

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS KATEDRA

Julius Grigas

**ŽVILGSNIO REGISTRAVIMAS PANAUDOJANT VYZDŽIO
CENTRĄ IR KELIS RAGENOS ATŠVAITUS**

Eye-Gaze Tracking Using Pupil Center and Multiple Glints

Magistro darbas

Vadovas:

Doc. Dr. N. Ramanauskas

ŠIAULIAI, 2011

TURINYS

ANOTACIJA	4
SUMMARY	5
ĮVADAS.....	6
1. AKIŲ JUDESIŲ MATAVIMO SISTEMŲ APŽVALGA	7
1.1 Komercinės akių judesių matavimo sistemos	7
1.2 Nekomercinės akių judesių matavimo sistemos	7
1.3 Akies struktūra	8
1.4 Akių judesių matavimo metodai	8
1.4.1 Kontaktiniai akių judesių matavimo metodai:	9
1.4.2 Nekontaktiniai akių judesių matavimo metodai	9
1.5 VOG sistemų pagrindinės sudedamosios dalys	11
1.5.1 IR ir natūralaus apšvietimo AJMS sistemos.....	11
1.5.2 Šviesus ir tamsus vyzdys	12
1.5.3 VCRA metodas.....	14
1.5.4 Vyzdžio centro ir ragenos atspindžių matematinis aprašymas.....	15
1.5.5 Optinės ašies nustatymas kai yra naudojama viena kamera ir keletas šviesos šaltinių:	17
1.5.6 Optinės ašies nustatymas, kai yra naudojama viena kamera ir vienas šviesos šaltinis.....	18
1.6 AJMS prototipas su 5 ir IR LED šviesos šaltiniais ir viena CCD kamera.....	19
1.7 Vyzdžio centro ir ragenos atspindžių aptikimas sistemoje su 5 šviesos šaltiniais.....	20
2. PROJEKTUOJAMOS SISTEMOS APRAŠYMAS	22
2.1 Aparatūrinė AJMS prototipo dalis	22
2.2 Programinė įranga mikrovaldikliui	24
2.3 Programinė įranga kompiuteriui	26
2.4 Vyzdžio kontūro aptikimo algoritmas.....	28
2.5 Ryškio ribos parinkimas.....	30
2.6 Vyzdžio centro radimo algoritmas	32
3. EKSPERIMETO METODIKA IR ATLIKIMAS	34
3.1 Eksperimento metodika.....	34
3.2 Eksperimento eiga.....	36
IŠVADOS	42
LITERATŪRA.....	43
PAVEIKSLŲ SARAŠAS.....	44
PRIEDAI	45

Grigas J., Žvilgsnio registravimas panaudojant vyzdžio centrą ir kelis ragenos atšvaitus: Signalų technologijos, magistro laipsnis/ mokslinis vadomas doc. dr. N. Ramanauskas; Elektronikos katedra, Technologijos fakultetas, Šiaulių universitetas – Šiauliai, 2011. – 44p

ANOTACIJA

Žmogaus akių judesiai yra plačiai tyrinėjami ir taikomi praktikoje. Atskiri akių judesių parametrai yra tyrinėjimo objektai daugelyje mokslo sričių.

Darbo tikslas yra - ištirti akių judesių matavimo sistemų su keletu IR šaltinių žiūros taško nustatymo paklaidas. Darbe pateikiami žmogaus akių judesių tipai, akių judesių matavimo sistemų aprašymai, vyzdžio centro ir ragenos atspindžių matematinis aprašymas, suprojektuotos akių judesių matavimo sistemos aprašymas.

Tyrimo metodika akių judesių matavimo sistemos paklaidom ištirti ir tyrimui atlikti su suprojektuota sistema, ir gauti rezultatai.

Galutinis darbo rezultatas – sukurta programinė įranga akių judesiams matuoti su keletu IR šviesos šaltinių, ir ištirtos akių judesių matavimo sistemos žiūros taško nustatymo paklaidų priklausomybė nuo šviesos šaltinių skaičiaus.

Grigas J., Eye-Gaze Tracking Using Pupil Center and Multiple Glints : Signal Processing, Master's Degree/ research advisor doc. dr. N. Ramanauskas; Department of Electronics, Faculty of Technology of Siauliai University; – Šiauliai, 2011. – 44p.

SUMMARY

Human eye movements is widely-researched and using in practice. Scientists from different fields research individual eye movement parameters.

The aim is - to investigate the eye movement measuring system with multiple light sources gaze direction detection errors. In work are described human eye movements types, eye movement measurement systems guide, the pupil center and corneal reflection mathematical description. Designed eye movement's measurement system description.

Paper describes the research methodology of eye movement measurement system errors to be examined, designed to study the system and get results.

The final result - a software and equipment to measure eye movements with a few IR light sources, and examined the eye movement measurement system view point of error detection.

IVADAS

Šiuo metu jau yra sukurta nemažai akių judesių matavimo sistemų, tačiau šios sistemos yra vis dar tobulinamos. Akių judesių matavimas yra plačiai naudojamas moksliniuose tyrimuose. Ypač šia linkme dirbama norint palengvinti neįgaliųjų integraciją naudojantis kompiuteriu. Taip pat tema aktuali tuo, kad akių judesiai vis plačiau naudojami registruojant vairuotojo žvilgsnį, žmogaus kompiuterio sąveikai.

Šiuo metu yra labiausiai paplitęs video – okulografinis akių judesių matavimo metodas, kuris naudojamas moksliniuose tyrimuose ir komercinėse sistemose[5]. Nors yra sukurta daug akių judesių matavimo algoritmų, tačiau kol kas nėra nustatyta kokią įtaką tikslumui turi šviesos šaltinių skaičius nustatant žiūros tašką, o komercinės sistemos išvis neskelbia tyrimų rezultatų, o tik pateikia gaminamos sistemos parametrus.

Šio darbo tikslas yra - ištirti akių judesių matavimo sistemų su keletu IR šaltinių žiūros taško nustatymo paklaidas. Darbo tikslui pasiekti keliami uždaviniai:

- Susipažinti su jau pagamintomis akių judesių matavimo sistemomis.
- Susipažinti su akių judesių registravimu naudojant ragenos atspindį.
- Pagaminti akių judesių matavimo sistemą, kuri būtų universali (gebėtų dirbti su kelių gamintojų kameromis).
- Nustatyti kokią įtaką žiūros taško nustatymo tikslumui turi infraraudonųjų šviesos šaltinių skaičius.

1. AKIŲ JUDESIŲ MATAVIMO SISTEMŲ APŽVALGA

1.1 Komercinės akių judesių matavimo sistemos

Šiuo metu yra kuriamos ir tobulinamos akių judesių matavimo sistemos. Jos yra naudojamos keliose veiklose: žmogaus regos sistemos ir psichologijos moksliniuose tyrimuose, gaminių projektavime.

Dauguma akių judesių matavimo sistemų yra komercinės, ir nėra atskleidžiami sistemų veikimo principai komerciniais tikslais. Viena iš plačiausiai žinomų tokių sistemų gamintojų yra kompanija „Tobbi“. Ši kompanija vartotojams gali pasiūlyti įvairaus spektro gaminių nuo akinių, vaizduoklių (su prietaisu integruotu matuoti akių judesius (1. pav)) iki paprasčiausių aksesuarų. Vartotojai, įsigiję tokias sistemas, gali atlikti tam tikrus tyrimus, kurie bus atliekami tam tikru tikslumu, kuris yra apibrėžtas įrangos gamintojo.



1.1.1 pav. Tobbi kompanijos akiniai skirti akių judesiams matuoti [16]

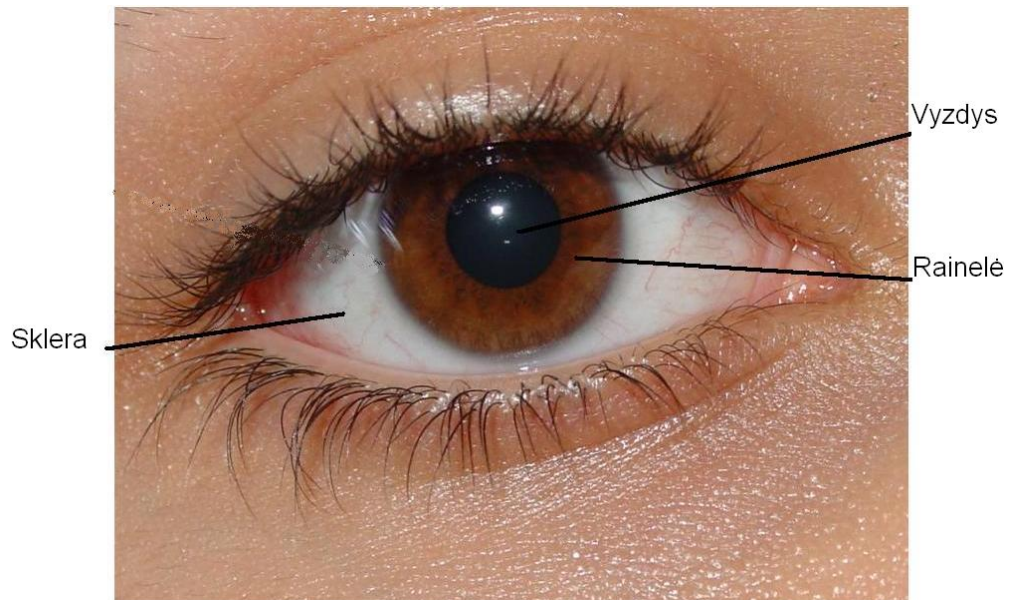
1.2 Nekomercinės akių judesių matavimo sistemos

Tačiau yra ir atviro kodo akių judesių matavimo sistemų, tokių kaip „ITU Gaze group“, „Open eyes“ ir pan., kurių programinę įrangą gali keisti pats vartotojas, taip pat nėra reikalinga sudėtinga aparatinė dalis, dažniausiai pakanka vien „web“ kameros. Šios atviro kodo akių judesių matavimo sistemos yra alternatyva komercinėms akių judesių matavimo sistemoms ir kol kas savo parametrais dar neprilygsta komercinėms sistemoms. Daugumos nekomercinių sistemų tikslas yra skatinti tyrimus ir plėtrą akių judesių matavime tam, kad vartotojai žmogaus – kompiuterio sąveikai galėtų naudoti akis.

Taip pat akių judesių matavimas yra naudojamas automobiliuose, sekti vairuotojo žvilgsnį ir stebėti ar vairuotojas neprisnūdo, bet dėl specifinės aplinkos (automobilio) šie tyrimai yra atliekami laboratorijose su specialia įranga [11].

1.3 Akies struktūra

Nors akies fizinė sudėtis yra sudėtinga, tačiau projektuojant VOG sistemas yra tik trys svarbiausios akies sudedamosios dalys: vyzdys (angl. pupil), rainelė (angl. iris), sklera (angl. sclera). Šviesa, sklisdama į akį, pradžioje praeina per vyzdį, po to per lęšiuką šviesos srautas yra nukreipiamas į tam tikrą tinklainės vietą. Rainelė-tai raumuo, kuris kontroliuoja vyzdžio centro diametrą. Sklera yra baltas apsauginis audinys, kuris dengia likusią akies dalį 1.3.1 pav.



1.3.1 pav. pagrindinės, matomos išoriškai, akies sudedamosios dalys [14]

1.4 Akių judesių matavimo metodai

Yra išskiriami trys akių judesių matavimo metodai:

1. Elektromagnetinės ritės metodas:

Ant akies yra pritvirtinama ritė (du laidai, ar žiedas) ir akiai judant yra indukuojama įtampa. Matuojant akių judesius šiuo metodu, žmogaus galva turi būtų patalpinta į dėžę, kurioje turi būti elektromagnetinis laukas (vertikali ir horizontali ritės). Abi ritės turi būti maitinamos skirtingų dažnių srove.

2. Elektrookulografinis metodas

Akis yra elektrinis dipolis (akies tinklainė ir regena turi priešingo ženklo krūvius). Akiai judant keičiasi elektrinio dipolio sukurto elektrinio lauko kryptis, dėl to keičiasi elektriniai potencialai apie akį. Matavimui reikalingi elektrodai, kurie yra pritvirtinami apie akį (panašiai kaip atliekant širdies EEG). Šis metodas yra netikslus, kadangi krūviai akyje keičiasi nuo apšvietimo, tačiau šis metodas leidžia matuoti akių judesius miego metu. [14]

3. Video okulografinis metodas (VOG)

Šiuo atveju akis yra filmuojama vaizdo kamera. Vyksta kadrų vaizdo apdorojimas ir yra išskiriami vaizdo požymiai:

- Vyzdžio centro koordinatės (tamsiausia akies vieta yra ant akies centrinės ašies)
- Pirmo Purkinje atvaizdo koordinatės
- Rainelės centras

Taip pat akių judesių matavimo metodus galima išskirti į dar dvi pagrindines grupes: kontaktinius ir nekontaktinius.

