

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
Elektronikos katedra

Gytenis Sudintas

Taikinio su nematomais intarpais sekimo tyrimas

Magistro darbas

Vadovas: prof. Habil. Dr. V. Laurutis

Šiauliai, 2012

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

Elektronikos katedra

TVIRTINU

Katedros vedėjas

prof. dr. G. Daunys

2012 06

Taikinio su nematomais intarpais sekimo tyrimas

Magistro darbas

Recenzentas

ŠU Technologijos fakulteto
Elektronikos katedros
prof. dr. V. Lauruška
2012 m. birželio d.

Vadovas

ŠU Technologijos fakulteto
Elektronikos katedros
prof. habil. dr. V. Laurutis
2012 m. birželio d.

Atliko

ŠU Technologijos fakulteto
RM-10 grupės studentas
Gytenis Sudintas
2012 m. birželio d.

Šiauliai, 2012

Sudintas G., Investigation of Target with Invisible Inclusions Tracking / scientific leader Prof. Hab. Dr. V. Laurutis; Šiauliai University, Technological Faculty, Electronics Engineering Department, – Šiauliai, 2012. – 60 p.

SUMMARY

In the complex situations, targets in motion are often occluded by other objects. When the retinal information cannot be obtained only prediction of object motion permits tracking the target and overcoming occlusions in its trajectory. It has already been researched that oculomotor system allows us to predict both position and velocity of occluded target for several tens of milliseconds. When this period of time elapses the eye velocity begins exponentially decaying to zero when the target is not anticipated to emerge or it reaches a plateau value, when it is expected to re-emerge.

There has been a lot of work researching predictive mechanisms driving smooth pursuit and saccadic response during target occlusions. These studies exercised one-dimensional and two-dimensional predictable target trajectories. It was revealed that pre-occlusion target velocity information determines plateau value to which eye velocity decays. The post-occlusion information shows that eye velocity at target reappearance is only influenced by anticipated target velocity. In order to minimize the influence of pre- and post-occlusion target velocity information; evenly accelerated motion, or random durations of the blanking periods were exercised in further research; only predictable target trajectories were exercised. It has been proposed that tracking of both visible and invisible predictable targets has the influence of dynamic internal representation of target motion in short-term memory.

The object motion anticipation permits overcoming of object occlusions in its trajectory. This research exercises non-predictable target trajectory with occlusions of 500 and 1000 ms. The LC Technologies EyeGaze System was used for recording eyesight position that reports gaze points of both eyes at 60 Hz each and stores the data in computer for analysing offline. The research revealed that for a period shorter than 200 ms after target occlusion, oculomotor system is driven by a short-term memory of the pre-occlusion target motion trajectory. Therefore the conclusion can be made that when visual system no longer has the ability to predict location of occluded target, there is a tendency to shift gaze away from previous target location, analogically, away from the screen edges. It can be proposed that this happens due to probability, which is collected in a long-term memory and provides the expectation that the target should reappear near the centre of the screen. Such behavior supports basic principles of Bayesian decision theory.

TURINYS

IVADAS.....	8
1. 1 Darbo aktualumas	8
1. 2 Tyrimo tikslas ir uždaviniai	8
1. 3 Naujumas	9
1. 4 Praktinė darbo vertė	9
1. 5 Tyrimų objektas	9
1. 6 Darbo struktūra ir apimtis	10
2. TAIKINIO SEKIMO ŽVILGSNIU SAVYBĖS.....	11
2. 1 Akies anatomija	11
2. 2 Sekamieji akių judesiai	13
2. 3 Sekamųjų akių judesių valdymo modelių apžvalga taikiniui judant tolydine trajektorija	14
2. 4 Akių judesių kontrolės sistemos gebėjimas prognozuoti taikinio trajektoriją	20
2. 5 Taikinio, judančio trajektorija su nematomais intarpais, tyrimų apžvalga	23
3. TYRIMO STENDO LABORATORINĖ ĮRANGA BEI EKSPERIMENTO VALDYMO IR REZULTATŲ APDOROJIMO PROGRAMA.....	31
3. 1 Akių judesių matavimo metodai ir laboratorinė įranga	31
3. 2 Programinė įranga.....	36
4. TAIKINIO, JUDANČIO NENUSPĖJAMA TRAJEKTORIJA SU NEMATOM AIS INTARPAIS, SEKIMO ŽVILGSNIU TYRIMO REZULTATAI.....	37
4. 1 Tyrimo koncepcija	37
4. 2 Eksperimentinių tyrimų metodika	37
4. 3 Eksperimentinių tyrimų rezultatai	39
5. APIBENDRINIMAS IR IŠVADOS	57
LITERATŪRA.....	59

PAVEIKSLĖLIAI

1 pav.	Skersinis akies pjūvis	11
2 pav.	Akies raumenų struktūra	12
3 pav.	Akies kūgių ir lazdelių receptorių tankio išsidėstymas	12
4 pav.	Akies sakadų diagramos pavyzdys.....	13
5 pav.	Tolydaus sekimo diagramos pavyzdys.....	14
6 pav.	Paprastas akių sekamųjų judesių kontrolės modelis	14
7 pav.	Paprasto akių sekamųjų judesių kontrolės modelio taikino ir akies greičio diagramos	15
8 pav.	ASJ modelis su lygiagrečiu greičio kanalu	16
9 pav.	ASJ su lygiagrečiu greičio kanalu kontrolės modelio taikino ir akies greičio diagramos.....	16
10 pav.	Grafikas, iliustruojantis akies raumens įsitempimą sakadų metu.....	17
11 pav.	Schemoje atvaizduojama, kaip panaudojant mikropipetę gaunama vieno neurono veikla, naudojant sakadas.. ..	17
12 pav.	Agonistinio ir antagonistinio akies raumenų kontroliuojami signalai – raudonos linijos..	18
13 pav.	Bahill modelis su taikinio sekimo valdikliu	19
14 pav.	Akies greičio ir trajektorijos kitimas laiko atžvilgiu	20
15 pav.	Akies ir taikinio pozicijos, greičio grafikai	21
16 pav.	Taikinio padėtis ir greitis laiko atžvilgiu.....	21
17 pav.	Akies ir taikinio pozicijos, greičio grafikai	22
18 pav.	Pagreičio įtaka taikinio sekimui	22
19 pav.	Taikinio ir akies judesio trajektorijos, gautos tiriamajam sekant apskritimu.....	23
20 pav.	Taikinio ir akies judėjimo greičių modulių V_a ir V_t santykio priklausomybė nuo taikinio judėjimo apskritimui.	24
21 pav.	Pasivejančių akių šuolių pavyzdys laiko atžvilgiu	25
22 pav.	Dalis trajektorijos, kuri naudota pasivejančių sakadų tyrime.....	26
23 pav.	Akies ir taikinio judėjimo trajektorijos, akies paklaidos grafikas, akies judėjimo greitis .	26
24 pav.	Santykis tarp pikinio sakadų greičio ir trumpalaikio taikinio greičio	27
25 pav.	Dviejų etapų akių sakados. Mažesni taškų susikaupimai iliustruoja pirmines sakdas ir didesni – korekcines sakadas.	28
26 pav.	Taikinio judėjimas XY ašyse ir XY ašių padėčių pozicija laiko atžvilgiu.....	29

27 pav.	Tipinis pavyzdys, kaip žmogaus okulomotorinė sistema reaguoja taikiniui judant apskritimu ir jam išnykus.	30
28 pav.	Sistemos techninės įrangos konstrukcija.....	32
29 pav.	Kameros fiksuojami, sumažintas ir padidintas, vaizdai	33
30 pav.	Kalibravimo vaizdas ekrane	33
31 pav.	PCCR metodo optika.....	34
32 pav.	Atvaizduota darbe naudojama taikinio trajektorija.	36
33 pav.	Atvaizduota darbe naudojama taikinio trajektorija su rodyklėmis.....	38
34 pav.	Atvaizduotos akies sekimo trajektorijos ir taikinio išnykimo vietos, greitis 10 laipsn/s ...	39
35 pav.	Atvaizduotos akies sekimo trajektorijos ir taikinio išnykimo vietos, greitis 20 laipsn/s ...	40
36 pav.	Aukščiau pateiktuose grafikuose A ir B atvaizduota dešimties tiriamųjų akies sekimo trajektorijos ir taikinio išnykimo vieta. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s.	41
37 pav.	Aukščiau pateiktuose grafikuose A ir B atvaizduota dešimties tiriamųjų akies sekimo trajektorijos ir taikinio išnykimo vieta. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s	42
38 pav.	Nefiltruotas akies greičio signalas. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s.....	43
39 pav.	Filtruotas akies greičio signalas – raudona linija. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s ...	43
40 pav.	Atvaizduotos akies sekimo greičio ir padėčių grafikai, sekant išnykusį taikinį. Judėjimo greitis 10 laipsn/s	44
41 pav.	Atvaizduotos akies sekimo greičio ir padėčių grafikai, sekant išnykusį taikinį. Judėjimo greitis 10 laipsn/s	45
42 pav.	Nefiltruotas akies greičio signalas. Taikinio judėjimo greitis – 20 laipsn/s.....	46
43 pav.	Filtruotas akies greičio signalas – raudona linija. Taikinio judėjimo greitis – 20 laipsn/s.	46
44 pav.	Atvaizduotos akies sekimo greičio ir padėčių grafikai, sekant išnykusį taikinį. Judėjimo greitis 20 laipsn/s	47
45 pav.	Atvaizduotos akies sekimo greičio ir padėčių grafikai, sekant išnykusį taikinį. Judėjimo greitis 20 laipsn/s	48
46 pav.	Taikinio judėjimo trajektorija. Taikinio išnykimai sužymėti numeriais pagal eiliškumą. .	49
47 pav.	Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal X, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s.....	49
48 pav.	Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal Y, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios. Taikinio judėjimo greitis 20 laipsn/s.....	50
49 pav.	Standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Judėjimo greitis 10 laipsn/s.	50
50 pav.	Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal X, prieš taikinio išnykimą.	51

