcije.

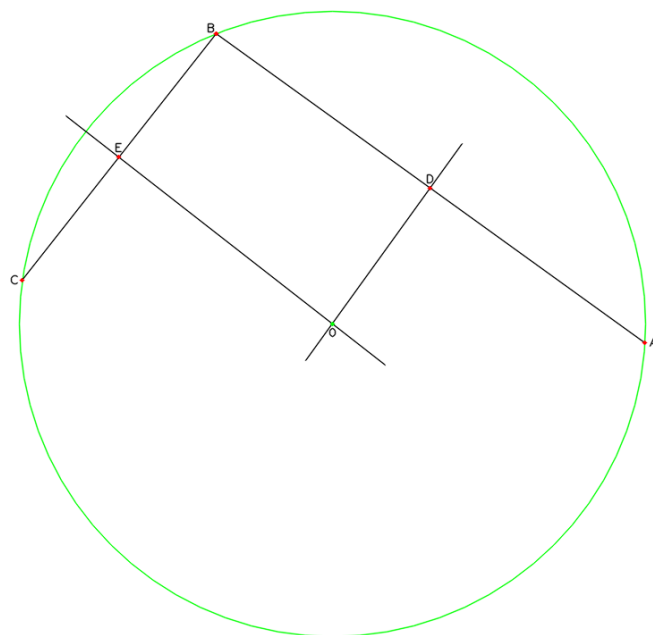
Predloženi algoritam zasniva se na konstrukciji krugu nad tri nekolinearne tačke. Ovaj problem se drugačije naziva i konstrukcija kruga opisanog oko trougla. Centar tog kruga je presek simetrala stranica trougla.

Ako su kordinate tačaka A, B, C, date uredjenim parovima (x_A, y_A) , (x_B, y_B) i (x_C, y_C) i tačke D i E središta duži AB i CD sa koordinatama: $(x_D, y_D) = (\frac{x_A+x_B}{2}, \frac{y_A+y_B}{2})$ i $(x_E, y_E) = (\frac{x_C+x_D}{2}, \frac{y_C+y_D}{2})$ i ako je jednačina prave data formulom:

$$y - y_1 = k(x - x_1) \quad (2)$$

gde je koeficijent pravca k dat izrazom:

$$k_{12} = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (3)$$



Sl. 2. Konstrukcija kruga nad tri tačke

i predstavlja tangens ugla koji prava obrazuje sa x osom, a (x_1, y_1) i (x_2, y_2) koordinate tačka kroz koje prava prolazi, a koeficijent pravca prave koja je normalna na datu pravu dat izrazom:

$$k_{12} = -\frac{1}{k_{12}} = \frac{(x_1 - x_2)}{(y_1 - y_2)}, y_1 \neq y_2, \quad (4)$$

tada se centar kruga može naći pomoću sledećih formula:

$$x_D = \frac{y_B - y_C + k_{AB}x_B - k_{BC}x_C}{k_{AB} - k_{BC}} \quad (5)$$

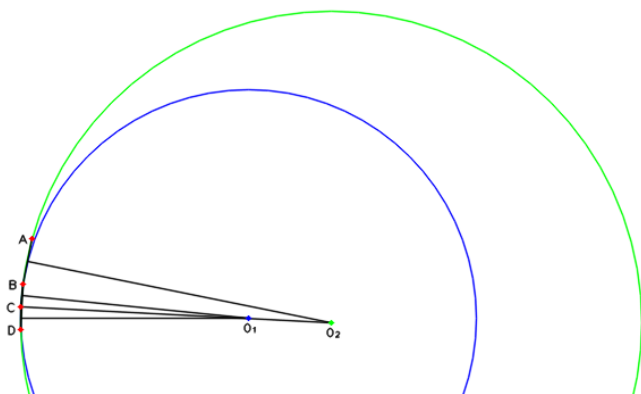
$$y_D = k_{AB}(x_D - x_B) + y_B \quad (6)$$

Pošto su tačke A, B i C nekolinearne, prave koje prolaze kroz tačke A i B i B i C nisu paralelne, tj $k_{AB} \neq k_{BC}$, pa je formula (5) uvek definisana. Vidimo da koeficijenti k_{AB} i k_{BC} nisu definisani za $y_A = y_B$ i $y_C = y_D$. To je slučaj kada je normala na datu stranicu paralelna sa y osom, tako da jednačina simetrale stranice ima oblika $x = const$, pa je $x_D = const$, a y koordinatu se računa na osnovu formule (6). Poluprečnik datog kruga je euklidsko rastojanje centra i jednog temena trougla.