1.4.1 Kontaktiniai akių judesių matavimo metodai:

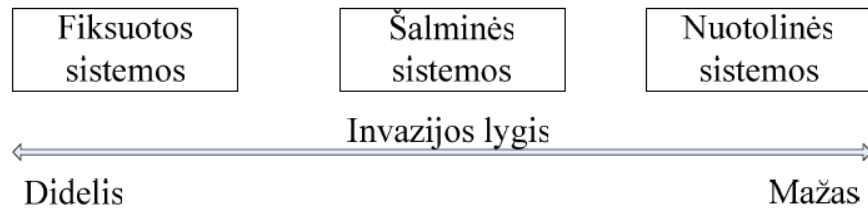
Kontaktiniai metodai naudoja jutiklius sudarytus iš dviejų dalių: nejudančiosios (akiniai, rėmelis, šalmas ir kt.) ir judančiosios (tvirtinama prie akies). Akiai judant, judančioji dalis pasisuka arba pasislenka nejudančios atžvilgiu. Taip yra nustatomi akių judesiai. Šių metodų trūkumas yra tas, jog davikliai turi tiesioginį kontaktą su tiriamojo akimis ir tai sukelia jam nepatogumų, kai kuriais atvejais, netgi skausmą, bet tokiais metodais pasiekiamas didelis tikslumas. Dėl tikslumo, kontaktiniai metodai naudojami moksliniuose tyrimuose, kurie skirti fiziologiškai tirti akis, nes čia reikia matuoti kiek galima tiksliau. Praktiniuose pritaikymuose šie metodai nenaudojami.

1.4.2 Nekontaktiniai akių judesių matavimo metodai

Naudojant nekontaktinius metodus tiesioginio kontakto su tiriamojo akimis nėra, todėl tyrimo procedūra neskausminga, mažiau varginanti ir tyrimą galima atlikti gerokai ilgiau, nei kontaktinio tyrimo metu. Nekontaktiniu akių judesių matavimo metodu akių kampiniams posūkiams nustatyti yra naudojami akies fiziologiniai ypatumai: pavidalas, forma, elektrinės (elektrookulografija) bei optinės (ragenos atšvaistas, Purkinjė atspindžiai) savybės. Naudojant nekontaktinius metodus eksperimentus galima atlikti ne tik laboratorinėmis sąlygomis, bet ir

natūralioje tiriamojo aplinkoje (namuose, darbe, automobilyje ir pan.). Tačiau nekontaktinių metodų tikslumas yra mažesnis.[15]

Šiuo metu vienos populiariausių ir labiausiai vystomos AJMS yra video-okulografinės (VOG) sistemos. Priklausomai nuo realizacijos, jos skiriasi savo invazijos lygiu 3 pav. [15]

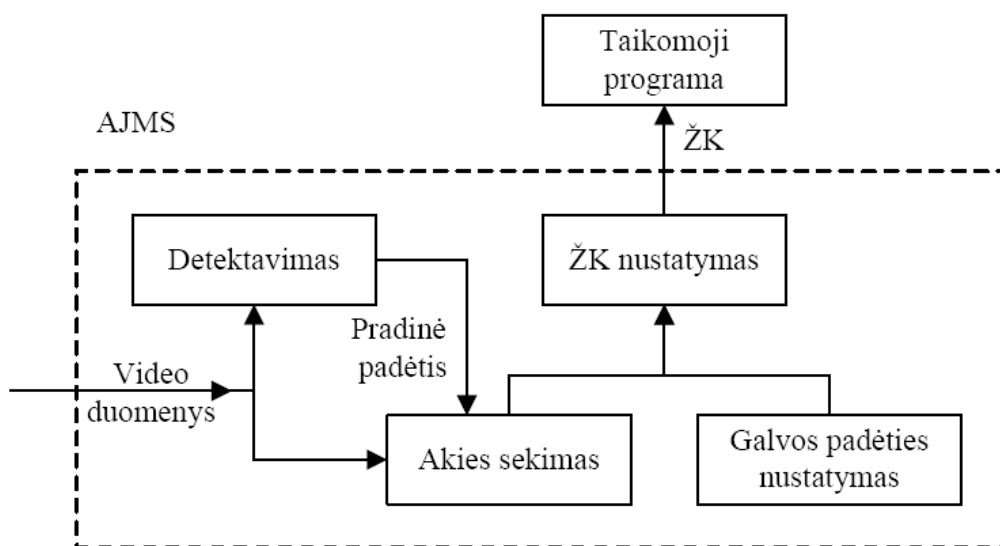


1.4.1 pav. VOG sistemų invazijos lygis [15]

1.5 VOG sistemų pagrindinės sudedamosios dalys

Pagrindiniai nuotolinės video-okulografinės AJMS komponentai pateikti 1.5.1 pav. Akių judesių matavimo sistemos pradinė informacija yra video duomenys gaunami iš vienos ar kelių video kamerų. Pirmasis žingsnis yra pradinis akies padėties nustatymas tai atlieka Detektavimo komponentas. Ši pradinė padėtis naudojama akies sekimo komponente, kuris, kiekvienu laiko momentu seka akies padėtį. Remiantis iš akies sekimo galvos padėties komponentų gauta informacija, žiūros koordinačių nustatymo komponentas nustato vartotojo žiūros linijos kryptį.

Akių judesių matavimo sistemos išėjimo signalas ir naudojamas taikomųjų programų. Apibendrinant galima pasakyti, kad pagrindinė AJMS paskirtis yra surasti sąryšį tarp priimamų video duomenų ir žiūros linijos krypties. [15]



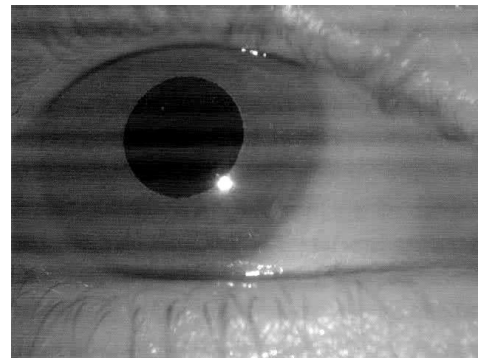
1.5.1 pav. AJMS sudedamosios dalys [15]

1.5.1 IR ir natūralaus apšvietimo AJMS sistemos

Matuojant akių judesius yra naudojamas dvejų tipų apšvietimas ir kameros. Apšvietimas gali būti natūralus (regimosios šviesos) ir infraraudonųjų spindulių, kurių žmogaus akis nemato 1.5.2 pav.



a)



b)

1.5.2 pav. vyzdys nufilmuotas regimos šviesos kamera ir kamera jautrią IR apšvietimui

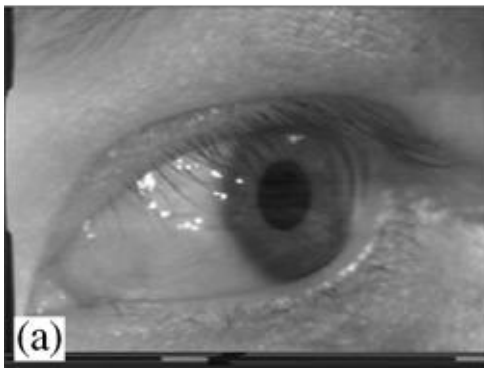
a) vyzdys nufilmuotas su regimosios šviesos kamera ir naudojant natūralų apšvietimą b) vyzdys nufilmuotas naudojant infraraudonųjų spindulių apšvietimą ir kamerą jautrią IR apšvietimui.

Matuoti akių judesius naudojant natūralios šviesos apšvietimą yra sudėtinga, nes apšvietimo šaltinis yra nekontroliuojamas (apšvietimas susideda iš visų aplinkoje esančių šviesos šaltinių, kurie spinduliuoja regimąją šviesą), taip pat naudojant natūralios šviesos apšvietimą atsiranda veidrodiniai atspindžiai ant vyzdžio ir rainelės, kurie labai apsunkina vyzdžio kontūro išskyrimą, ir dėl to sudėtingėja AJMS aparatinė bei programinė dalis. Taip pat naudojant natūralų apšvietimą šviesos šaltinio negalima nukreipti į akį, nes tai vargintų vartotoją, o naudojant apšvietimą vien iš aplinkos sunku gauti kontrastingą vaizdą televiziniame kadre.[14, 15]

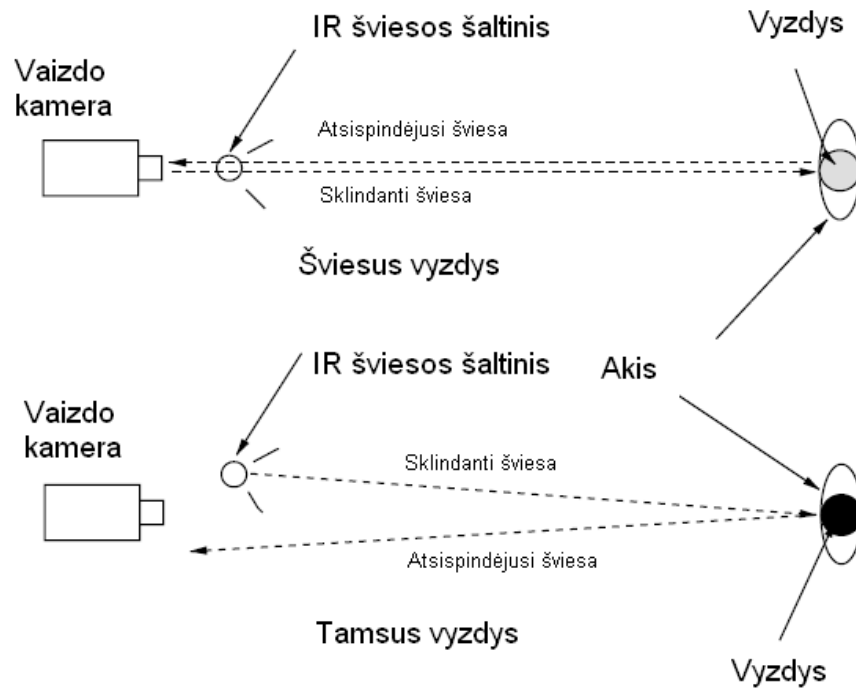
Naudojant IR apšvietimą ir infraraudoniesiems spinduliams jautrias kameras nebelieka veidrodinių atspindžių ant vyzdžio ir rainelės 1.5.2 pav. (b), taip pat galima apšviesti akį IR spinduliais gaunant ryškesnį vaizdą televiziniame kadre šviesos šaltinį nukreipiant tiesiai į akį ir tai nevargina vartotojo, kadangi žmogaus akis nėra jautri IR spinduliams. Kitas privalumas naudojant IR apšvietimą yra tas, kad paaiškėja riba tarp vyzdžio ir rainelės 1.5.2 pav. tai palengvina vyzdžio kontūro išskyrimą, kuris reikalingas nustatant žiūros kryptį. [14, 15]

1.5.2 Šviesus ir tamsus vyzdys

VOG sistemos gali naudoti šviesų ir tamsų vyzdį 1.5.3 pav.. Šviesus vyzdys yra gaunamas kuomet šviesos šaltinis yra patalpintas ant kameros optinės ašies, o tamsus-kuomet šalia kameros optinės ašies.



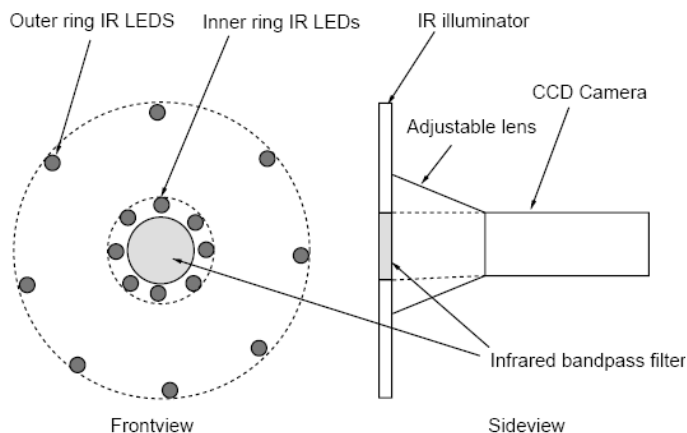
1.5.3 pav. a) tamsus, b) šviesus vyzdys [8]



1.5.4 pav. šviesaus ir tamsaus vyzdžio susidarymas

1.5.4 pav. pavaizduota kaip susidaro šviesus ir tamsus vyzdys. Šviesos šaltiniui esant ant kameros optinės ašies šviesa sklinda tiesiai į akies tinklainę ir nuo jos atsispindėjusi grįžta atgal tiesiai į kameros fotojutiklį, kuomet šviesos šaltinis yra patalpintas ne ant kameros, šviesa atsispindi nuo tinklainės, tačiau nebepatenka tiesiai į kamerą todėl televiziniame kadre yra matomas tamsus vyzdys. Taigi, norint gauti šviesų vyzdį, teoriškai IR šviesos šaltinį reikia patalpinti ant kameros optinės ašies, tačiau tokiu atveju šviesos šaltinis užstos į kameros matymo lauką patenkančius vaizdus. Todėl buvo pasiūlyta IR šviesos diodus montuoti apskritimu apie kameros optinę ašį, kurios centras sutaptų su kameros optine ašimi 1.5.6 pav. Taip montuojant šviesos šaltinius taip pat yra gaunamas šviesus vyzdys. Taip pat buvo pasiūlyta naudoti dar vieną žiedą, kurio spindulys yra didesnis nei pirmojo ir tokiu atveju

degant tik didžiajam diodų žiedui yra gaunamas tamsus vyzdys [14]. Tačiau, turint AJMS su šviesos šaliniais, kurie yra išdėstyti dviem skirtingo skersmens apskritimais apie kameros optinę ašį, galima gauti ir šviesų ir tamsų vyzdį ta pačia AJMS tik vienu laiko momentu reikia uždegti vieną, o sekančiu laiko momentu kitą IR šviesos šaltinių apskritimą.[14]



1.5.6 pav. IR šviesos šaltinių konfiguracija [14]

Tačiau esant mažam vyzdžio diametrai (mažesniau nei 4 mm), riba tarp rainelės ir vyzdžio yra labai nekontrastinga. Tai labai apsunkina vyzdžio kontūro išskyrimą, arba šį uždavinį padaro neįmanomu. Dėl šios priežasties, sistemos, naudojančios šviesų vyzdį, turi būti naudojamos blausios šviesos aplinkose [4,11]. Be to, eksperimentiškai buvo nustatyta, kad apšvietus akį IR spinduliais, dešimčiai procentų visos populiacijos negaunamas pakankamas atsispindėjimas nuo tinklainės [4, 16].