51 pav.	Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal Y, prieš taikinio išnykimą.	51
52 pav.	Standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Judėjimo greitis 10 laipsn/s	52
53 pav.	Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal X, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios. Taikinio judėjimo greitis 20 laipsn/s.....	52
54 pav.	Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal Y, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios. Taikinio judėjimo greitis 20 laipsn/s.....	53
55 pav.	Standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Judėjimo greitis 20 laipsn/s	53
56 pav.	Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal X, prieš taikinio išnykimą.	54
57 pav.	Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal Y, prieš taikinio išnykimą.	54
58 pav.	Standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Judėjimo greitis 20 laipsn/s	55

IVADAS

1.1 Darbo aktualumas

Šiame darbe nagrinėjama viena iš žmogaus komunikacijos priemonių – regėjimas. Daugumai žmonių rega yra pats svarbiausias iš penkių „specialiųjų jutimų“. Regos sistema yra pagrindinė sensorinė sistema. Rega teikia mums itin daug žinių apie mus supantį aplinkinį pasaulį. Iš akių einančių signalų sukurtas vaizdas padeda mums judėti, o taip pat ir bendrauti. Vien tik žiūrėdami į daiktą, mes galime spręsti apie jo dydį ir tekstūrą, spalvą, atstumą. Apie 70 proc. kūno jutimo receptorių susitelkę akyse. Jie perduoda informaciją į galvos smegenis, o šios ją analizuoja. Tai, ką mes matome, priklauso nuo mūsų asmeninės perspektyvos. Nėra dviejų žmonių, matančių vienodai.

Šiame magistro darbe pagrindinis dėmesys kreipiamas į žmogaus gebėjimą nuspėti judančio taikinio neprognozuojama trajektorija jam išnykus. Darbe esantys eksperimentiniai tyrimai atlikti Šiaulių universiteto biomedicininės inžinerijos mokslinio centro laboratorijoje. Tai fundamentalūs neurofiziologiniai tyrimai, kurie padeda atskleisti žmogaus okulomotorinės sistemos veiklą. Gauti atliktų eksperimentinių bandymų rezultatai ir išvados gali būti pritaikomos kuriant pažangias naujausias technologijas, tokias kaip robotika, žvilgsniu valdomos sistemos.

1.2 Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Tikslas:

Ištirti sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos savybes tuo metu, kai sekamas taikiny pradingsa, bei nustatyti sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos kiekybines charakteristikas ekstrapoliuojant taikinio trajektoriją.

Uždaviniai:

1. Susipažinti su kitų autorių atliktais sekimo akių judesių kontrolės sistemos tyrimais.
2. Įsisavinti “Eye Gaze” akių judesių trajektorijos sekimo įtaiso veikimo parametrus, programinę įrangą.
3. Kompiuterio ekrane sukurti nenuspėjama taikinio trajektoriją su skirtingais taikinio judėjimo greičiais ir nevienodomis nematomų intarpų trukmėmis.
4. Atlikti eksperimentinius tyrimus ir iš gautų duomenų nustatyti kiekybines akių judesių sistemos charakteristikas, tuo metu, kai taikiny tampa nematomas.

1.3 Naujumas

Iki šiol akies žvilgsnio sekimui su išnykstančiais taikiniais eksperimentiniuose tyrimuose buvo naudojama nuspėjama trajektorija (apsikritimas). Darbe pristatomi nauji eksperimentiniai tyrimai ir jų kiekybinės charakteristikos, kai taikinys juda nenuspėjama trajektorija. Pasirinktos skirtingos taikinio išnykimo vietos taip, jog būtų galima iširti, kaip juda taikinys skirtingomis trajektorijomis. Taikinio išnykimo laikai pasirinkti 500 ms ir 1000 ms. Judėjimo vidutinis greitis 10 laipsn/s ir 20 laipsn/s. Eksperimentams pasirinkta sistema „LC Technologies the eyegaze development system“. Ši sistema veikia ragenos atšvaito – vyzdžio centro principu.

1.4 Praktinė darbo vertė

Magistrantūros studijų metu buvo sukurta kompiuterio ekrane nenuspėjama taikinio trajektorija su skirtingais taikinio judėjimo greičiais ir nevienodomis nematomų intarpų trukmėmis. Susipažinta ir iširta kitų autorių atliktais sekimo akių judesių kontrolės sistemos tyrimais. Įsisavinta „Eye Gaze“ akių judesių trajektorijos sekimo įtaiso veikimo parametrai, programinė įranga. Atlikti eksperimentiniai tyrimai ir iš gautų duomenų nustatytos kiekybinės akių judesių sistemos charakteristikos tuo metu, kai taikinys tampa nematomas. Nauji eksperimentiniai tyrimai gali būti taikomi žmogaus neurofiziologiniams tyrimams, žvilgsniu valdomoms sistemoms, robotikoje..

1.5 Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos savybės tuo metu, kai sekamas taikinys pradingsta. Aparatūrinė sistemos dalis apima laboratorijos įrangos „LC Technologies the eyegaze development system“ vaizdo kameras ir kompiuterio ekraną, kuriame bus rodomas judantis taikinys. Programinėje dalyje sukurta nenuspėjama taikinio trajektorija ir atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatai išsaugoti failuose su galūne *.erf, kurie vėliau bus programuojant apdorojami. Įvertinta vaizduoklio rezoliucija, kuriuo buvo atliekami tyrimai – 1280*1024, tiriamasis sėdėjo 70 cm atstumu nuo ekrano. Sistema pateikia rezultatus 60 Hz dažniu. Žmogaus okulomotorinė sistema judant objektui leidžia numatyti sekamo objekto trajektoriją jam pranykus. Prieš pradėdant šiuos žmogaus akies (žvilgsnio) eksperimentinius tyrimus, kurie parodo gebėjimą nuspėti taikinio trajektoriją, yra sudėtingas uždavinys, kurio sprendime turi būti įvertinta:

- Techninės įrangos parametrai;
- Nenuspėjamos trajektorijos ir taikinio išnykimo vietų projektavimas;
- Taikinio judėjimo greičio įtakos žvilgsnio sekimui įvertinimas.

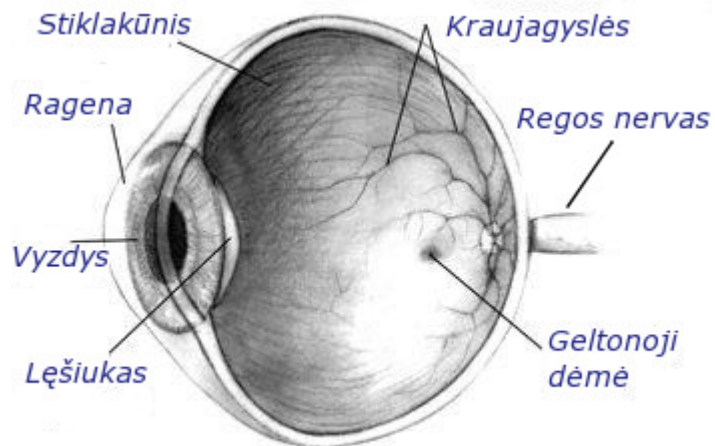
1.6 Darbo struktūra ir apimtis

Magistro darbą sudaro: įvadas, trys pagrindiniai skyriai, apibendrinimas ir diskusijos, literatūros sąrašas. Bendra darbo apimtis: 60 puslapių, įskaitant 58 paveikslėlius. Literatūros sąraše nurodyta 18 šaltinių.

2. TAIKINIO SEKIMO ŽVILGSNIU SAVYBĖS

2.1 Akies anatomija

Akis veikia panašiai kaip fotoaparatas. Priekyje skaidrus langelis – ragena. Ji surenka ir laužia šviesos spindulius, atsispindėjusius nuo visko, kas yra mūsų akiplotyje. Už ragenos esantis skaidrus elastingas lęšiukas automatiškai pritaiko savo formą, kad tiksliai sufokusuotų šviesos spindulius. Viduje spinduliai susikryžiuoja ir sklinda į užpakalinę akies dalį, kur šviesos sukurtas apverstas vaizdas surenkamas plėvelėje, vadinamoje tinklaine. Tinklaineje yra daugiau kaip 126 milijonai nervinių ląstelių. Jos visos jautrios šviesai, o kai kurios skiria spalvas. Šios ląstelės akimirksniu reaguoja į šviesą. Vaizdas tinklaineje paverčiamas nerviniais impulsais. Nervų takais, einančiais iš regos nervo, impulsai greitai perduodami į galvos smegenis [1]. Regos suvokimo centrai smegenyse suteikia prasmę šviesos bei spalvų pranešimams ir leidžia mums teisingai matyti apverstą vaizdą. 1 paveiksle pavaizduotas skersinis akies pjūvis [3].



1 pav. Skersinis akies pjūvis

Stiklakūnis palaiko akies obuolio sferinę formą, taip pat padeda palaikyti tinklainę. Nepaisant to, kad akies obuolys yra baltos spalvos, jis daugiausiai sudarytas iš vandens (99 %).