Rešenje za traženje prečnika konture, koje se vrlo često sreće u literaturi [3], jeste da se za svaku moguću kombinaciju trojki tačaka duž konture izračunaju poluprečnici. Iz datog skupa poluprečnika za poluprečnik kruga, koji opisuje datu konturu, bira se median tog skupa. Nakon određivanja poluprečnika kruga, prelazi se na određivanje centra kruga. Sortiranje poluprečnika u mnogome usporava obradu, pa je u ovom radu predloženo drugačije rešenje.

Na Slici 3. su prikazana dva kruga. Zeleni krug je konstruisan nad trouglom ABD, dok je plavi konstruisan nad

trougлом BCD. Iako je tačka C manje od jednog piksela udaljena od zelenog kruga, razlika između dva poluprečnika je 75 piksela. Što su dužine stranica trougla manje u odnosu na dobijeni prečnik, to je rešenje više podložno uticaju šuma.



Sl. 3. Krugovi konstruisani na ABD(zeleni) i BCD(plavi)

Predloženi algoritam takođe prolazi duž konture i obradjuje sve trojke tačaka. Njegova prednost u odnosu na ostale sisteme je što odmah računa centar i prečnik kruga. Ideja je da u poziciji konačnog centra i prečnika kruga u većem procentu učestvuju centri i prečnici koji su dobijeni od tačaka koje su međusobno razmaknute. Idealan slučaj je kada se krug opisuje oko jednakostraničnog trougla. Možemo primetiti da se površina trougla povećava što se više tačke razmiču. Ova karakteristika nam omogućava da napravimo jednostavan težinski faktor.

Centar i prečnik kruga računamo pomoću sledećih formula:

$$x_c = \frac{\sum t_i x_i}{\sum t_i} \quad (7)$$

$$y_c = \frac{\sum t_i y_i}{\sum t_i} \quad (8)$$

$$r_c = \frac{\sum t_i r_i}{\sum t_i} \quad (9)$$

t_i predstavlja težinski faktor. Težinski faktor dat je formulom

$$t_i = \frac{P_{ABC}}{P_{r_i}} \quad (10)$$

Površina trougla ABC se može izračunati Heronovim obrscem, dok P_{r_i} predstavlja površinu jednakostraničnog trougla oko koga je opisan krug čiji je prečnik r_i . Površina trougla oko koga je opisan krug sa prečnikom r srazmerna je kvadratu r^2 , pa se težinski faktor se može pojednostaviti i primeniti sledeću formulu:

$$t_i = \frac{\min(|AB|^2, |BC|^2, |CD|^2)}{r_i^2} \quad (11)$$

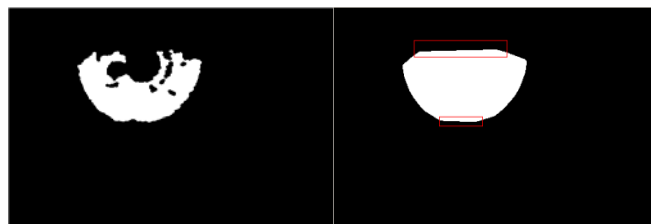
5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Na Sl. 4 i Sl. 5. žutom bojom uokvirena je detektovana dužica oka. Procena centra oka obeležna je žutim zaokruženim krstićem. Pikeseli koji su izuzeti iz obrade

obeleženi su crvenim pravougaonikom. Na Sl. 4. prikazani su jedan frejm sa rezultatom detekcije dužice i procena centra,



a)



b)

c)

Sl. 4. Prikaz sisetma za praćenje oka na sekvecni MinicOko (frejm #515) a) rezultat praćenja b) slika maske c) maska posle konveksnog zatvaranja



a)



b)

c)

Sl. 5. Prikaz sisetma za praćenje oka na sekvecni MinicOko (frejm #1072) a) rezultat praćenja b) slika maske c) maska posle konveksnog zatvaranja

rezultat segmentacije dužice bojom korišćenjem Mahalanobisovog rastojanja i konveksno zatvorena maska sa obeleženim pikselima koji su izuzeti iz procene centra i prečnika kruga. Sl. 5. prikazuje oko iz iste sekvence, ali u 1072 frejmu.