1.5.3 VCRA metodas

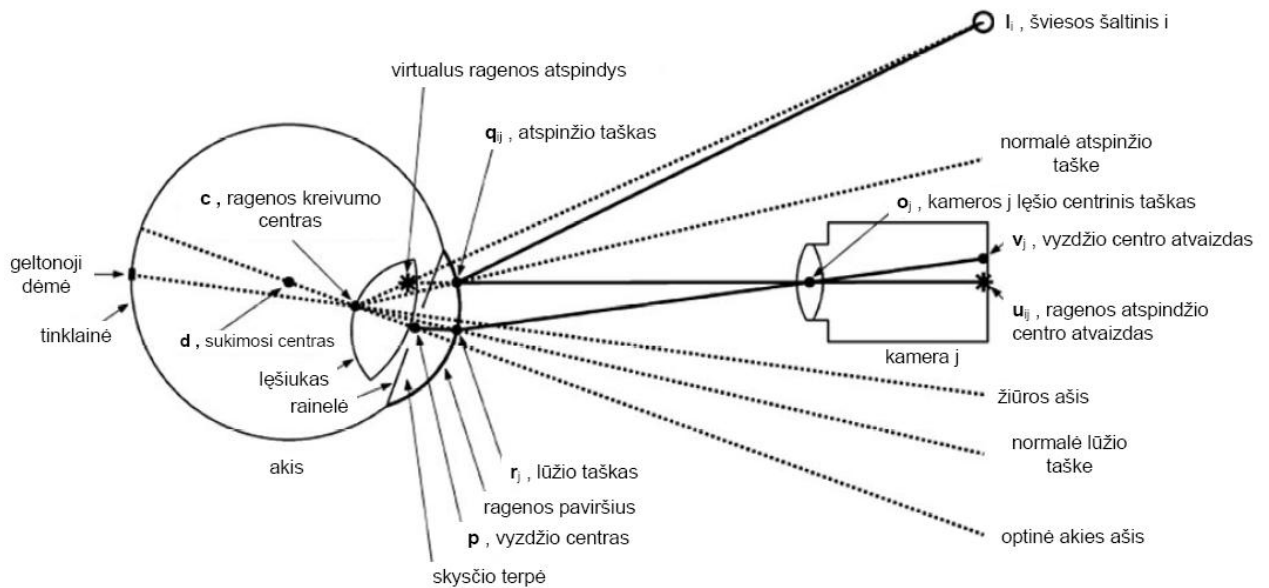
Vienas populiariausių žvilgsnio krypties nustatymo metodų yra VCRA metodas, naudojantis vyzdžio centrą (VC) ir vieną ar kelis ragenos atspindžius (RA). Šis metodas reikalauja dviejų žingsnių: vyzdžio ir ragenos atspindžio (-ių) išskyrimo televiziniame kadre, bei individualių kalibravimo parametrų suradimo.[15]

Detalus vyzdžio centro ir ragenos atspindžių metodo matematinis aprašymas pateiktas Guestrin ir Eizenman darbe, bei N. Ramanausko disertacijoje[4 15]. Autoriai teigia, kad naudojant vieną IR šviesos šaltinį ir vieną kamerą, įmanoma nustatyti žiūros liniją tik tada, jei galva yra visiškai stabili. Naudojant vieną kamerą ir keletą šviesos šaltinių yra galimi laisvi galvos judesiai numatyta diapazone tuomet, kai atlikta daugiataškė kalibravimo procedūra.

Naudojant keletą kamerų ir keletą šviesos šaltinių, žiūros liniją galima nustatyti po paprastos vieno taško kalibravimo procedūros. [15]

1.5.4 Vyzdžio centro ir ragenos atspindžių matematinis aprašymas

1.9.1 pav. paveiksle yra pateikta spindulių sklaidimo diagrama, kai šviesos šaltiniai yra modeliuojami kaip taškiniai šviesos šaltiniai, o kameros - kaip taškinės (pinhole) kameros. Visi taškai yra aprašomi trimačiais vektoriais (pajuodintas šriftas) dešininėje Dekarto koordinatčių sistemoje.



1.5.7 pav. spindulių sklaidimo diagrama [15]

Nuo ragenos paviršiaus taške q_{ij} , šviesos šaltinio i spindulys l_i , atsispindi. Atsispindėjęs spindulys sklinda per kameros j lęšio centrinį tašką o_j ir susikerta su kameros vaizdo jutiklio plokštuma taške u_{ij} . Šią sąlygą parametriškai galima užrašyti lygtimi:

$$q_{ij} = p + r_j \cdot \frac{(o_j - p) \cdot (o_j - p) + (o_j - p) \cdot (u_{ij} - p)}{2 \cdot (o_j - p) \cdot (u_{ij} - p)} \quad (1.1)$$

Jei ragenos paviršius yra modeliuojamas kaip išgaubtas sferinis veidrodis su spinduliu R , sąlyga, kad q_{ij} yra ant ragenos paviršiaus, 1.1 lygtis yra patikslinama sekančiai (c ragenos kreivumo centras):

$$\|q_j - c\| = R \quad (1.2)$$

Pagal šviesos atspindžio dėsnį: 1) atsispindėjęs spindulys, krintantis spindulys, ir normalė atspindžio taške yra vienoje plokštumoje; 2) atspindžio ir kritimo kampai yra lygūs. Kadangi vektorius $(q_{ij} - c)$ yra normalė ragenos paviršium atspindžio taške q_{ij} , remiantis pirmąją šviesos atspindžio dėsnio dalimi, galime teigti, kad taškai l_i , q_{ij} , c ir o_j yra vienoje plokštumoje. Trys vektoriai a_1 , a_2 ir a_3 , esantys vienoje plokštumoje tenkina lygybę $a_1 \times a_2 \cdot a_3 = 0$, todėl pirmoji dėsnio dalis gali būti suformuluota sekančiai:

$$(l_i - c) \times (q_{ij} - c) \cdot (o_j - c) = 0 \quad (1.3)$$

Kampas θ , esantis tarp dviejų vektorių a ir b , gali būti randamas iš išraiškos $\cos \theta = \frac{a \cdot b}{|a| |b|}$. Iš čia antroji dėsnio dalis užrašoma lygtimi:

$$\cos \theta = \frac{(q_{ij} - c) \cdot (o_j - c)}{|q_{ij} - c| |o_j - c|} \quad (1.4)$$

Toliau nagrinėkime spindulį, kuris sklinda iš vyzdžio centro p ir lūžta ragenos paviršiaus taške r_j . Šis lūžęs spindulys sklinda per kameros j lęšio centrinę tašką o_j ir susikerta su kameros vaizdo jutiklio plokštuma taške v_j . Ši sąlyga parametriškai užrašoma sekančiai:

$$r_j = o_j + k_j(o_j - v_j) \quad (1.5)$$

Sąlyga, kad r_j yra ant ragenos paviršiaus:

$$\|r_j - c\| = R \quad (1.6)$$

Pagal šviesos lūžio dėsnį: 1) krintantis spindulys, lūžęs spindulys ir normalė lūžio taške yra vienoje plokštumoje; 2) kritimo kampui θ_1 ir lūžio kampui θ_2 galioja Snello taisyklė, t.y. $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, kur n_1 ir n_2 pirmos ir antros terpių šviesos lūžių rodikliai. Kadangi vektorius $(r_j - c)$ yra normalė ragenos paviršium lūžio taške r_j , remiantis pirmąją šviesos lūžio dėsnio dalimi, galime teigti, kad taškai p , r_j , c ir o_j yra vienoje plokštumoje ir todėl pirmoji dėsnio dalis gali būti suformuluota sekančiai:

$$(p - c) \times (r_j - c) \cdot (o_j - c) = 0 \quad (1.7)$$

Antroji šviesos lūžio dėsnio dalis užrašoma lygtimi:

$$\frac{\sin \theta_1}{n_1} = \frac{\sin \theta_2}{n_2} \quad (1.8)$$

Atstumas K tarp vyzdžio ir ragenos kreivumo centrų apskaičiuojamas iš sekančios išraiškos:

$$\|p-c\|=K \quad (1.9)$$

Kadangi akies optinė ašis eina per vyzdžio centrą (p) ir ragenos kreivumo centrą (c), išsprendus lygčių sistemą, susidedančią iš lygčių (1.1) – (1.9), p ir c atžvilgiu, akies optinė ašis gali būti atkurta erdvėje, kaip linija einanti per šiuos du taškus. Tačiau, norint išspręsti šią lygčių sistemą, turi būti žinomi akies parametrai R , K ir n_l . Pastarieji parametrai yra individualūs kiekvienam tiriamajam ir tiesioginis jų matavimas yra sudėtingas. Įprasta, kad šie parametrai yra randami iš kalibravimo procedūros, kuri atliekama individualiai kiekvienam tiriamajam.

Iš pateikto vyzdžio centro ir ragenos atspindžių matematinio aprašymo, matosi, kad optinės ašies nustatymas naudojant (1.1) – (1.9) išraiškas priklauso nuo sistemos konfigūracijos, kamerų ir šviesos šaltinių skaičiaus.

1.5.5 Optinės ašies nustatymas kai yra naudojama viena kamera ir keletas šviesos šaltinių:

Keletas šviesos šaltinių leidžia išspręsti lygčių (1.1) – (1.9) sistemą su $i=1, \dots, N$, $j=1$, jei akies parametrai R , K ir n_l yra gauti kalibravimo metu. Šiuo atveju yra patogų naudoti sekančią išraišką:

$$\underbrace{\begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{matrix}}_{\substack{\text{naštiniai taškai} \\ \text{taškai}}}, \quad (1.15)$$

Ši išraiška reiškia, kad ragenos kreivumo centras c priklauso kiekvienai plokštumai, kurias aprašo kameros j lęšio centrinis taškas o_j , šviesos šaltinio i spindulys l_i ir jį atitinkantis taškas kameros vaizdo jutiklyje u_{ij} . Be to, kiekvienai kamerai j , visos šios plokštumos susikerta linijoje, kurią aprašo taškai c ir o_j . Kadangi šiuo atveju yra tik viena kamera, paprastumo dėlei kameros indeksas yra panaikinamas, o 1.15 išraiška užrašome matricinėje formoje:

$$\begin{bmatrix} (1-o) \times (u_1-o)^T \\ (1-o) \times (u_2-o)^T \\ \vdots \\ (1-o) \times (u_n-o)^T \end{bmatrix} (c-o) = C \quad (1.16)$$

Taigi, jeigu naudojama viena kamera ir keletas šviesos šaltinių, yra pakankamas lygčių skaičius, kreivumo centro c suradimui. Žinant c , naudojamos 1.5 ir 1.7 formulės lūžio taško r radimui (4 nežinomieji, 4 lygtys). Žinant c ir r , naudojamos 1.8 – 1.10 formulės apskaičiuoti p (3 nežinomieji, 3 lygtys). Žinant p ir c , bei akies parametrus R , K ir n_l , galima atkurti akies optinę liniją, kaip liniją, einančią per šiuos du taškus. [4 15]

1.5.6 Optinės ašies nustatymas, kai yra naudojama viena kamera ir vienas šviesos šaltinis.

Jei yra naudojama viena kamera ir vienas šviesos šaltinis, ir yra žinomi akies parametrai R, K, n_l , lygčių (1.1) – (1.9) sistema su $i=1, j=1$, atitinka 13 skaliarinių lygčių su 14 skaliarinių nežinomųjų. Tai reiškia, kad sistema negali būti išspręsta, nebent yra įvedamas apribojimas:

$$\|Q - C\| = z \text{inc} \quad (1.10)$$

Šis apribojimas yra tenkinamas tik tuomet kai galva yra fiksuota sistemos atžvilgiu arba yra matuojamas atstumas tarp akies ir kameros (pvz. magnetinis galvos padėties matuoklis, ultragarsinis atstumo matuoklis, auto-fokusavimo sistema ir pan.).

Įprastai, jei yra naudojama viena kamera ir vienas šviesos šaltis AJMS nesprenžia (1.1) – (1.9) lygčių sistemos. Vietoje to yra naudojamas vyzdžio centro ir ragenos atspindžio vektorius televiziniame vaizde.

Vyzdžio ir ragenos atspindžio centrų koordinatės yra užrašomos sekančiomis išraiškomis:

$$\begin{cases} X_c = R \sin \varphi_h + x_g \\ Y_c = r \sin \varphi_v + y_g \end{cases} \quad (1.11)$$

$$\begin{cases} X_v = R \sin \varphi_h + X_g \\ Y_v = r \sin \varphi_v + Y_g \end{cases} \quad (1.12)$$

čia: (x_r, y_r) – ragenos atspindžio (pirmo Purkinje atvaizdo) centro koordinatės, (x_v, y_v) – vyzdžio centro koordinatės, R – akies obuolio spindulys, r – ragenos kreivumo spindulys, φ_h – akies posūkio apie horizontalią ašį kampas, φ_v akies posūkio apie vertikalią ašį kampas, (x_g, y_g) – galvos koordinatės.