Lęšiukas suformuoja vaizdą lauždamas šviesos spindulius. Akies lęšiukas sudarytas iš skaidraus baltymo. Žiedo pavidalo krumplyno raumuo, keičiantis lęšiuko formą, leidžia matyti ir artimus ir tolimus daiktus. Šie lęšiuko pokyčiai vadinami akomodacija. Lęšiuko tinklaineje sufokusuotas vaizdas yra apverstas.

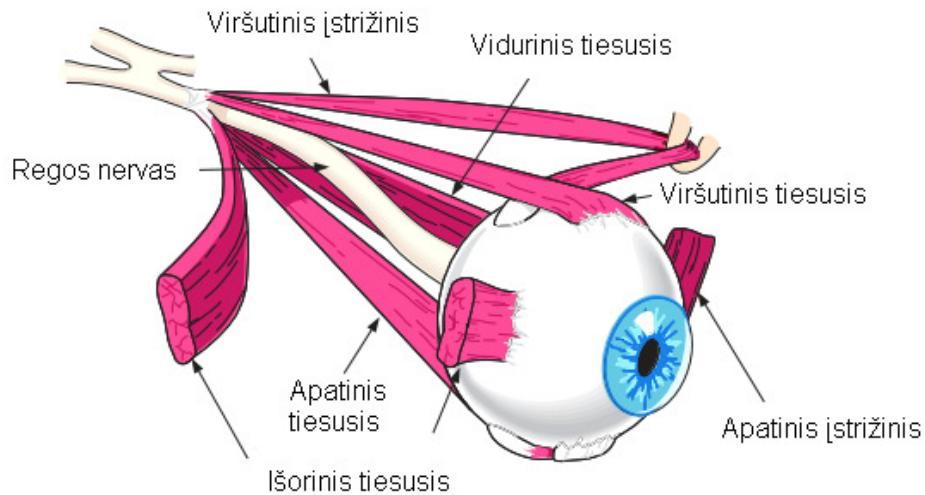
Ragna – skaidrus sluoksnis akies obuolio priekyje. Ragna saugo akies priekį ir padeda fokusuoti šviesą. Ji laužia šviesos spindulius. Ragna – tai labiausiai išgaubta į priekį skaidri skaidulinio dangalo dalis. Į ją pirmiausia patenka šviesos spindulys.

Vyzdys į akį praleidžia šviesą.

Geltonoji dėmė – akies tinklainės dalis, kurioje yra daugiausiai receptorių, kurie atsakingi už regėjimo aštrumą. Jos skersmuo apie 2 mm. Geltonoji dėmė optiškai nesutampa su akies optine ašimi.

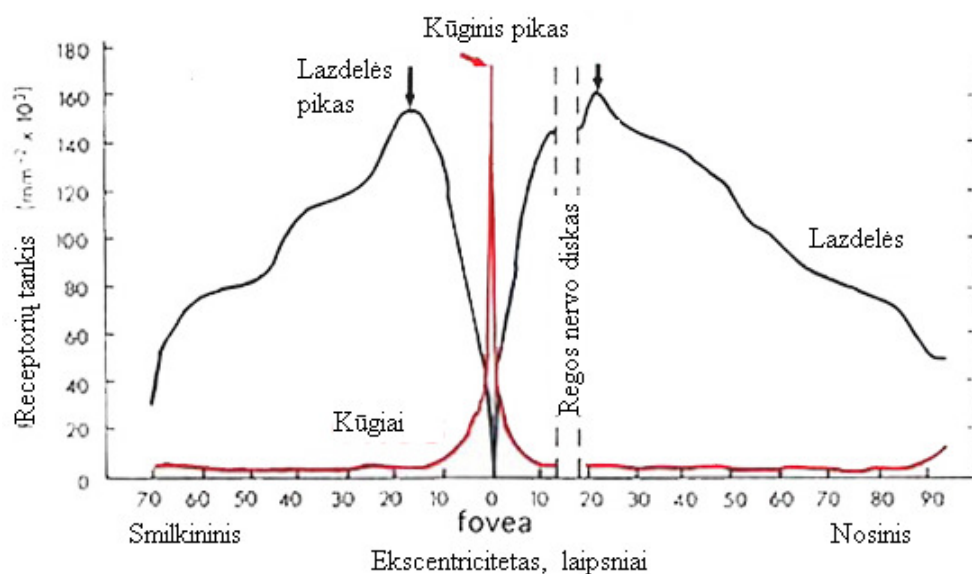
Regos nervas perduoda nervinius impulsus į smegenis. Tinklainės lazdelės ir kolbelės jungiasi su kitomis tinklainės nervinėmis ląstelėmis, kurių aksonai susijungia ir sudaro regos nervą.

2 paveiksle pavaizduota akies raumenų struktūra. Akį judinantys raumenys randasi akies obuolio išorėje ir jų yra 6 kiekvienoje akyje: vidinis, išorinis, viršutinis ir apatinis tiesieji akį judinantys raumenys, viršutinis ir apatinis įstrižieji akį judinantys raumenys [18].



2 pav. Akies raumenų struktūra

Žmogus turi centrinį ir periferinį matymus. Periferinį matymą formuoja visa žmogaus tinklainė, centrinį – fovea. Apatiniame paveiksle (žr. 3 pav.) matome akies tinklainėje esančių lazdelių (juoda linija) ir kūgių (raudona linija) receptorių išsidėstymo tankį pateiktą $\text{mm}^{-2} \cdot 10^3$. Lazdelės žmogui padeda omatyti prieblandoje, kur yra blogas apšvietimas arba jo išvis nėra (t.y. – juodai balta vaizdas). Kūgių receptoriai labai tankiai yra išsidėstę fovea dalyje, tinklainės dalyje, kur vaizdas lęšiuke fokusuojamas ryškiausiai. Žmogaus periferinis matymas yra pilkas (angl. *greyscale*), tačiau kai sufokusuotas vaizdas atsiduria fovea lauko dalyje, vaizdas vėl tampa spalvotas [4].

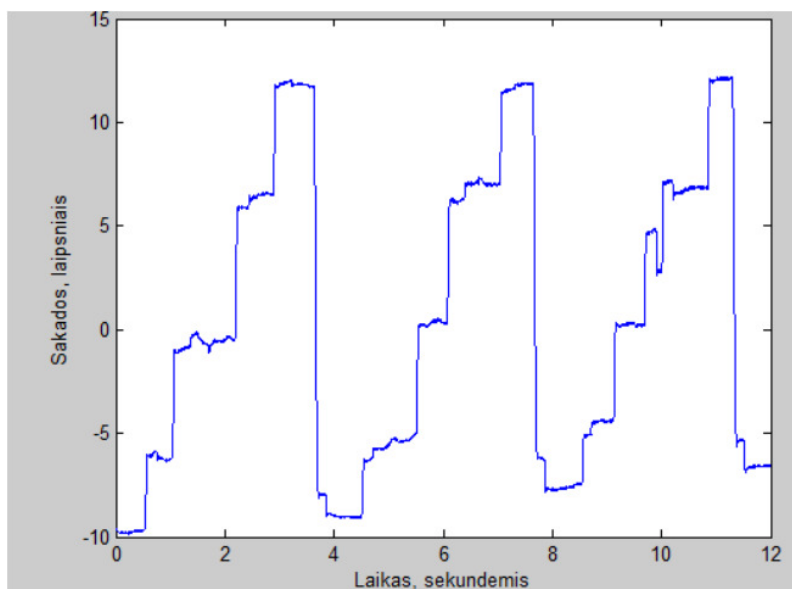


3 pav. Akies kūgių ir lazdelių receptorių tankio išsidėstymas

2.2 Sekamieji akių judesiai

Akių judesių valdymo sistema yra viena iš nuodugniausiai ištirtų žmogaus biomechaninių judesių kontrolės sistemų. Tai paaiškinama tuo, kad akies obuolio judesys yra apibrėžiamas tikrai dviem laisvumo laipsniais – kampiniais posūkiomis apie horizontaliąją ir vertikaliąją ašis. Akies obuolio posūkis apie regėjimo ašį – trečiasis laisvės laipsnis – yra nedidelis ir nusakant žmogaus žiūrėjimo kryptį didesnės įtakos neturi. Akių judesiai skirstomi į kelias klases: tolydųjį sekimą, sakadas, vergentinius, optokinetinius ir vestibularinius judesius. Sakadiniai judesiai – greiti, skirti staigiam fiksacijos taško pakeitimui. Judantiems elementams tinka lėtas ir tolydusis sekimas. Vergentiniai judesiai – tai judesiai, kuriems esant bendras abiejų akių žvilgsnio nukreipimas išlieka tas pats, o kampas tarp regėjimo linijų kinta. Šie judesiai leidžia nukreipti žvilgsnį į objektus, kurie yra arčiau ir toliau nuo akies. Vestibulariniai judesiai apsprendžia suderintą abiejų akių pasukimą tuo pačiu kampu. Šie judesiai reikalingi nukreipiant žvilgsnį į objektus, kurie yra tuo pačiu atstumu nuo akies. Optokinetiniai judesiai stabilizuoja akis išorinio pasaulio atžvilgiu, kompensuodami fono ar galvos judesius.