Sistem za praćenje oka implementiran je u programskom jeziku C, korišćenjem paketa za kompjutersku viziju OpenCV. Na računaru sa Intel® Core2 Duo procesorom radnog takta 3GHz i sa 2GB RAM memorije, sistem uspeva da obradi 55.5 frejmova u sekundi (veličina frejma 492x332 piksela). Snimci za testiranje sistema za praćenje oka dobijeni su korišćenjem IDS-ove koja je snimala oko brzinom od 110 frejmova u sekundi.

Zaključak

U radu je objašnjena metoda za praćenje oka na osnovu pozicije dužice oka na slici. Na prvom frejmu se izvrši obeležavanje dužice oka na slici. Vrednosti obeleženih piksela koristimo za segmentaciju slike na osnovu boje korišćenjem Mahalanobisovog rastojanja u svim ostalim frejmovima. Potom se maska fitrira i konveksno zatvori. Od obradjene maske korišćenjem jednostavnih geometrijskih transformacija se određuje centar dužice oka i njen prečnik.

Pored opisa sistema u radu su dati i eksperimentalni rezultati na video sekvencama snimljenim IDS-ovom kamerom velike brzine. Eksperimentalni rezultati pokazuju veliku tačnost praćenja. Dakle, predloženi sistem predstavlja prihvatljivo rešenje za praćenje oka.

Najveći problem sistema predstavlja neophodnost inicijalizacije u prvom frejmu. Dalja istraživanja će se pozabaviti problemom izbacivanja inicijalizacije.

Cilj ovog rada je bio da se dobije jedan modul za sistem koji će imati ulogu u određivanju vizuelno značajnih detalja na slici. Uspešnom realizacijom cilja otvorena su vrata za ispitivanja na polju određivanja prostorno-vremenskih vizuelno značajnih detalja u video sekvencama.

LITERATURA

- [1] P.C. Mahalanobis, "On the generalised distance in statistics," *Proceedings of the National Institute of Science of India* 12, pp. 49-55, 1936.
- [2] R. De Maesschalck, D. Jouan-Rimbaud and D. L. Massart, "The Mahalanobis distance," *Chemometrics and Intelligent Laboratory System*, Vol. 50/1, pp. 1-18, January 2000.

- [3] M. Stojmenovic and A. Nayak, "Shape based circularity measures of planar point sets," *IEEE International Conference on Signal Processing and Communications*, pp. 1279-1282, Dubai, UAE, Nov 2007.
- [4] A. Abrams and D.E. Meyer, "Speed and Accuracy of Saccadic Eye Movements: Characteristics of Impulse Variability in the Oculomotor System," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 15/3, pp. 529-543, 1989.
- [5] A. Haro, M. Flicker and I. Essa, "Detection and tracking eyes by using their physiological properties, dynamics and appearance," *Proceedings of IEEE CVPR*, 2002.
- [6] C. Morimoto and M. Flickner, "Real-Time multiple face detection using active illumination," *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*, 2000.
- [7] X. Liu, F. Xu and K. Fujimura, "Real time eye-detection and Tracking for Driver Observation under Various lighting conditions," *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, 2002.
- [8] P. Smith, M. Shah and N. Lobo, "Monitoring head/eye motion for driver alertness using one camera," *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, 2000.
- [9] S. Baluja and D. Pomerleau, "Non Intrusive gaze tracking using Artificial Neural Networks," *Technical Report CMU-CS-94-102*, Pittsburgh: Carnegie Mellon University, January 1994.
- [10] D. Li, D. Winfield and D.J. Parkhurst, "Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches," *Proceedings of the IEEE Vision for Human-Computer Interaction Workshop at CVPR*, 2005.
- [11] C.H. Morimoto, "Free head motion eye gaze tracking using a single camera and multiple light sources," *The 19th Brazilian symposium on computer graphics and image processing*, pp.171-178, 2006.