Tuomet vyzdžio ir ragenos atspindžio koordinačių skirtumas (vyzdžio centro – ragenos atspindžio vektorius) yra tiesiogiai proporcingas akies posūkio kampo sinusui ir nepriklauso nuo galvos posūkio:

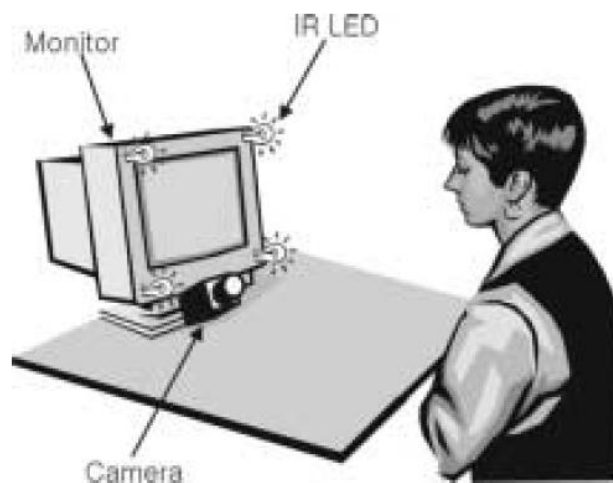
$$x_c - x_v = (R - r) \sin \varphi_h \quad (1.13)$$

$$y_c - y_v = (R - r) \sin \varphi_v \quad (1.14)$$

Sistema su viena kamera ir keletu šviesos šaltinių remiantis vyzdžio ir ragenos atspindžių centrais leidžia nustatyti akies žiūros liniją ir žiūros tašką esant laisvam galvos judėjimui. Remiantis prieš tai patekta analize, galime teigti, kad radus ragenos kreivumo centrą c , vyzdžio centro p radimas nebesipriklauso nuo šviesos šaltinių skaičiaus (7 skaliarinės lygtys, 7 nežinomieji).[15]

1.6 AJMS prototipas su 5 ir IR LED šviesos šaltiniais ir viena CCD kamera

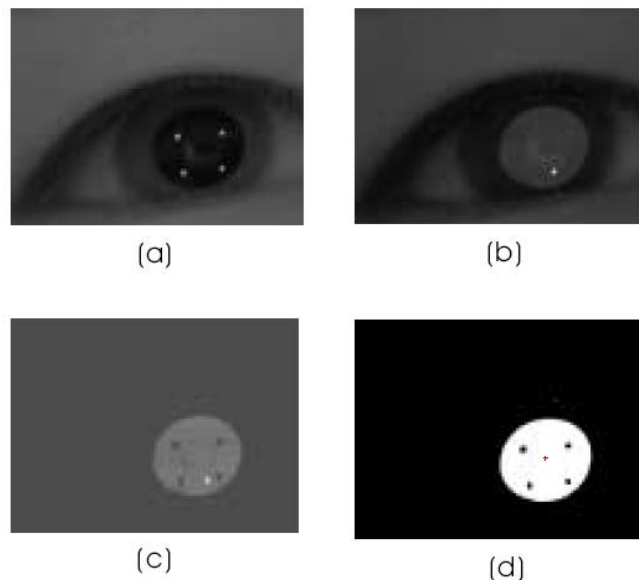
[4] sukurtas akių matavimo sistemos prototipas susideda iš penkių IR LED šviesos šaltinių ir vienos nespaltvotos vaizdo kameros 1.6.1 pav. Keturi šviesos šaltiniai yra išdėstyti keturiuose monitoriaus kampuose, o vienas yra ant kameros lęšio centro, tam, kad padarytų šviesaus vyzdžio efektą televiziniame kadre. Visi keturi šviesos šaltiniai, esantys vaizduoklio kampuose yra įjungiami ir išjungiami tuo pačiu laiko momentu, o įjungimo/išjungimo procedūrą atlieka kompiuteris. Šviesos šaltinis, esantis ant kameros optinės ašies yra įjungiamas/ išjungiamas nepriklausomai nuo likusių. Kamera yra patalpinta vaizduoklio apačioje. Ant jos yra sumontuotas didelio priartinimo objektyvas, tam, kad būtų galima priimti didesnę akies vaizdą televiziniame kadre. Didesnis vaizdas palengvina vyzdžio kontūro ir ragenos atspindžio išskyrimą, tačiau didelis priartinimas turi ir neigiamą poveikį žiūros taško nustatymo procedūroje, nes maži galvos judesiai įneša didesnius vaizdo pokyčius televiziniame kadre.



1.6.1 pav. sistemos su penkiais IR LED šviesos šaltiniais ir viena kamera prototipo konfigūracija

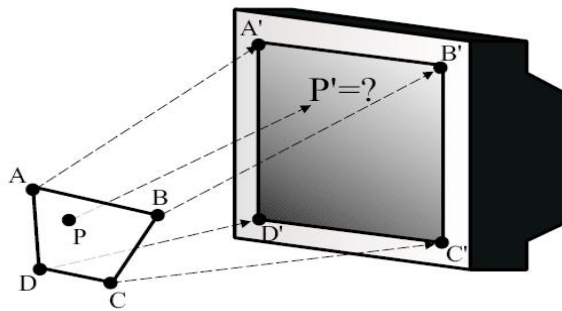
1.7 Vyzdžio centro ir ragenos atspindžių aptikimas sistemoje su 5 šviesos šaltiniais

Naudojant sistemą su 5 šviesos šaltiniais buvo pasiūlytas metodas aptikti vyzdžio centrui ir ragenos atspindžiams. Norint rasti vyzdžio ir RA centrų koordinatas [6] darbe buvo naudojami dveji kadrai vieno žiūros taško nustatymui. Priimant pirmą kadrą iš kameros yra įjungiami šviesos šaltiniai esantys vaizduoklio kampuose, gaunamas kadras pavaizduotas 1.7.1 pav. a.



1.7.1 pav. vaizdo kadrai gaunami panaudojant skirtingą apšvietimo šaltinių konfigūraciją [6]

Ragenos atspindžius rasti televiziniame kadre yra lengva, kadangi jų pikselių intensyvumas yra ženkliai didesnis nei aplink esančių pikselių. Tam [6] darbe vaizdas yra paverčiamas į dvejetainį, kurį sudaro tik vienetai ir nuliai. Tuo tikslu kadras yra skanuojamas ir kiekvieno pikselio intensyvumo reikšmė yra tikrinama ar viršija tam tikrą slenkstinę ribą. Jei neviršija, tuomet vaizdo pikselio intensyvumas yra pakeičiamas į nulį, jei viršija, tuomet pakeičiamas į vienetą, taip gaunamas juodai baltas vaizdas (dvejetainis). Binariniame vaizde lengva išskirti ragenos atspindžius: jie turėtų būti baltos dėmės, tačiau vaizde gali būti ir papildomų „dėmių“, kurios atsiranda dėl triukšmų, papildomo apšvietimo, papildomų atspindžių ar artefaktų (akinių). Radus visus keturis šviesos šaltinių (esančių vaizduoklio kampuose) atspindžius, galima žinoti vaizduoklio padėtį akies atžvilgiu. Jei vyzdžio centras patenka į keturkampio, kuris susidaro iš šviesos šaltinių atspindžių, vidų, tuomet **reiškia**, kad vartotojas žiūri į vaizduoklį 1.7.2 pav.



1.7.2 pav. šviesos šaltinių ir žiūros taško susidarymas akyje [6]

Radus ragenos atspindžius, norit rasti žiūros tašką pirmiausia reikia surasti vyzdžio centrą. Tam tikslui [6] minimoje sistemoje yra panaudojamas šviesos šaltinis esantis ant kameros lęšio centro. Jį uždegus, visi kiti yra užgesinami ir taip yra gaunamas šviesus vyzdys 1.7.1 pav. b. Tačiau jei šviesos šaltinis nėra ant kameros optinės ašies, bet yra netoli nuo jos, tuomet yra gaunamas tamsesnis vyzdys. Vyzdžiui išskirti, kaip yra naudojami du kadrai- vienas kuris buvo gautas naudojant keturis šviesos šaltinius ir vienas kuris buvo gautas naudojant vieną šviesos šaltinį. Tam imamas abiejų paveikslėlių atitinkamų pikselių intensyvumų skirtumas, po kurio gautas vaizdas yra pavaizduotas 1.7.1 pav. c. Tuomet vaizdas vėl yra verčiamas binariniu, kaip ir ieškant ragenos atspindžių. [6] darbe teigiama, kad abu kadrai yra priimami dideliu greičiu, vienas po kito, tačiau tai į sistemą įneša papildomas paklaidas ieškant žiūros taško koordinatčių.

2. PROJEKTUOJAMOS SISTEMOS APRAŠYMAS

2.1 Aparatūrinė AJMS prototipo dalis

Akių judesių matavimo sistemos prototipui buvo naudojamos „Basler A602f“ kameros. Jos prie kompiuterio jungiamos per 1394 sąsają.

Kamera yra maitinama per 1394 sąsają, tik atskirai reikia paduoti +5V į objektyvą, kad jis atsidarytų. Šios kameros vaizdo jutiklis yra jautrus infraraudoniesiems spinduliams, kurių akis nemato, todėl šią kamerą yra patogu naudoti akių judesių matavimui VOG metodu, ir naudojant vieną ar kelis IR šviesos šaltinius. Kitas svarbus šios kameros parametras yra kadru priėmimo greitis, kuris siekia net 100kad/s esant pilnai kameros rezoliucijai, taip pat pasirenkant dalinį kadro atvaizdavimą (angl. Area Of Interest) kadru priėmimo greitis padidėja.

Pasirinkta kamera taip pat turi trigerį, kurio pagalba galima sinchronizuoti duomenų priėmimą (pavyzdžiui kelių kamerų). Projektuojamoje AJMS ši kameros savybė padeda išskirti, kuris šviesos šaltinis švietė tam tikru laiko momentu. Jei šviečia keletas šviesos šaltinių vienu metu yra sudėtinga išskirti, kurioje kadro vietoje, kuris šviesos šaltinis yra matomas. Todėl vienu laiko momentu šviečiant tik vienam šviesos šaltiniui yra aktyvuojamas kameros trigeris, o priėmus kadra, vienas šviesos šaltinis yra užgesinamas, kitas uždegamas ir vėl aktyvuojamas kameros trigeris.

Kameros trigeris turi tris išvadus valdymui ir du maitinimui, kurie prie kameros jungiasi per RJ45 10 kontaktų jungtį. Valdymo išvadų paskirtis ir funkcijos pateiktos 1 lentelėje.

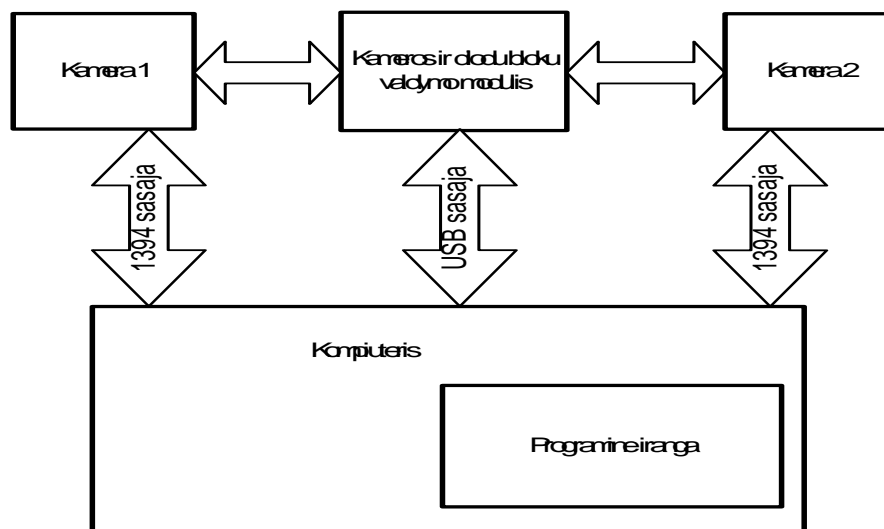
Lentelė nr.1

Kontakto pavadinimas	Duomenų kryptis (kamos atžvilgiu)	Loginio vieneto reikšmė	Loginio nulio reikšmė
„IntEn“	Iš (out)	Kamera yra pradėjusi ekspoziciją	Ekspozicija yra baigta
„TrigRdy“	Iš (out)	Galima pradėti ekspoziciją	Negalima pradėti ekspozicijos
„ExTrig“	Į (in)	Pradedama ekspozicija	Nepradedama ekspozicija

Kaip matosi iš 1 lentelės kameros trigerio valdymui pakanka dviejų išvadų „TrigRdy“ ir „ExTrig“. Naudojant kameros trigerį galima sinchronizuoti abi kameras (abejuose kameroje pradėti ekspoziciją vienu metu) kas palengvintų vyzdžio kontūro išskyrimą.

Kameros trigerio ir šviesos šaltinių valdymui buvo pasirinktas „Atmel“ kompanijos mikrovaldiklis AT90USB162. Šio mikrovaldiklio išvadų pilnai pakanka valdyti du kameros pozicionavimo mechanizmus, kurie kamerą gali pasukti kairėn/dešinėn ir pakreipti aukštyn/žemyn. Kameros pozicionavimo mechanizmai yra valdomi 220VAC, todėl prie mikrovaldiklio jie yra jungiami per optines poras (principinė pajungimo schema pateikta prieduose).

Mikrovaldiklis prie kompiuterio prijungiamas USB sąsaja 2.1 pav., kuria siunčiami valdymo signalai mikrovaldikliui (pasukti kamerą į dešinę, įjunti šviesos šaltinį, pradėti kamerai kadro ekspoziciją ir t.t.). 1394 sąsaja yra siunčiami video duomenys kompiuterio programinei įrangai.