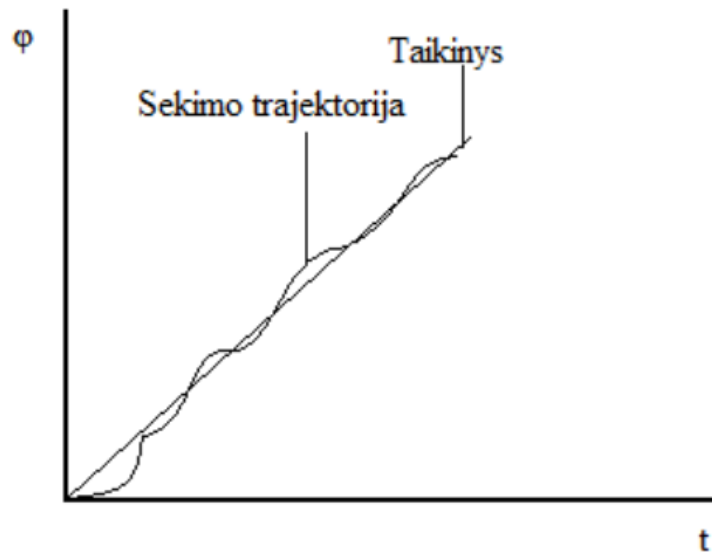
Atliekamas tyrimas remiasi akių sakadomis ir tolydžiu sekimu, todėl šių judesių savybės bus nagrinėjamos plačiau. Sakados, arba dar kitaip vadinamieji akių šuoliukai, padeda akims greitai judėti nuo vieno apžiūros objekto prie kito. Šie akių judesiai yra labai dažni ir formuojami taip, jog stebimas objektas kuo greičiau būtų sufokusuotas į jautriausią akies sritį – geltonąją dėmę – ir regos sistema galėtų juos atpažinti. Sakadinių akių judesių greitis yra didelis, apie 10° per 50 ms. Sakados priklausomybė nuo jos greičio yra pagrindinė šių akies judesių charakteristika, skirianti akių judesius nuo rankų, galvos ar kitų judesių. Akies daromų sakadų charakteristika pateikta 4 paveiksle.



4 pav. Akies sakadų diagramos pavyzdys

Tolydus sekimas – tai lėtas akių judėjimas sekant objektą ir stengiantis jį išlaikyti jautriausioje akies srityje. Atvirkščiai nei akių sakados, tolydžiojo sekimo metu vaizdas visada išlieka ryškus. Prireikia 100 – 200 ms vėlinimo, kol akys pradeda tolydžiai sekti taikinį. Dažnai tolydus

sekimas įtraukia sakadas, kurios padeda išlaikyti sekamą vaizdą jautriausioje regos dalyje. Pastebėta, kad dėl nuspėjamos sekamo taikinio trajektorijos, tolydaus sekimo greitis didėja. Nustatyta, jog žmogui komfortiškiausias tolydus sekimas, kai taikinas juda lėtai, < 1 Hz greičiu, ir judėjimo amplitudė $< \pm 5^\circ$. 5 paveiksle pavaizduotas tolydaus sekimo pavyzdys [10].



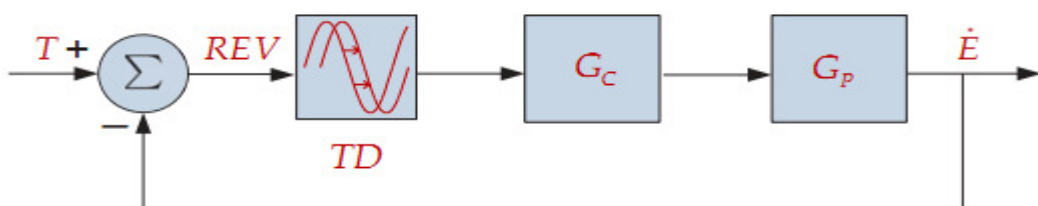
5 pav. Tolydaus sekimo diagramos pavyzdys

2.3 Sekamųjų akių judesių valdymo modelių apžvalga taikiniui judant tolydine trajektorija

Tolydaus sekimo vienakoordinatiniai modeliai

Pirmasis tolydaus sekimo modelis buvo sukurtas ir publikuojamas Young ir Stark 1963 metais. Sukurtame modelyje įvesties signalas – taikinio trajektorija, išvesties – akies trajektorija. Per keliasdešimtį metų buvo sukurta daugelis akių sekamųjų judesių kontrolės modelių, keletas pagrindinių analizuojami žemiau [5].

Paprastas akių sekamųjų judesių (toliau darbe – ASJ) kontrolės modelis pavaizduotas 6 paveiksle. Atsižvelgiant į tolydaus sekimo modelį (žr. 6 pav.), įvesties signalas – taikinio greitis T , išvesties signalas – akies greitis \dot{E} . Toliau seka laiko užlaikymo blokas TD , valdiklis G_C ir okuliarinė sistema (akies obuolys su savo raumenimis) G_P . Grįžtamojo ryšio elementas yra 1. Modelyje naudojama tinklainės greičio paklaidos formulė: $REV = T - \dot{E}$.



6 pav. Paprastas akių sekamųjų judesių kontrolės modelis

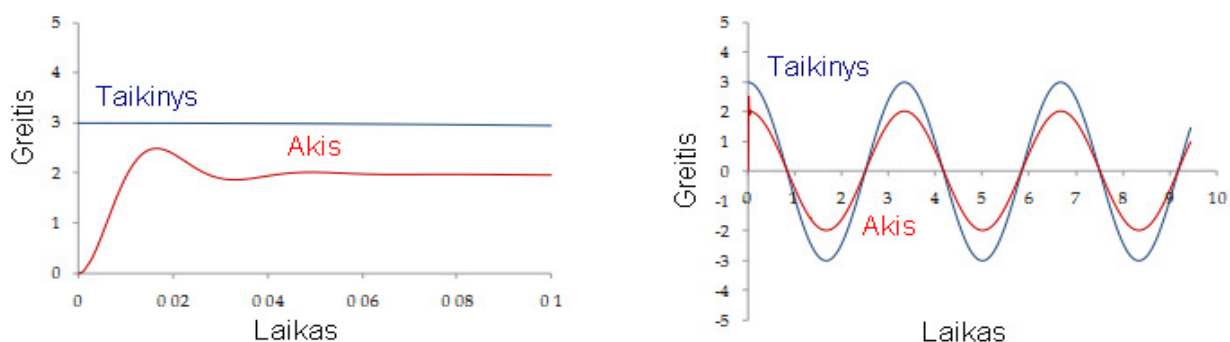
Pateikiama sistemos grįžtamojo ryšio formulė (1):

$$G_{CL} = \frac{\dot{E}}{T} = \frac{G_C G_P}{1 + G_C G_P} . \quad (1)$$

Kai šiame modelyje naudojamos tinklainės greičio paklaida progresyviai ima mažėti ir pasiekia minimumą, paklaidos formulė keičiama į šią:

$$REV = \frac{1}{1 + G_C G_P} T . \quad (2)$$

Suprojektavus modelį programa MATLAB SIMULINK, gaunamos tokios taikinio ir akies greičių diagramos (žr. 7 pav.) [5].



7 pav. Paprasto akių sekamųjų judesių kontrolės modelio taikinio ir akies greičio diagramos

ASJ modelis su lygiagrečiu greičio kanalu pateiktas 8 paveiksle. Naudojami signalai modelyje: taikinio greitis T , valdiklis (smegenėlės) G_C , greičio trikdys T_1 , sekimo trajektorija $1/s$, okuliarinė sistema (akies obuolys su savo raumenimis) G_P ir akies greitis \dot{E} . Modelyje naudojama tinklainės greičio paklaidos formulė: $REV = T - \dot{E}$, [5].

Okuliarinės sistemos formulė (3):

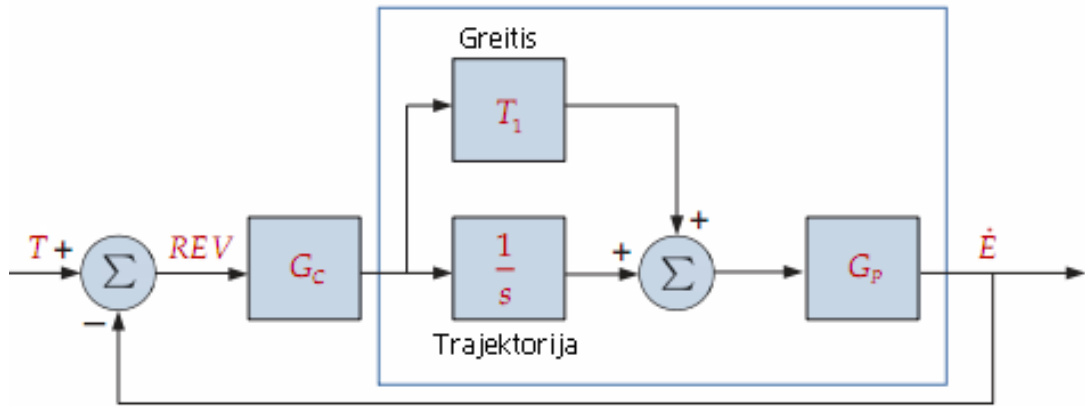
$$G_P = \frac{1}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} \quad (3)$$

Akies greitis surandamas pagal šią formulę (4):

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \frac{\left(T_1 + \frac{1}{s}\right)}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} (REV \times G_C) \\ &= \frac{(sT_1 + 1)}{s} \frac{1}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} (REV \times G_C) \\ &= \frac{1}{s(sT_2 + 1)} (REV \times G_C) . \end{aligned} \quad (4)$$