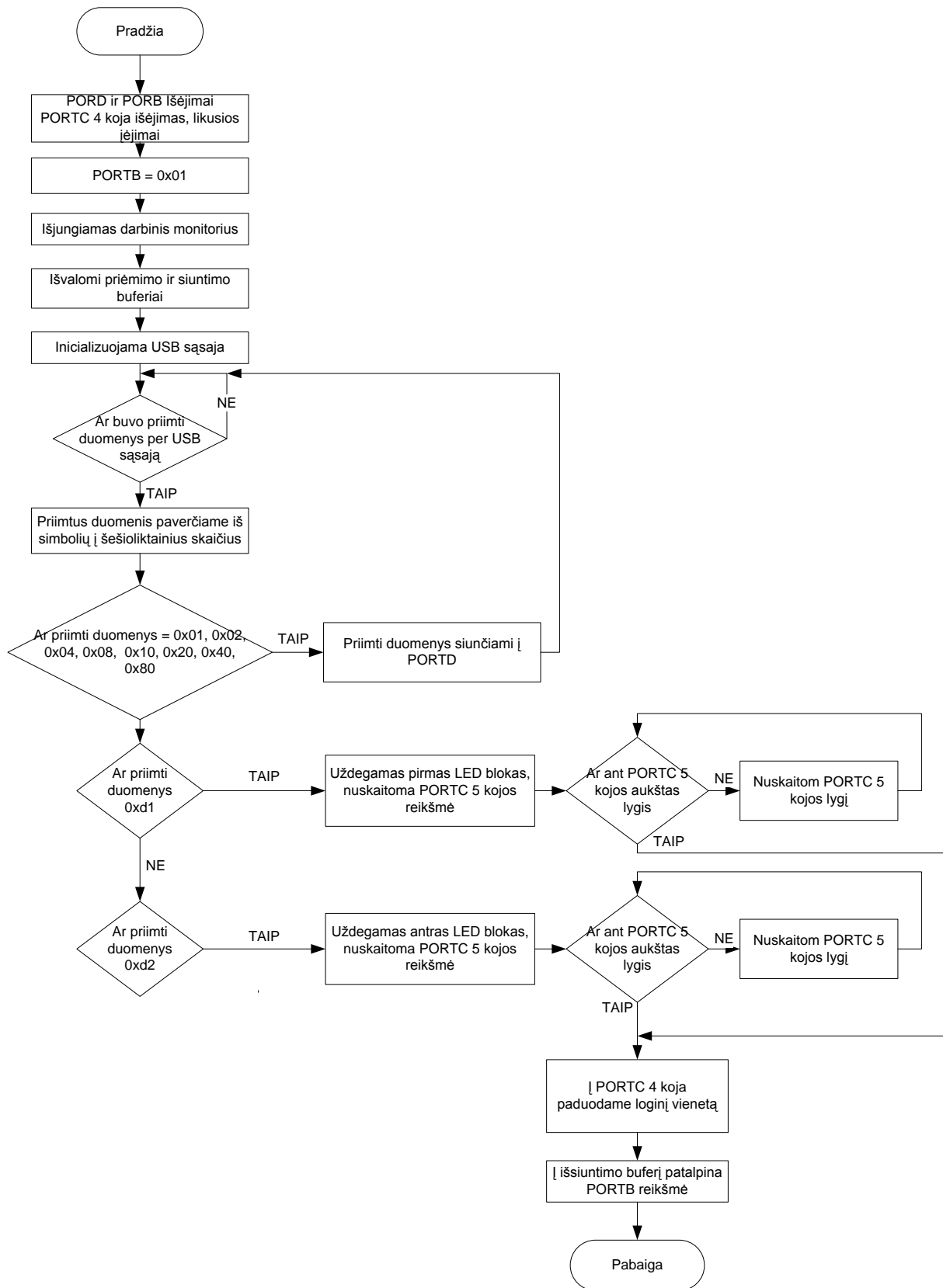


2.1 pav. AJMS struktūrinė schema

2.2 Programinė įranga mikrovaldikliui

2.2 pav. pateiktas mikrovaldiklio programos veikimo algoritmas. Pirmiausia yra sukonfigūruojami prievadai įėjimams išėjimams. Įėjimų reikia tik dviejų, nes iš kameros trigerio gauname tik vieną signalą. Duomenys per USB sąsają yra siunčiami kaip simboliai todėl, kad būtų patogiau priimami duomenys yra paverčiami šešioliktainiu skaičiumi, kuri galima iškart nusiųsti į vieną ar kitą prievadą. Pagal priimtų duomenų reikšmę yra atliekamas vienas ar kitas veiksmas (pasukama kamera, laukiama kol kamera galės pradėti ekspoziciją) duomenų reikšmė ir funkcinė prasmė matosi algoritme.

Mikrovaldiklio programoje numatyta, kad mikrovaldiklis gavęs komandą pradėti ekspoziciją palaukia, kol kamera galės pradėti ekspoziciją ir, kai yra pradedama ekspozicija, mikrovaldiklis į USB išsiuntimo „buferį“ patalpina diodų bloko numerį, kuris buvo uždegtas. Taip yra sinchronizuojamas mikrovaldiklio ir kompiuterio programinės įrangos darbas.



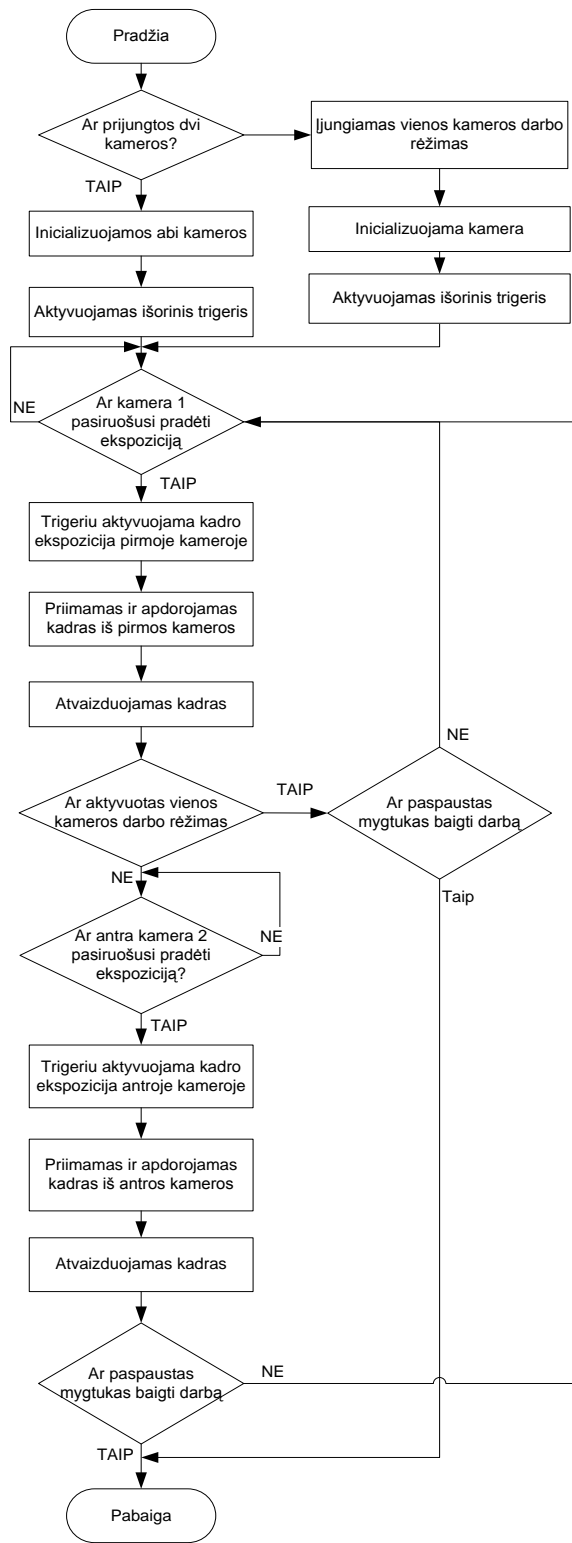
2.2 pav. mikrovaldiklio programos algoritmas

2.3 Programinė įranga kompiuteriui

2.3 pav. yra pateiktas AJMS prototipo kompiuterio programos veikimo algoritmas. Programa turi galimybę dirbti su dviem kamerom, kurios yra prijungtos per 1394 sąsają, tačiau kiekviena kamera turėtų būti prijungta prie skirtingos plokštės, kadangi dvejom kamerom esant prijungtoms prie vienos plokštės tik skirtingų lizdų, kadru priėmimo greitis sumažėja daugiau nei dvigubai. Suprojektuotos AJMS aparatinė dalis gali pilnai dirbti su dvejom kamerom, tačiau programa yra parašyta taip, kad randa vyzdžio ir ragenos atspindžio centrą, tik vienos kameros filmuojamame vaizde (jei yra prijungtos dvi kameros, antros kameros vaizdas yra tik parodomas ekrane, tačiau jis nėra apdorojamas). Tačiau esant būtinybei galima nesunkiai apdoroti vaizdus abiejų kamerų, programoje tai jau yra numatyta.

Kameros trigeris, kuris yra valdomas išoriškai ir aktyvuojamas per atitinkamą meniu punktą programoje. Aktyvavus trigerį yra siunčiamas kodas per USB sąsają mikrovaldikliui, kuris reiškia, kad reikia aktyvuoti kameros trigeri. Mikrovaldiklio programa, gavusi trigerio aktyvavimo kodą, laukia, kol kamera bus pasiruošusi pradėti kadro ekspoziciją ir kuomet ekspozicija yra pradėta, į USB išsiuntimo „buferi“ patalpina atitinkamą kodą, kurio laukia kompiuterio programa. Taip yra išvengiama to, kad nebūtų apdorojamas vaizdo kadras, kuris jau buvo priimtas priėmimo „buferyje“ kompiuteryje ir jau buvo apdorotas. Priimto kadro apdorojimo algoritmas yra pateiktas 2.4 pav.

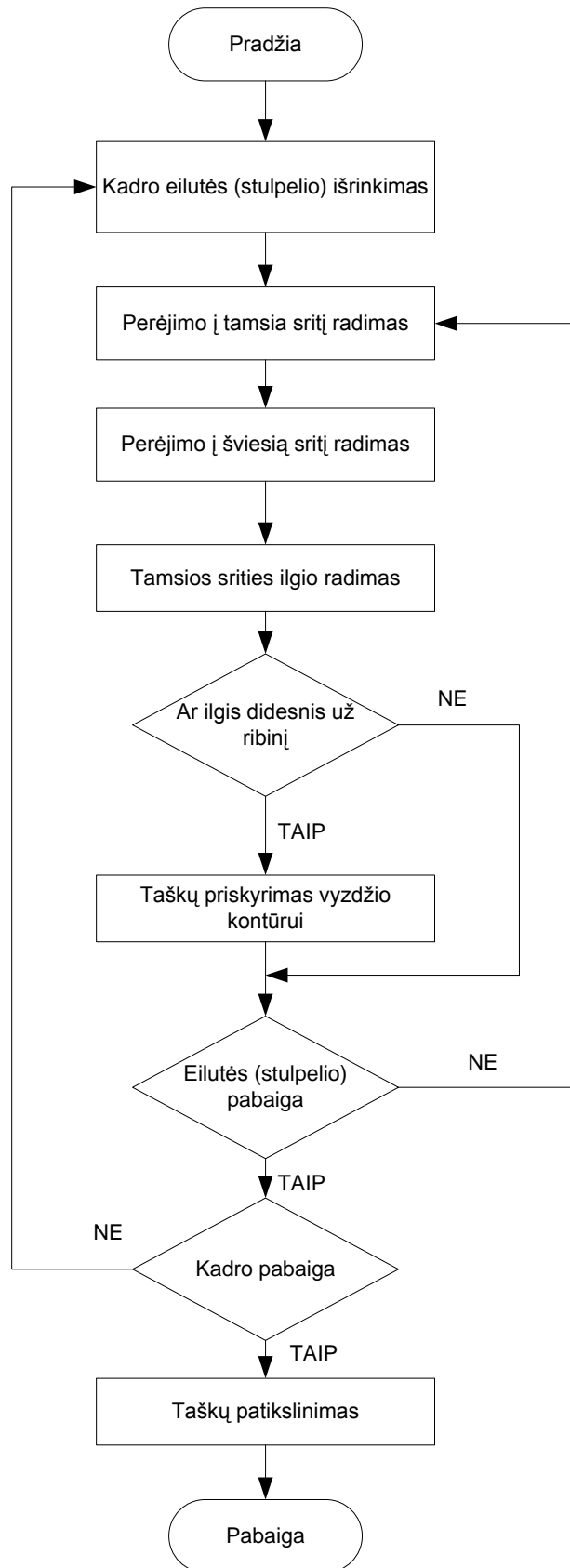
Norint apdoroti kadra, prieš tai reikia paspausti mygtuką „CON“ ir pele pasirinkti skenuojamą vietą. Skenuojamą vietą primame kadre galima keisti bet kuriuo metu programos eigoje. Paspaudus mygtuką „CON“, kuris yra meniu juostoje (2.5 pav.), atsidaro nustatymų langas, kurio funkcijos aprašytos 2.5 skyriuje.