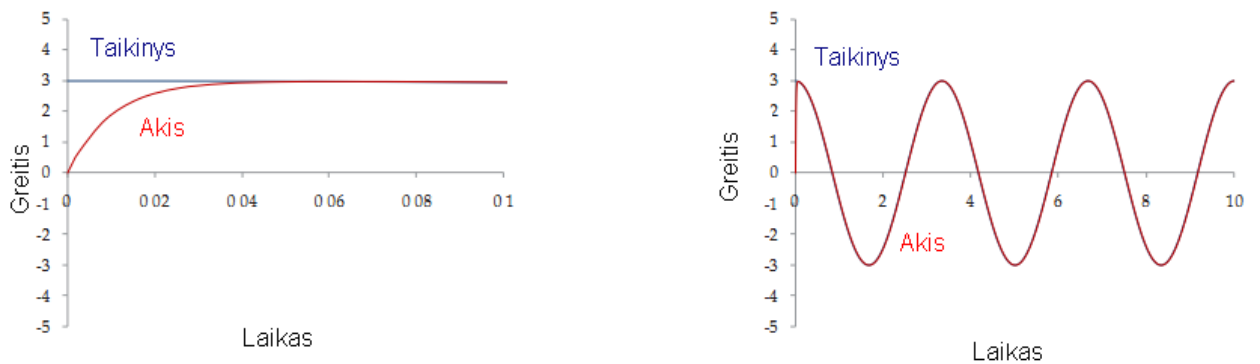
Taigi sprendžiant iš įrodymo, galima teigti, jog akies greitis \dot{E} , prilygsta tinklainės greičio paklaidos formulės REV , valdiklio G_C ir sekimo trajektorijos $1/s$ sandaugoms (5):

$$\dot{E} \approx \left(\frac{1}{s}\right) (REV \times G_C) \quad (5)$$



8 pav. ASJ modelis su lygiagrečiu greičio kanalu

Suprojektavus modelį programa MATLAB SIMULINK, gaunamos tokios taikinio ir akies greičių diagramos (žr. 9 pav.) [5].

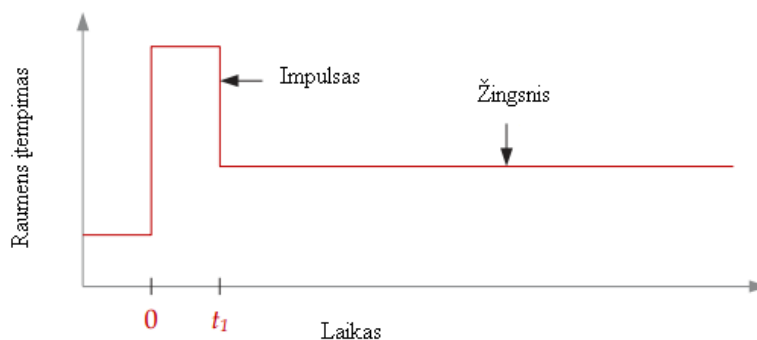


9 pav. ASJ su lygiagrečiu greičio kanalu kontrolės modelio taikino ir akies greičio diagramos

Akių šuolių (sakadų) vienkoordinatiniai valdymo modeliai

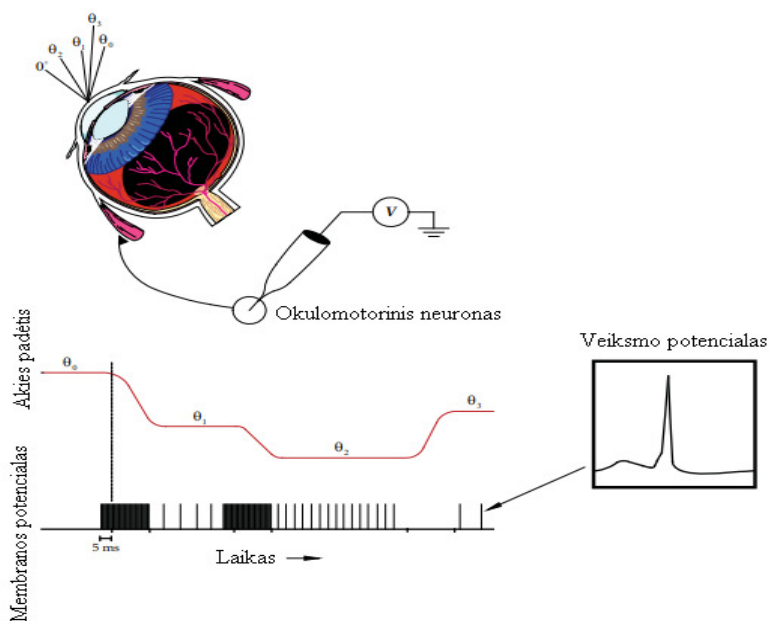
Vienas iš pirmųjų iššūkių fiziologinių sistemų modeliavime buvo duomenų ar informacijos apie įvestį į sistemą trūkumas, pavyzdžiui, greitoje akių judėjimo sistemoje įvestis yra neurologinis signalas nuo centrinės nervų sistemos (CNS) į raumenis, prijungtus prie akies obuolio.

1964 metais tyrėjas Robinsonas pirmasis atliko bandymus matuojant įvestį į akies obuolį per akies šuolius (žr. 10 pav.). Kad įrašytų norimą įvestį, vienoje akyje buvo įdėtas kontaktinis lęšis, per kurį ir buvo paduodama įvestis. Kadangi tas pats signalas nusiunčiamas į abi akis per sakadas, Robinsonas padarė išvadą, kad įvestis, įrašyta per kontaktinį lęšį, pridėtą prie akies obuolio, buvo ta pati įvestis, kuri nurodo kitos akies šuolius [5].



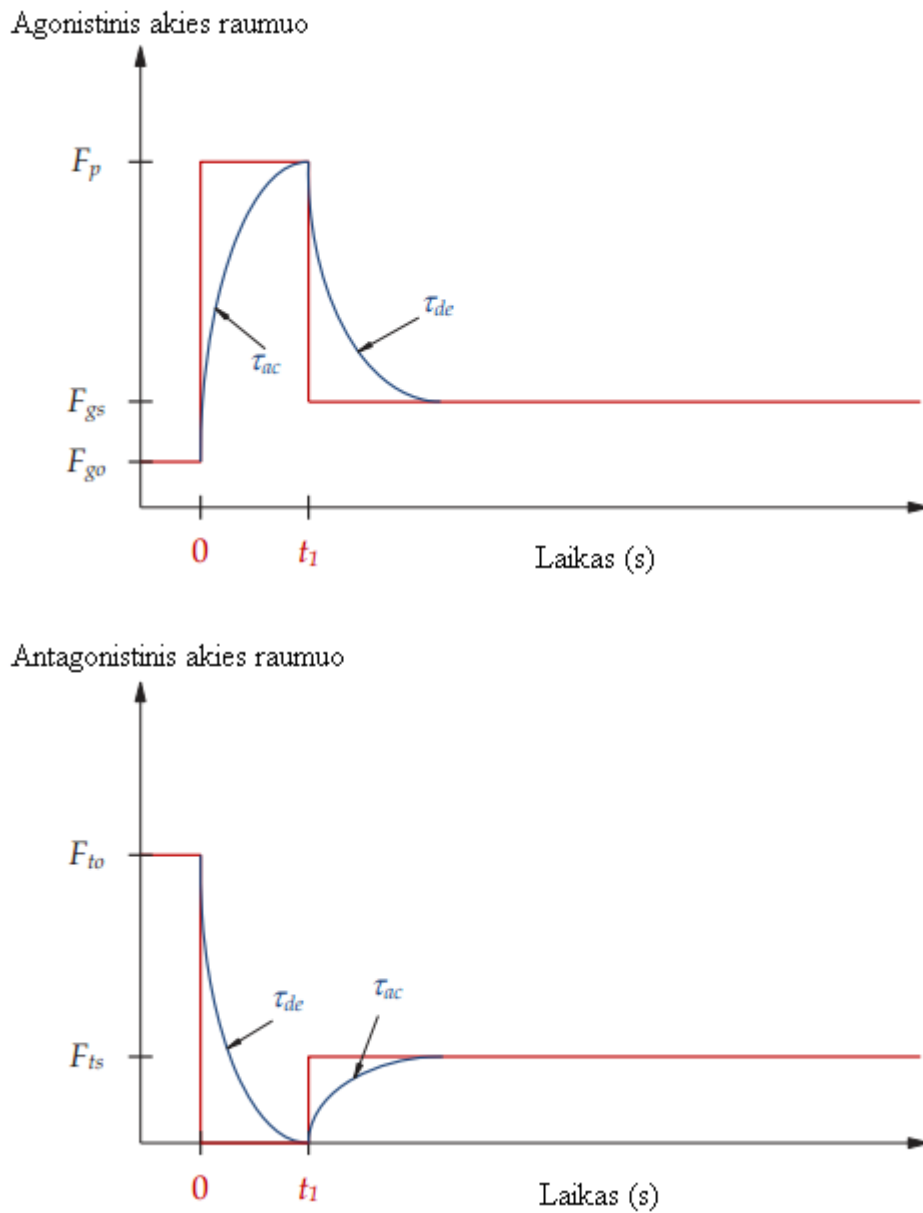
10 pav. Grafikas, iliustruojantis akies raumens įsitemimą sakadų metu

Dabartiniuose tyrimuose, atliekamuose su beždžionėmis, kontaktinis akies lęšis nebenaudojamas, dažniausiai atliekami tyrimai mikroelektrodų pagalba, kurie fiksuoja elektros impulsus okulomotorinėje sistemoje (žr. 11 pav.).



11 pav. Schemoje atvaizduojama, kaip panaudojant mikropipetę gaunama vieno neurono veikla, naudojant sakadas. Membrana rodo veikimo potencialus – sakadas. Neuronų apšaudymas prasideda vidutiniškai 5ms prieš akies judėjimo pradžią. θ_0 - θ_3 rodo akies padėtį.

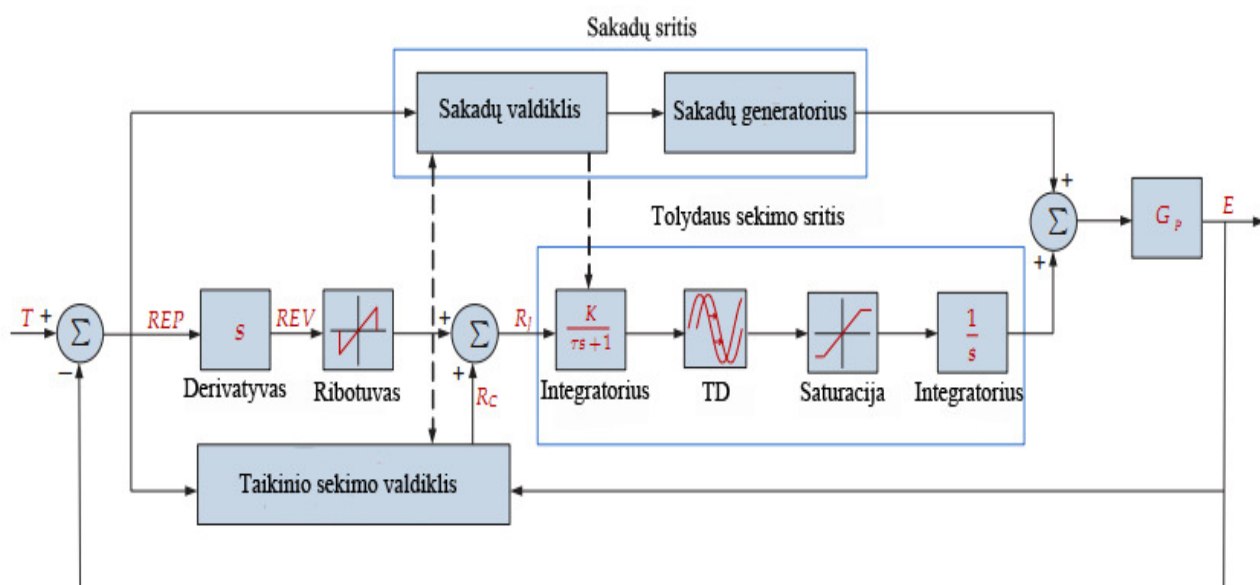
11 ir 12 paveikslai aiškina, kai akis žiūri tiesiai dažnis yra 100 Hz, tačiau kai juda į vieną ar kitą puses dažnis keičiasi ir būna ~ 50 Hz. Tačiau šuolio metu atsiranda papildoma greičio įtaka τ_{ac} τ_{de} , kam daro įtaką du akies raumenys – agonistinis ir antagonistinis [5] [17].



12 pav. Agonistinio ir antagonistinio akies raumenų kontroliuojami signalai – raudonos linijos. Mėlynos linijos – aktyvios būsenos įtampa. T_{de} ir T_{ac} – laiko konstantos.

Bendras tolydaus sekimo ir akių šuolių valdymo modelis. Bahill modelis (1983)

Šis modelis (žr. 13 pav.) turi tokius pat įėjimo (taikinio greitis) ir išėjimo (akies greitis) signalus kaip ir pastarieji modeliai. Jis skyrėsi tuo, jog turėjo sujungtas tolydžiojo sekimo ir sakadų sritis į vieną modelį. Naudojami signalai modelyje: taikinio greitis – T , okuliarinė sistema (akies obuolys su savo raumenimis) – G_P , derivatyvas – S , sakadų valdiklio, sakadų generatoriaus, taikinio sekimo valdiklio, kuris padeda sumažinti laikinį vėlavimą sekant taikinį, du integratoriai, laikinis vėlinimas – TD , akies greitis – \dot{E} , saturacija, tinklainės greičio paklaidos formulė REV ir tinklainės padėties paklaidos formulė REP [5].

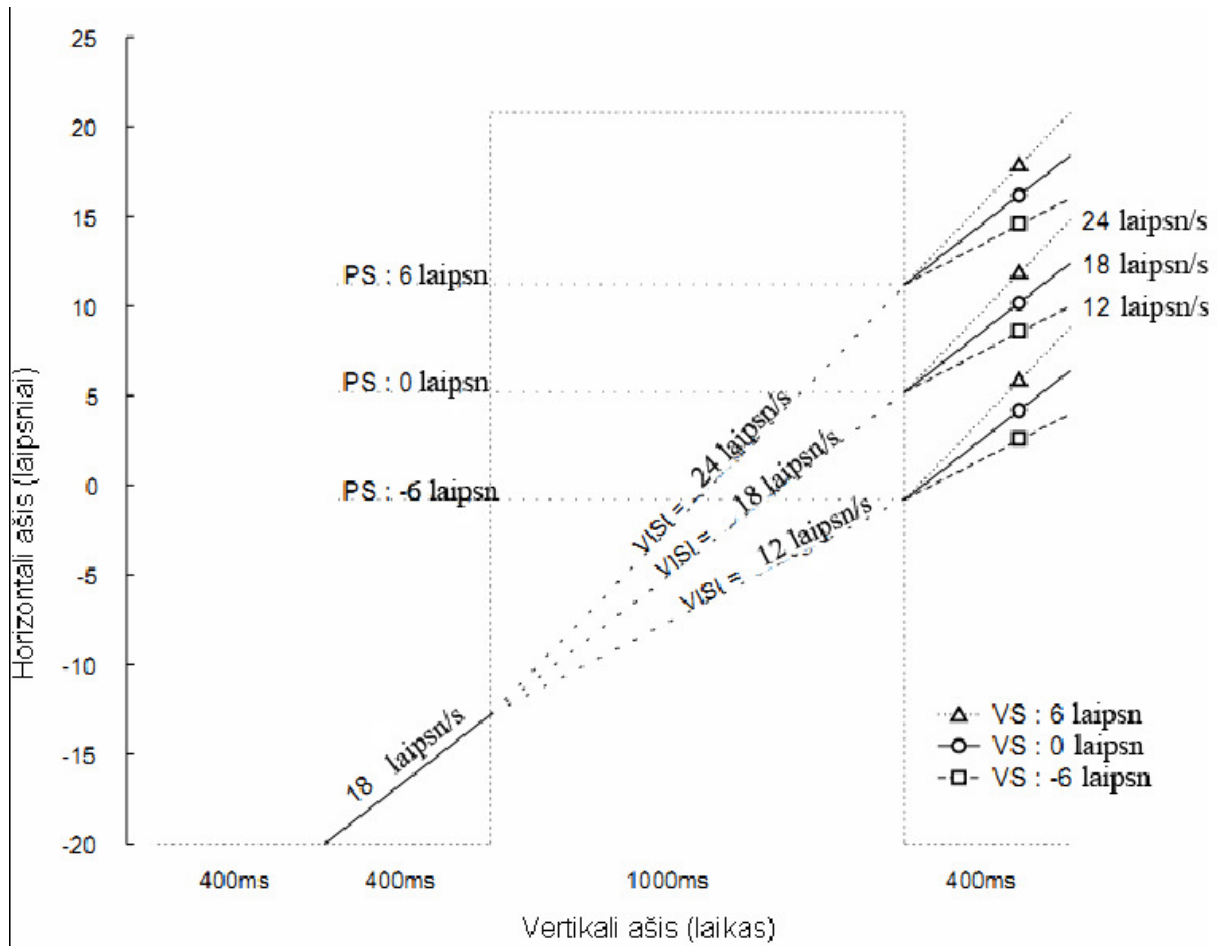


13 pav. Bahill modelis su taikinio sekimo valdikliu

2.4 Akių judesių kontrolės sistemos gebėjimas prognozuoti taikinio trajektoriją

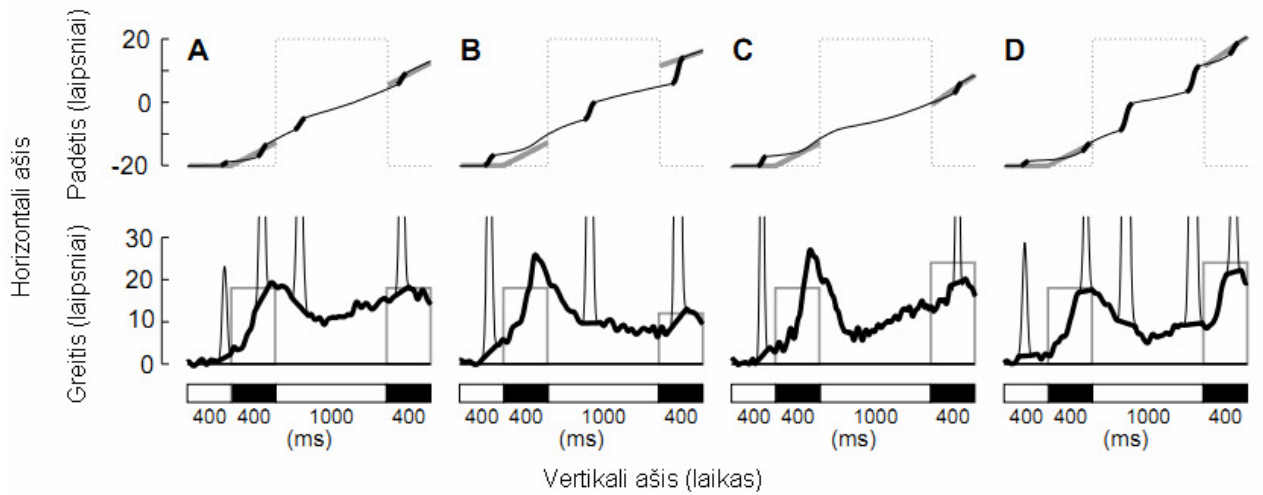
Dažnai aplinkoje susiduriame, jog akių sekami judantys taikiniai yra uždengiami kitų objektų. Kai žmogus seka taikinį, šiam sustojus ir pačiam sekančiajam nejudant, šis objektas nejuda akies tinklainėje, kitaip tariant, yra stabilus arba užfiksuotas. Tačiau taikiniui pradėjus judėti ir išnykus, atsiranda akių judesių kontrolės sistemos gebėjimas prognozuoti taikinio trajektoriją. Iširta, jog žmogaus okulomotorinė sistema geba nuspėti išnykusio taikinio greitį ir padėti keliems šimtams milisekundžių. Po šio laiko tarpo akies sekimo greitis proporcingai mažėja ir pasiekia nulį, kol taikinys vėl atsiras.