2.3 pav. AJMS prototipo programos algoritmas

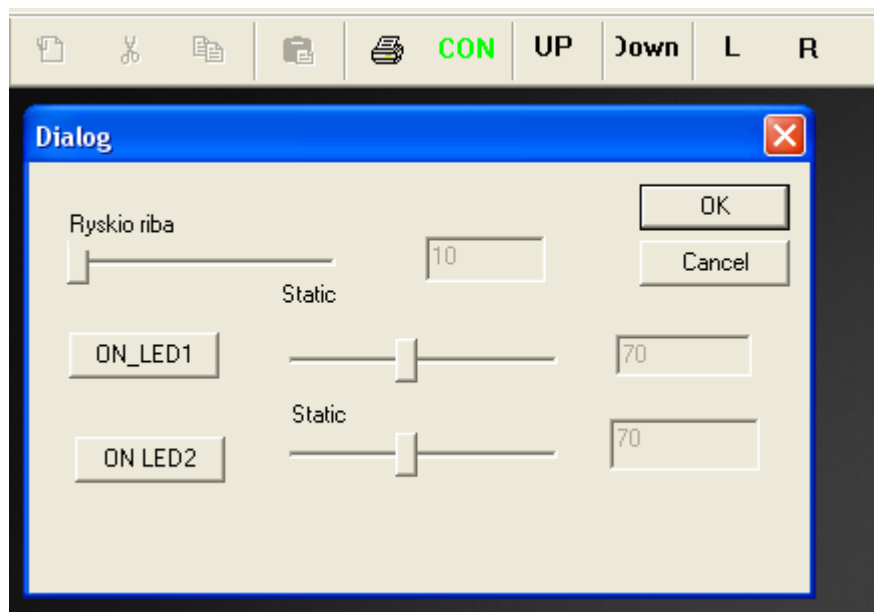
2.4 Vyzdžio kontūro aptikimo algoritmas

2.4 pav. paveiksle yra pateiktas vyzdžio kontūro taškų skenavimo algoritmas. Pilnas vyzdžio kontūras iš televizinio kadro yra išskiriamas po dviejų žingsnių: eilučių skenavimo bei stulpelių skenavimo. Algoritmas šiem dviem žingsniam yra identiškas. Algoritmo pradžioje yra išrenkama pirma eilutė (stulpelis). Skenuojant iš eilės kiekvieną išrinktos eilutės pikselį, yra randamas perėjimo į tamsią sritį taškas (pirmasis pikselis, kurio ryškis lygus arba mažesnis už VRR). Pikseliai yra skenuojami toliau, kol aptinkamas perėjimo į šviesią sritį taškas (ryškis > VRR). Turint šiuos du taškus, randame tamsios srities ilgį. Kadangi vaizde tamsi sritis gali būti ne tik vyzdys, bet ir tamsesnės rainelės dalys ar blakstienos, tamsios sritys yra atmetamos, jei jų plotis yra mažesnis už nustatytą ribą. Paprastai tokios šalutinės sritys turi mažesnę plotį, nei vyzdžio diametras. Radus perėjimą į šviesią sritį, ir jei tai dar nėra eilutės (stulpelio) pabaiga, vėl yra ieškomas perėjimo taškas į tamsią sritį. Pasiekus eilutės (stulpelio) pabaigą, jei ji (jis) nepaskutinė šiame kadre, yra išrenkama nauja eilutė (stulpelis). Kitu atveju skenavimas yra užbaigtas ir kontūro taškai buvo aptikti pikselio tikslumu. [15]



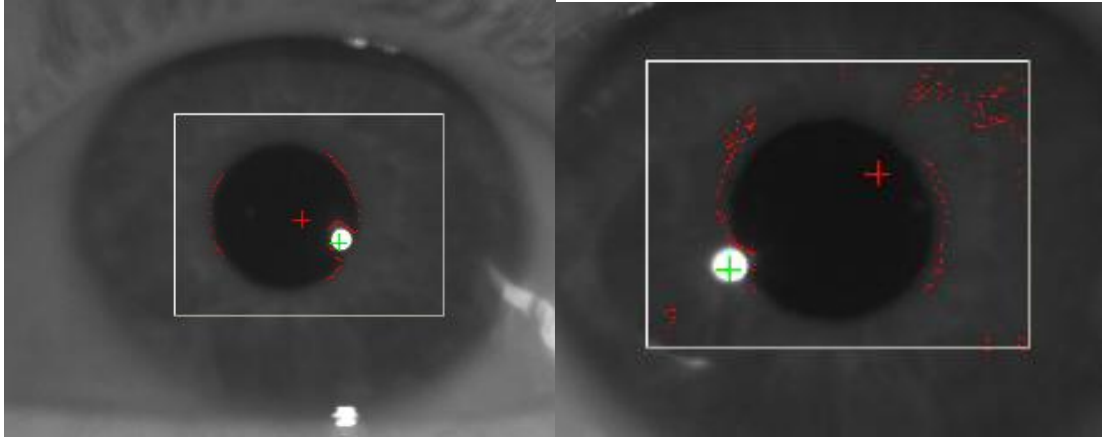
2.5 Ryškio ribos parinkimas

2.5 pav. pavaizduotas programos meniu, matosi mygtukai „UP“, „Down“, „L“, „R“ kurie valdo kameros pozicionavimo įrenginį, jį galima pasukti atitinkamomis kryptimis, kairėn, dešinėn, aukšty ir žemyn. Taip pat yra mygtukas „CON“, kurį paspaudus iškviečiamas, dialogo langas, su kuriuo yra parenkama atitinkama ryškio riba, vyzdžio skanavimo algoritmui.



2.5 pav. programos meniu juostos mygtukai ir dialogo langas vyzdžio ryškio ribos parinkimui

Pradiniame variante buvo mėginama naudoti parinktą vieną ryškio ribą abiem šviesos šaltiniams, tačiau nors abu šviesos šaltiniai yra identiški buvo nuspręsta ryškio ribą atitinkamai parinkti kiekvienam šviesos šaltiniui atskirai, nes parinkus vieną ribą kai šviečia vienas šviesos šaltinis ši riba nebetinka kitam šviesos šaltiniui, nes šviesos srautas tenkantis akiai nuo kiekvieno šaltinio yra skirtingas. Tai matosi iš 2.6 pav., kurio (a) dalyje pavaizduota nuskanuota akis su tinkamai parinkta ryškio riba pirmam šviesos šaltiniui, o (b) skanuotas vyzdys su ta pačia VRR, kai šviečia antras šviesos šaltinis. Aiškiai matosi skanuojant rasti taškai, kurie nepriklauso vyzdžio kontūrai. Todėl vyzdžio ryškio riba yra parenkama kiekvienam šviesos šaltiniui atskirai įjungus atitinkamą šviesos šaltinį su mygtukais „LED1“ ir „LED2“.



a)

b)

2.6 pav. vyzdžio kontūras su ta pačia ryškio riba abiems šviesos šaltiniams

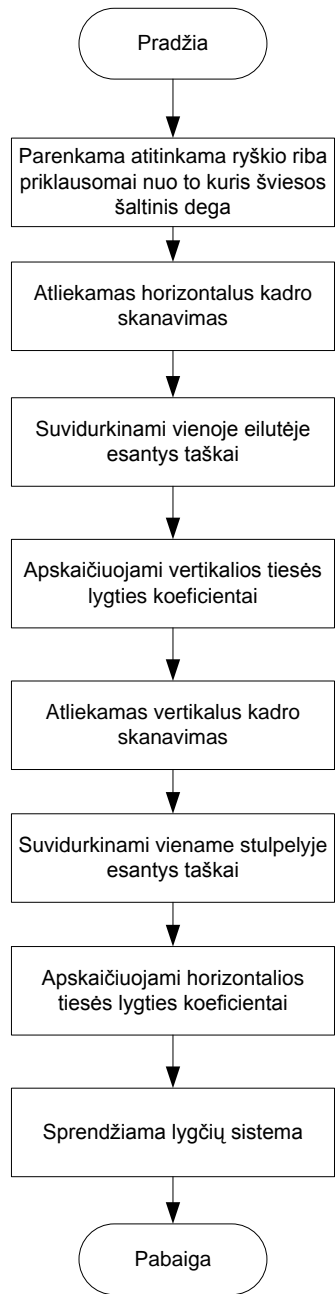
2.6 Vyzdžio centro radimo algoritmas

Vyzdžio centro radimui buvo naudojamas algoritmas pavaizduotas 2.7 pav. Kaip jau buvo minėta prieš tai, apdorojant priimtą kadra, jis yra skanuojamas vertikaliai ir horizontaliai (stulpeliai ir eilutės). Po skanavimo yra skaičiuojamas rastų taškų, esančių vienoje eilutėje (stulpelyje), vidurkis. Tuomet mažiausių kvadratų metodu randami tiesės (vertikalios ir horizontalios) lygties koef. h_1 ir h_2 pagal formules[15]:

$$h_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2.1)$$

$$h_2 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2.2)$$

kur n – taškų skaičius po koordinatžių vidurkinimo, atmetus per daug nutolusius taškus. Radus tiesių lygčių koeficientus yra sprendžiama lygčių sistema, ir randamos vyzdžio centro koordinatės.



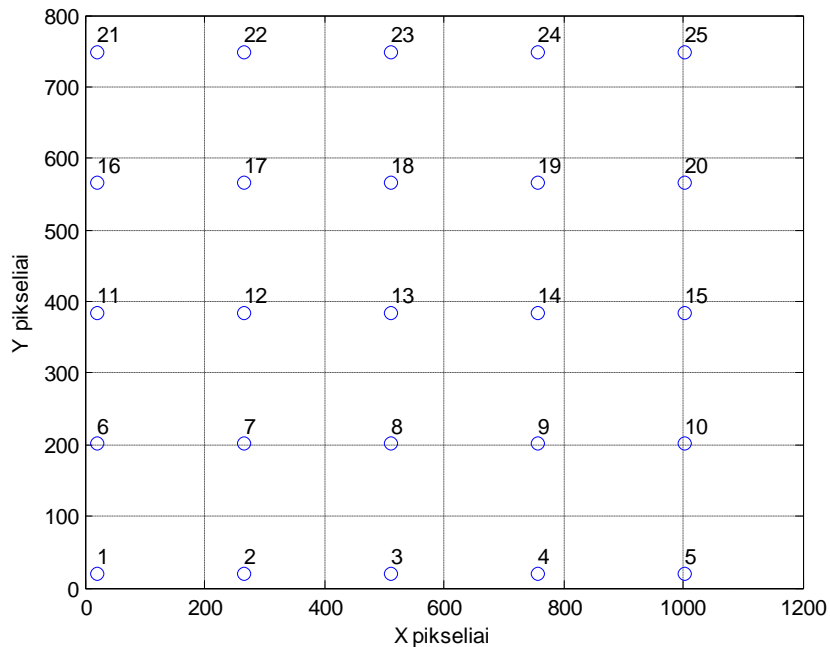
2.7 pav. vyzdžio centro radimo algoritmas

3. EKSPERIMETO METODIKA IR ATLIKIMAS

3.1 Eksperimento metodika

Tyrimui atlikti buvo pasirinkta 25 taškų kalibravimo procedūra, nors ji yra varginanti ir nepatogi vartotojui, bet jos metu yra gaunami tikslesni sistemos ir vartotojo akies parametrai, dėl to galima atlikti tikslesnius tyrimus.

Eksperimento metu tiriamajam vaizduoklio ekrane buvo rodomi dvidešimt penki kalibravimo taškai kurių koordinatės buvo žinomos iš anksto 3.1 pav.. Prieš pradėdant kalibravimo procedūrą yra parenkama atitinkama ryškio riba kiekvienam šviesos šaltiniui, kaip buvo aprašyta 2.5 skyriuje.



3.1 pav. kalibravimo taškai vaizduoklio koordinatinių atžvilgiu

Tuomet aktyvuojamas kameros trigeris ir pradėdamas gautų duomenų (vyzdžio centro koordinatinių, ragenos atspindžių centrų, šviesos šaltinio numerio, tikrųjų koordinatinių vaizduoklyje) išvedimas į tekstinį failą. Tuomet paspaudus kalibravimo mygtuką vaizduoklio ekrane pradėdami rodyti 25 taškai. Kiekvienas taškas yra rodomas skirtingu laiko momentu ir taškai yra rodomi atsitiktiniu būdu.

Kaip ryšio funkcija tarp akies kampinių koordinatinių ir vaizduoklio naudojamas antros eilės polinomas.

Pirmu atveju ieškoma ryšio funkcija tarp vyzdžio centro koordinatų kameros vaizdo jutiklyje ir tikrojo taško koordinatų vaizduoklyje pagal (3.1) formulę.

$$\begin{matrix} \text{[Ilustracija: Ryšio funkcijos diagrama su žymėmis]} \\ \text{[Ilustracija: Ryšio funkcijos diagrama su žymėmis]} \end{matrix} \quad (3.1)$$

čia S_x, S_y tikrosios žiūros taško koordinatės vaizduoklio ekrane. a_k, b_p polinomo koeficientai, x_v - vyzdžio centro x koordinatė y_v - vyzdžio centro y koordinatė.

Antru atveju ieškoma ryšio funkcija, kai naudojamos vyzdžio centro koordinatės ir vieno ragenos atspindžio centro koordinatės pagal (3.2) formulę:

$$\begin{aligned} s_x &= a_0 + a_1 x_v + a_2 y_v + a_3 x_{b1} + a_4 y_{b1} + a_5 x_v^2 + a_6 y_v^2 + a_7 x_{b1}^2 + a_8 y_{b1}^2, \\ s_y &= b_0 + b_1 x_v + b_2 y_v + b_3 x_{b1} + b_4 y_{b1} + b_5 x_v^2 + b_6 y_v^2 + b_7 x_{b1}^2 + b_8 y_{b1}^2, \end{aligned} \quad (3.2)$$

Trečiu atveju ieškoma ryšio funkcija, kai naudojamos vyzdžio centro koordinatės ir dviejų ragenos atspindžių centrų koordinatės pagal (3.3) formulę:

$$\begin{matrix} \text{[Ilustracija: Ryšio funkcijos diagrama su žymėmis]} \\ \text{[Ilustracija: Ryšio funkcijos diagrama su žymėmis]} \end{matrix} \quad (3.3)$$

čia x_v - vyzdžio centro x koordinatė (pagal abu šviesos šaltinius), y_v - vyzdžio centro y koordinatė (pagal abu šviesos šaltinius), x_{b1} - pirmo šviesos šaltinio centro x koordinatė, y_{b1} - pirmo šviesos šaltinio centro y koordinatė, x_{b2} - antro šviesos šaltinio centro x koordinatė, y_{b2} - antro šviesos šaltinio centro y koordinatė.

Gavus rezultatus skaičiuojama transformacijos paklaida kiekvienam eksperimentiniam taškui pagal formulę:

$$e = \sqrt{(x_e - x_m)^2 + (y_e - y_m)^2} \quad (3.4)$$

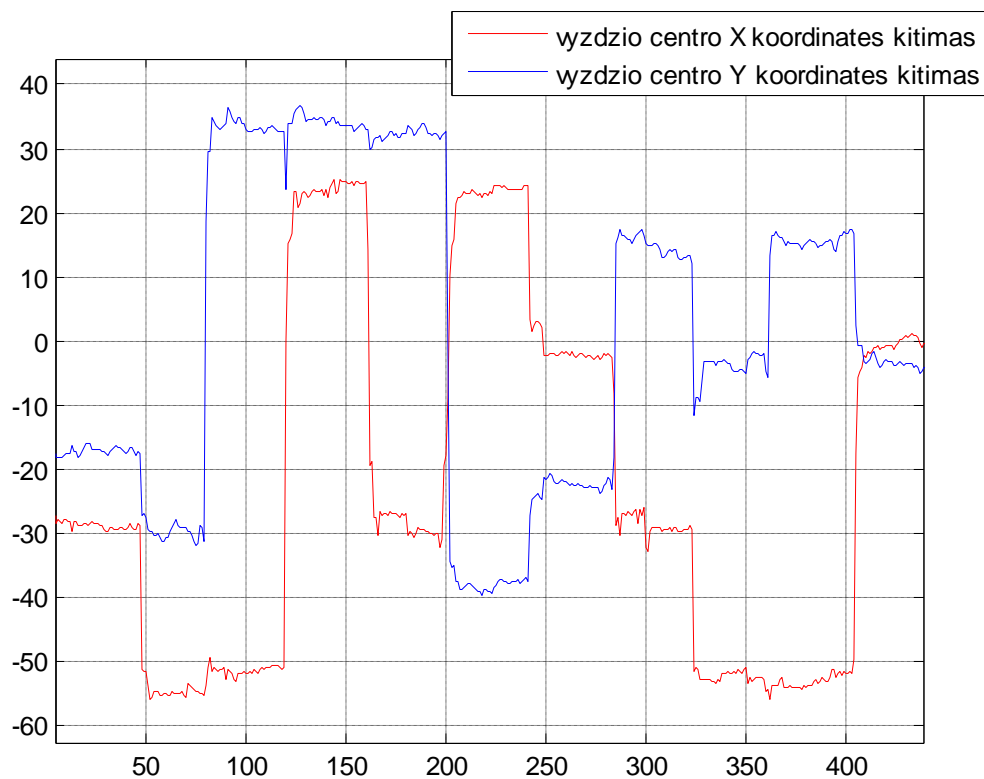
Čia x_e - eksperimentinis taškas (vaizduoklyje rodomo taško x koordinatė), y_e - eksperimentinis taškas (vaizduoklyje rodomo taško y koordinatė), x_m - apskaičiuota taško x koordinatė, y_m - apskaičiuota taško y koordinatė.

Transformacijos paklaida e yra vektorius, kuris susideda iš 25 elementų, nes tyrimui naudojami 25 kalibraciniai taškai, tuomet yra suskaičiuojamas bendras visų 25 taškų klaidų vidurkis ir standartinis nuokrypis kiekvienu atveju.

3.2 Eksperimento eiga

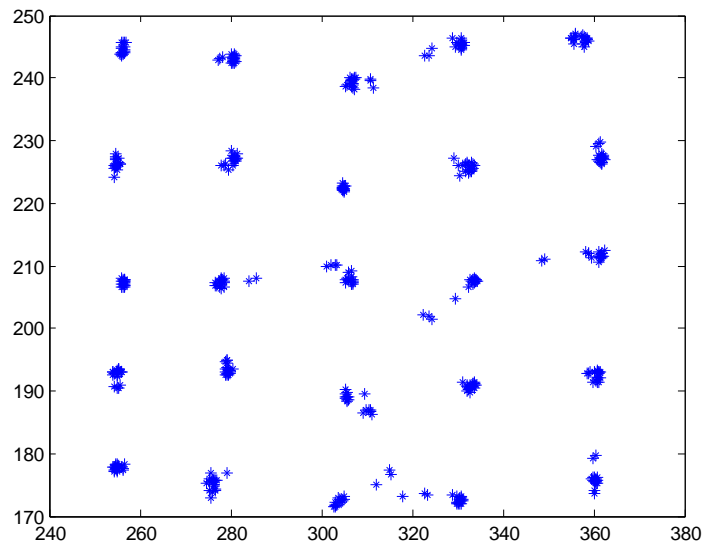
Kaip aprašyta 5.1 skyriuje tiriamajam buvo rodomi 25 kalibraciniai taškai, ir rastos vyzdžio, bei ragenos atspindžių centrų, ir tikrosios(kalibracinių taškų) centrų koordinatės. Gauti duomenys yra surašomi į tekstinį failą ir apdorojamos „Matlab“ paketu.

Kadangi tiriamajam nukreipiant žvilgsnį nuo vieno kalibracinio taško prie kito yra apdorojami tuo metu gaunami video duomenys iš kameros yra randamas vyzdžio centras kol tiriamasis dar nežiūri į eksperimentinį tašką. Tam, kad tyrimas būtų tikslesnis buvo atmetami per daug nutolę taškai pagal trijų sigmų taisyklę, kiekvienam eksperimentiniam taškui. 3.2 pav. pavaizduota kaip kinta vieno tiriamojo vyzdžio centro koordinatės laike.



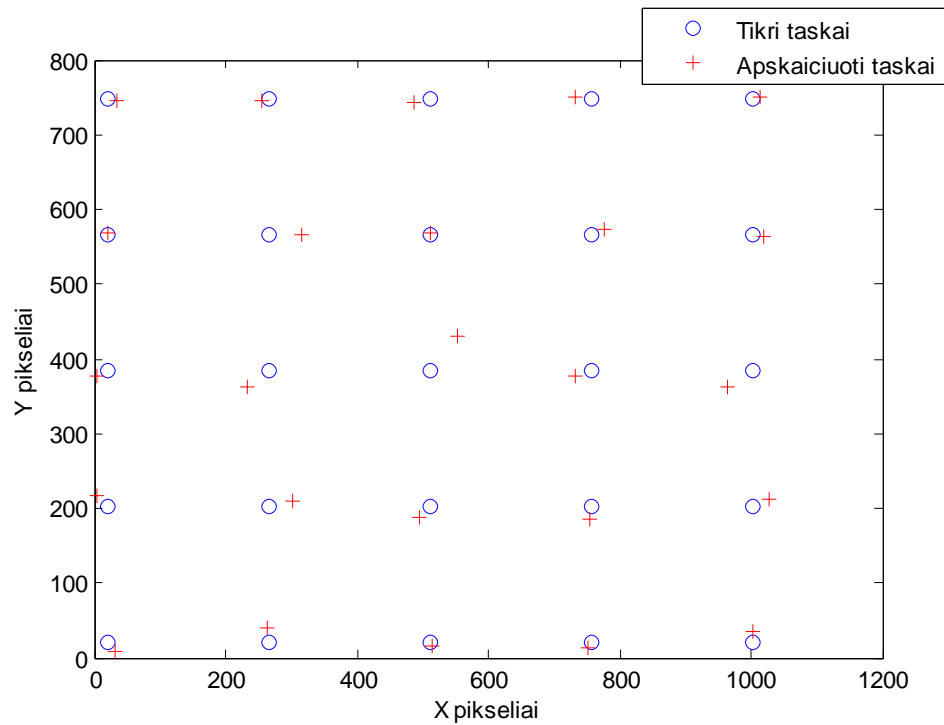
3.2 pav. vieno tiriamojo vyzdžio centro koordinatėjų kitimas laike

Taip per daug nutolę taškai pagal trijų sigmų taisyklę buvo atmetami ir ragenos atspindžio koordinatėjų, nes pasitaikydavo kai į filmuojamą vaizdą papildavo „šiukšlių“ ir ragenos centro koordinatės būdavo suskaičiuojamos netiksliai. 3.3 pav. pavaizduotos vieno iš tiriamųjų gautos ragenos centro koordinatės.



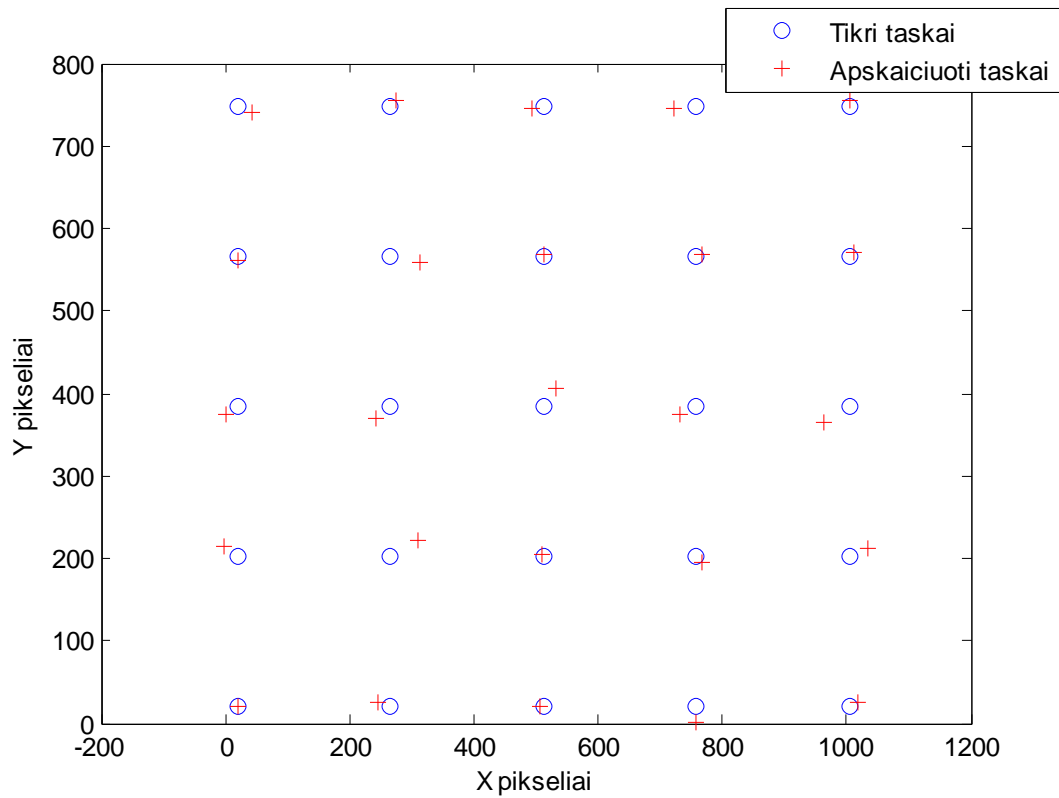
3.3 pav. gautos vieno ragenos atspindžio centro koordinatės

Atlikus bandymus ir radus ryšio funkciją pagal (3.1) formulę, buvo gauta transformacijos paklaida $e = 25.2758$, gauti rezultatai pavaizduoti 3.4 pav.