Daug tyrimų atlikta studijuojant nuspėjimo techniką tolydžiajame sekime ir sakadose, išnykus taikiniui, tačiau viskas tirta tik su nuspėjama taikinio trajektorija (dažniausiai tai būdavo apskritimas arba tiesė). Viename iš tyrimų (žr. 14 pav.) nustatyta, jog akies sekimo greitis taikinio okliuzijos metu labiausiai sąlygotas nuspėjamo taikinio judėjimo greičio, akis sakadų pagalba bando tikslingai nuspėti, koku greičiu ir koku kampu judės vėl atsiradęs taikinys [15].



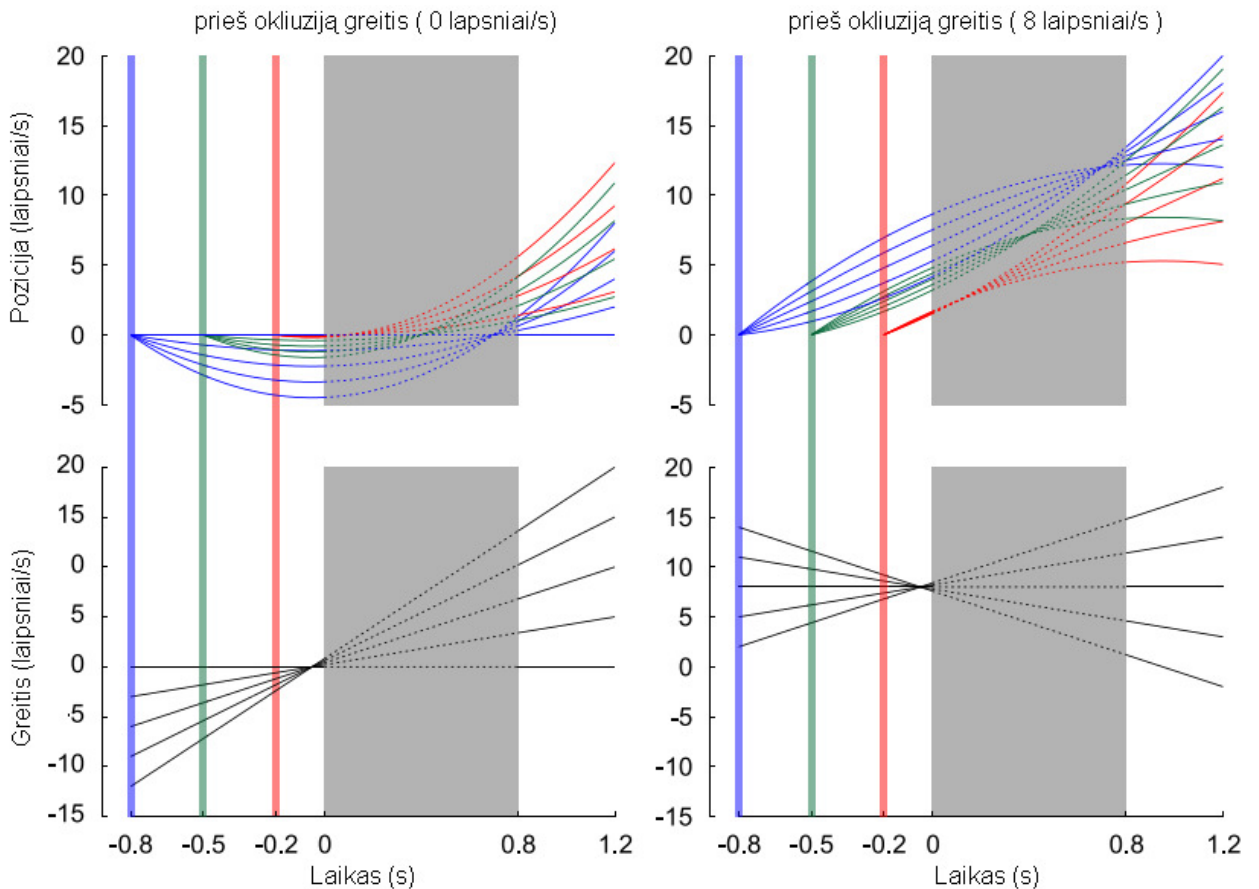
14 pav. Akies greičio ir trajektorijos kitimas laiko atžvilgiu

Grafikai atvaizduoti 15 paveiksle rodo akies ir taikinio pozicijas ir greičius. Juodos linijos akies trajektorija, pilkos – taikinio. Grafikai (A, B, C, D) yra lygūs 14 paveikslo laipsniams (0,0), (6,-6), (-6,6) ir (6,6). Kai laiko juostos juodos – taikinys yra matomas.



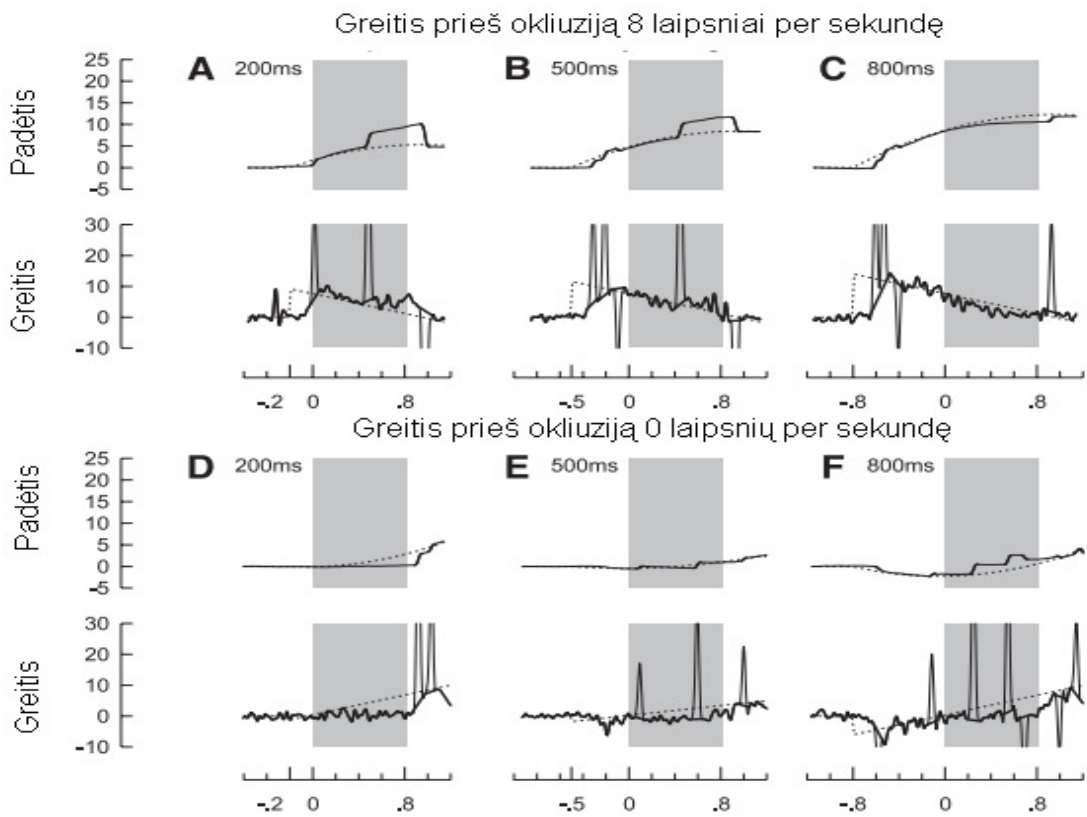
15 pav. Akies ir taikinio pozicijos, greičio grafikai

Taikinio akceleracija gali būti parinkta ir panaudota numatytam akies sekimo keliui. Tyrime pastebėta, jog prie skirtingų taikinio judėjimo greičių, kai taikiny pradeda judėti nuo 0 laipsnių per sekundę, ir kai taikiny pradeda judėti nuo 8 laipsnių per sekundę ir greitėja, akis išimena taikinio judėjimo pagreitį ir bando jį nuspėti, taikinio išnykimo metu. Grafikai 16 paveiksle atvaizduoja taikinio padėtį ir greitį laiko atžvilgiu. Taikinio pasirodymo ir judėjimo pradžia: raudona linija (200 ms), žalia (500 ms), mėlyna (800 ms). Taikinio išnykimo laikas 800 ms [2].