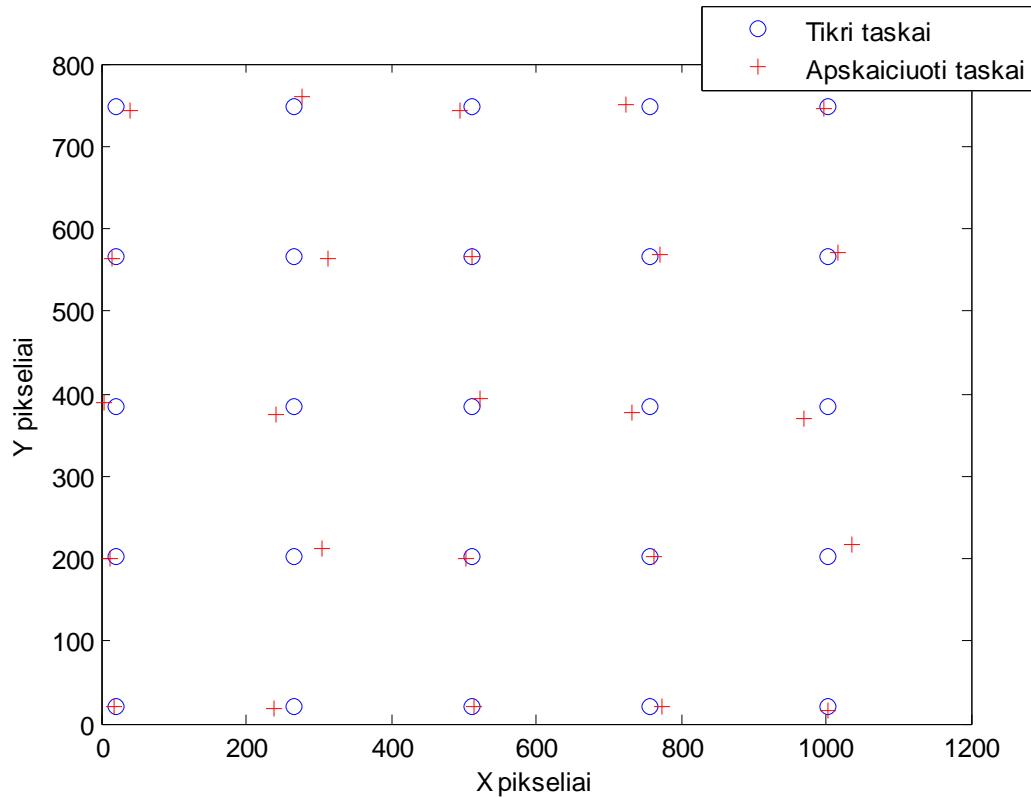
3.4 pav. eksperimentiniai ir apskaičiuoti taškai kai naudojamos tik vyzdžio centro koordinatės

Sekančiu atveju buvo ieškoma ryšio funkcija kuomet naudojamos vyzdžio ir vieno ragenos atspindžio centrų koordinatės pagal (3.2) formulę. Gauta transformacijos paklaida $e = 23.1420$. Gauti rezultatai pateikti 3.5 pav.



3.5 pav. tikri ir apskaičiuoti taškai, kai naudojamos vyzdžio ir vieno ragenos atspindžio centrų koordinatės

Trečiu atveju buvo bandoma rasti ryšio funkciją pagal (3.3) formulę, kuomet naudojamos vyzdžio ir dviejų ragenos atspindžių centrų koordinatės. Gauta transformacijos paklaida $e = 19.9106$. Gauti rezultatai pavaizduoti 3.6 pav.



3.6 pav. tikri ir apskaičiuoti taškai, kai naudojamos vyzdžio ir dvejų ragenos centrų koordinatės

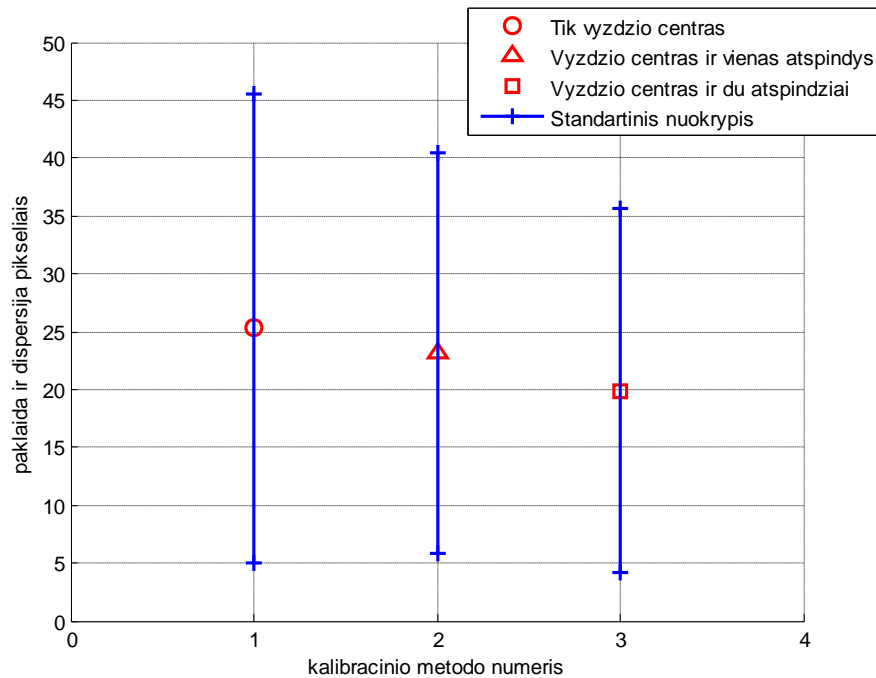
Kiekvienu atveju apskaičiuota transformacijos paklaida pagal (3.4) ir transformacijos paklaidos standartinis nuokrypis (pavaizduota 3.7 pav.) Gauta paklaida pikseliais perskaičiuojama į laipsnius sekančiai:

$$\alpha = \arctg(xk / L)$$

Kur x – paklaida pikseliais, k – koef. paklaidų perskaičiavimui iš pikselių į centimetrus ($k = \text{vaizduoklio plotis centimetrais} / \text{vaizduoklio plotis pikseliais}$), L – atstumas nuo tiriamojo iki vaizduoklio. Gauta transformacijos paklaida laipsniais pateikta 3.1 lentelėje. Gautos paklaidos laipsniais atitinka paklaidas gautas N. Ramausko disertacijoje [15], kuomet naudojamas 25 taškų antros eilės polinominis kalibravimas (naudojamos vien vyzdžio centro koordinatės).

5.1 lentelė. transformacijos klaida laipsniais

Kalibracinis algoritmas	1- naudojamos vien vyzdžio centro koordinatės	2 – naudojamos vyzdžio centro ir vieno ragenos atspindžio centrai	3 – naudojamos vyzdžio centro ir dviejų ragenos atspindžių centrai
Transformacijos paklaida laipsniais	0.9050	0.8287	0.7130



3.7 pav. transformavimo klaidos ir klaidų standartinis nuokrypis kiekvienu bandymo atveju

Metodų palyginimui buvo atlikta reguliarumo parametrų vienmatė dispersinė analizė [2] Pirmu atveju buvo lyginta visais trim būdais (kai žiūros taškui nustatyti naudojamas tik vyzdžio centras – 1, kai žiūros taškui nustatyti naudojamos vyzdžio ir vieno ragenos atspindžio koordinatės – 2, kai žiūros taškui nustatyti naudojamos vyzdžio ir dviejų ragenos atspindžių koordinatės - 3) gauti rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

Kur F – fišerio kriterijus, P_1 – tikimybė, kad nėra reikšmingų skirtumų tarp kalibracinių metodų gautų rezultatų, P_2 – tikimybė, kad yra reikšmingų skirtumų tarp kalibracinių metodų gautų

rezultatų. Reikšmingas skirtumas gautas tarp pirmo ir trečio kalibravimo metodų su 0,689 tikimybe. Visais kitais atvejais gautas nereikšmingas skirtumas, su atitinkamomis tikimybėmis.

3.2 lentelė dispersinės analizės rezultatai

Lyginti metodai	F	P_1	P_2
1,2,3	0,57	0,5667	0,4333
1,2	0,16	0,6901	0,3009
1,3	1,09	0,3011	0,689
2,3	0,48	0,4925	0,5075

IŠVADOS

1. Parašyta programinė įranga, kuri naudoja nemokamą tvarkyklę, gali dirbti su skirtingų gamintojų kameromis, kurios jungiasi per 1394 jungtį. Taip pat programinė įranga realiu laiku apdoroja priimamus duomenis (randa vyzdžio ir ragenos atspindžių centrus).
2. Suprojektuota aparatinė akių judesių matavimo sistemos dalis, kuri valdo kameros triggerį ir išorinius šviesos šaltinius, prie kompiuterio jungiama per USB sąsaja. USB tvarkyklė kaip ir kameros tvarkyklė yra nemokama. Parašyta programa mikrovaldikliui, kuri valdo kameros triggerį ir šviesos šaltinius, keičiasi duomenimis su kompiuterio programine įranga USB sąsaja.
3. Ištirta šviesos šaltinių skaičiaus įtaka nustatant žiūros tašką, kuomet naudojama 25 taškų kalibravimo procedūra. Kuomet naudojamos vien tik vyzdžio centro koordinatės nustatant žiūros tašką gaunama didžiausia transformacijos paklaida ir didžiausias paklaidos standartinis nuokrypis. Geriausi rezultatai gauti kai žiūros taškui nustatyti naudojamos vyzdžio ir dvejų ragenos atspindžių centrų koordinatės.
4. Kai žiūros taškui nustatyti naudojamos vien vyzdžio centro koordinatės gauta 0,9 laipsnio transformacijos paklaida, kuri adekvati N. Ramanausko disertacijoje gautai paklaidai kuomet naudojamas 25 taškų antros eilės polinominis kalibravimas ir vien tik vyzdžio centro koordinatės.
5. Kai naudojamos vyzdžio centrų ir dvejų ragenos atspindžių koordinatės, tuomet transformacijos paklaida gauta 0,7 laipsnio. Priklausomai nuo šviesos šaltinių skaičiaus transformacijos paklaida svyruoja 0,2 laipsnio.
6. Norint gauti mažesnes transformacijos paklaidas, reikėtų tiksliau nustatyti ragenos atspindžių centrų koordinates.

LITERATŪRA

1. At90usb162 datasheet [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7707.pdf>
2. Eidukas D. „Eksperimento planavimo teorija“ Kaunas. Technologija 2002.
3. Eye-Tracking: Characteristics and Methods [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: http://www.eyethink.org/publications_assets/EyeTrackingEBBE.pdf
4. Guestrin E. D., Eizenman M. General Theory of Remote Gaze Estimation Using the Pupil Center and Corneal Reflections // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 53, No. 6. – 2006. – P. 1124 – 1133
5. Hansen D. W., Eye tracking in the wild. 2005.
6. Hennessey C., Nouredin B., Lawrence P. A single camera eye-gaze tracking system with free head motion. 2006.
7. Yoo D. H., Kim J. H., Lee B. R., Chung M. J. Non-contact Eye Gaze Tracking System by Mapping of Corneal Reflections. 2002.
8. Jiand Q., Yang X., Real-Time Eye, Gaze, and Face Pose Tracking for Monitoring Driver Vigilance. 2002.
9. Morimoto C.H., Amir A., Flickner M. Detecting eye position and gaze from a single camera and 2 light sources. 2002.
10. Morimoto C.H., Koons D., Amir A., Flickner M. Pupil Detection and Tracking Using Multiple Light Sources 2000.
11. Newman R., Matsumoto Y., Rougeaux S., Zelinsky A. Real time stereo tracking for head pose and gaze estimation // Proc. of the Internat. Conf. On Automatic Face and Gesture Recognition, Grenoble, France. – 2000.
12. Ohtani M., Ebisawa Y. Eye-gaze detection based on the pupil detection technique using two light sources and the image difference method 1995.
13. Paliulis E. Akies sukties judesiu registravimas. Daktaro disertacija. Kaunas:KTU, 2005
14. Parkhurst D. Jia Y.B. Steward B. Low-cost eye-tracking for human computer interaction 2006.
15. Ramanauskas N. Akių judesiu registravimo nuotoline video okulografija algoritmai. Daktaro disertacija. Kaunas 2007.
16. Tobii Glasses Eye Tracker [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.tobii.com/en/analysis-and-research/global/products/hardware/tobii-glasses-eye-tracker/>>

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1.1 pav. Tobbi kompanijos akiniai skirti akių judesiams matuoti [16].....	7
1.4.1 pav. VOG sistemų invazijos lygis [15].....	10
1.5.1 pav. AJMS sudedamosios dalys [15].....	11
1.5.2 pav. vyzdys nufilmuotas regimos šviesos kamera ir kamera jautrią IR apšvietimui	12
1.5.3 pav. a) tamsus, b) šviesus vyzdys [8].....	13
1.5.4 pav. šviesaus ir tamsaus vyzdžio susidarymas.....	13
1.5.6 pav. IR šviesos šaltinių konfigūracija [14]	14
1.5.7 pav. spindulių sklaidimo diagrama [15]	15
1.6.1 pav. sistemos su penkiais IR LED šviesos šaltiniais ir viena kamera prototipo konfigūracija	19
1.7.1 pav. vaizdo kadrai gaunami panaudojant skirtingą apšvietimo šaltinių konfigūraciją [6]	20
1.7.2 pav. šviesos šaltinių ir žiūros taško susidarymas akyje [6].....	21
2.1 pav. AJMS struktūrinė schema	23
2.2 pav. mikrovaldiklio programos algoritmas	25
2.3 pav. AJMS prototipo programos algoritmas	27
2.4 pav. vyzdžio kontūro radimo algoritmas [15].....	30
2.5 pav. programos meniu juostos mygtukai ir dialogo langas vyzdžio ryškio ribos parinkimui ...	30
2.6 pav. vyzdžio kontūras su ta pačia ryškio riba abiemis šviesos šaltiniams	31
2.7 pav. vyzdžio centro radimo algoritmas	33
3.1 pav. kalibravimo taškai vaizduoklio koordinatinių atžvilgiu	34
3.2 pav. vieno tiriamojo vyzdžio centro koordinatinių kitimas laike	36
3.3 pav. gautos vieno ragenos atspindžio centro koordinatės	37
3.4 pav. eksperimentiniai ir apskaičiuoti taškai kai naudojamos tik vyzdžio centro koordinatės ...	37
3.5 pav. tikri ir apskaičiuoti taškai, kai naudojamos vyzdžio ir vieno ragenos atspindžio centrų koordinatės.....	38
3.6 pav. tikri ir apskaičiuoti taškai, kai naudojamos vyzdžio ir dvejų ragenos centrų koordinatės.	39
3.7 pav. transformavimo klaidos ir klaidų dispersija kiekvienu bandymo atveju	40

PRIEDAI