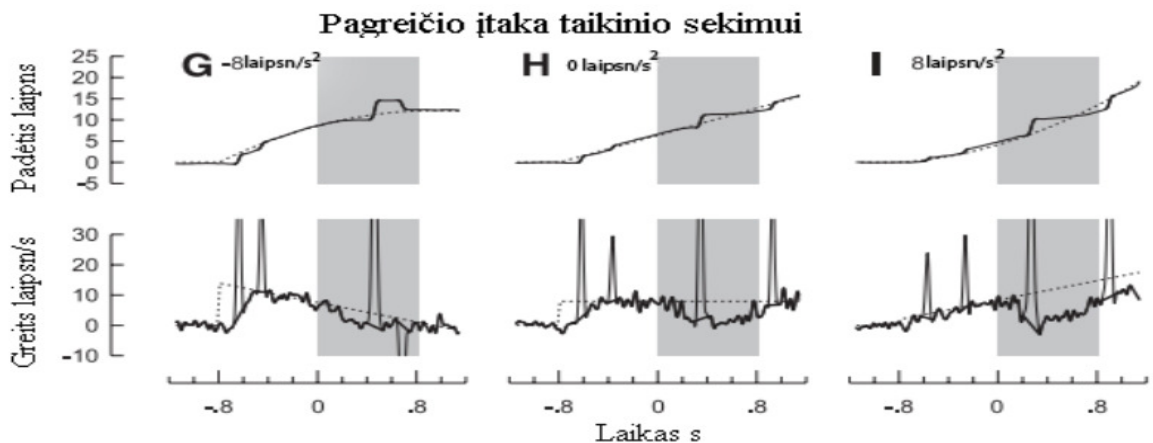
16 pav. Taikinio padėtis ir greitis laiko atžvilgiu

Pavyzdžiuose, pateiktuose 17 paveikse, vaizduojamos akies ir taikinio pozicijos bei greičiai. Juodos linijos yra akies trajektorija, pilkos – taikinio. Grafikuose (A, B, C) taikinio judėjimo vidutinis greitis 8 laipsn/s ir (D,E,F) 0 laipsn/s. Taikinio akceleracija 8 laipsn/s².



17 pav. Akies ir taikinio pozicijos, greičio grafikai

Grafikuose (žr. 18 pav. G, H, I) pateikiama, kokią įtaką pagreitis daro taikinio sekimui. Kaip ir tikėtasi, nepriklausomai nuo fiksacijos pradžios, taikinio greičio, pagreičio ir padėties, akių judesiai, sakados ir tolydus sekimas, numatomi iš anksto. Pradžioje išnykęs taikinys sekamas ir tolydžiai, ir akių sakadomis. Pastebėta, jog akis, likus 500 ms – 800 ms prieš išnykimą (žr. 17 pav., B, C, E ir F grafikuose), įsimena taikinio greitį ir pagreitį taikinio išnykimo metu. Tačiau akiai nepakanka 200 ms laiko prieš išnykstant taikinui, taigi ji nepasiekia 8 laipsn/s greičio, kuris yra prieš taikinio išnykimą (17 pav., D grafikas) [2].



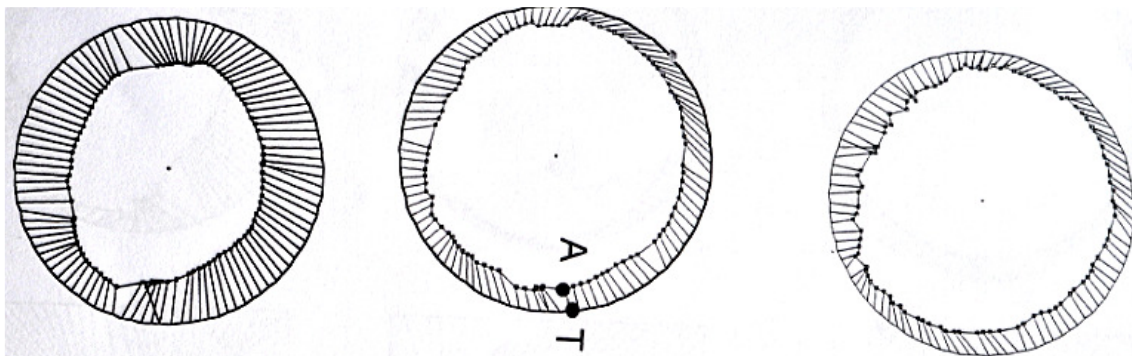
18 pav. Pagreičio įtaka taikinio sekimui

2.5 Taikinio, judančio trajektorija su nematoma intarpais, tyrimų apžvalga

Akių judesių kontrolės sistemos savybės, sekant dvikoordinate trajektorija judantį taikinį

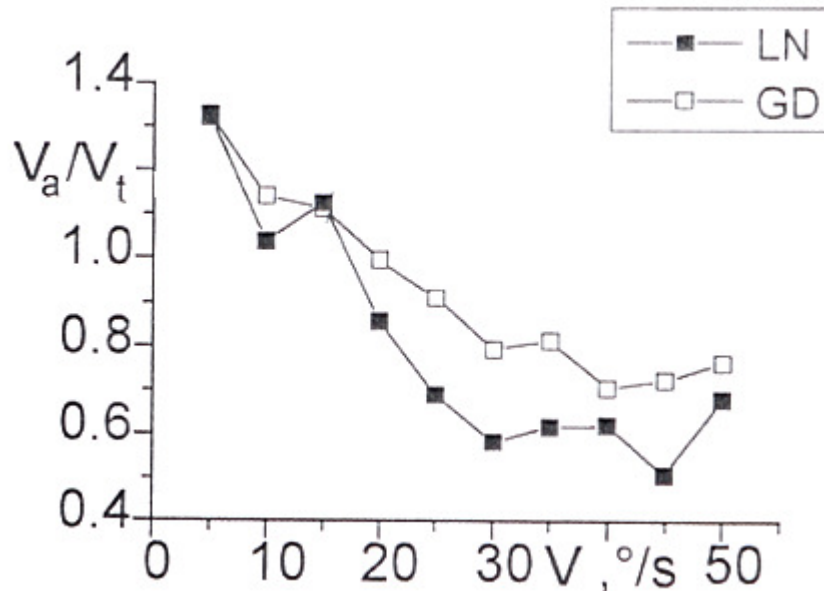
Profesorius habil.dr V. Laurutis ir doc. dr. G. Daunys atliko tyrimą ir parašė straipsnį apie akių judesių kontrolės sistemos savybes, sekant dvikoordinate trajektorija judantį taikinį. Autorių teigimu, analizuojant sekimo akių judesių valdymo sistemos modelius, išskiriamos trys pagrindinės kryptys. D.Robinsono 1986 m. sudarytas modelis remiasi eksperimentiniais duomenimis, gautais pradinėje taikinio sekimo fazėje, kai jis, buvęs nejudamas, pradeda judėti pastoviu nuo 5 iki 50 laipsniai/s greičiu. Struktūra, sumodeliuota kompiuteryje, atspindi akies judesio trajektorijas, gerai atitinkančias eksperimentų rezultatus, tačiau modelis nebetinka, kai trajektorijos yra sudėtingesnės. Antros krypties atstovas yra S.Lisbergeris, 1989 m. pasiūlęs sekimo akių judesių valdymo sistemos modelį, kuris remiasi daugiakontūriu neigiamu grįžtamuoju ryšiu. Jo modelyje paklaidos signalas akies tinklainėje yra perduodamas trimis skirtingais kanalais: pozicijos, greičio ir pagreičio, kurių kiekvienam nustatytos tiesiškumo ribos bei dinaminės savybės. Naudojant šį modelį gauti rezultatai gerai atitinka eksperimentų rezultatus, kai taikinyje juda atsiktine trajektorija, tačiau nėra tikslūs, kai taikinyje juda prognozuojama trajektorija. Trečiai tyrimų kryptį priklauso akių judesių sekimo sistemos savybės, kurių pagrindiniai tyrėjai yra T. Bahill ir G. Barnes. Jų modelių svarbiausias elementas yra taikinio trajektorijos prognozavimo įrenginys, kuris nustato taikinio judėjimo dėsnų parametrus.

Akies judesiai buvo matuojami, panaudojant binokulinį dvikoordinatį akių judesių jutiklį, kurio veikimo principas grindžiamas indukcijos metodu, panaudojant aliuminio kontaktinį žiedą, uždedamą ant akies. Eksperimentui pasirinktos trijų tipų kategorijos: apskritimo, rombo ir kvadrato. Taikinio judėjimo kampinis greitis akies centro atžvilgiu buvo keičiamas nuo 5 iki 50 laipsnių per sekundę. Kiekvienos formos trajektorija ir nustatytu laiku taikinyje judėjo 10 ciklų, po to greitis buvo šuoliškai didinamas. Eksperimentas buvo atliktas su keturiais dalyviais, kurių amžius nuo 20 iki 40 metų. Tyrimo dalyviams buvo pavesta, sutelkus dėmesį, sekti ekrane judantį šviečiantį tašką.



19 pav. Taikinio ir akies judesio trajektorijos, gautos tiriamajam sekant apskritimu. Taikinio judėjimo greičiai žiūrint iš kairės į dešinę 50°/s; 20°/s; 5°/s.

Tiesinių atkarpų galai 19 paveiksle nusako taikinio T ir akies stebimo taško A padėties ekrane tuo pačiu laiko momentu. Iš pateiktų akies judėjimo trajektorijų matome, kad didėjant taikinio greičiui akies trasa vis labiau traukiasi į sekamos figūros centrą. Analizuojant taikinio sekimo figūrų bendrą pavidalą, galima pastebėti, jog kai taikinio judėjimo greičiai maži, akies judesio trajektorija yra trūkčiojanti (žr. 20 pav.). Trūkčiojimais atsiranda dėl dažnų akių šuoliukų, kurių metu akis priartėja prie taikinio arba nuo jo atitolsta.



20 pav. Taikinio ir akies judėjimo greičių modulių V_a ir V_t santykio priklausomybė nuo taikinio judėjimo apskritimui.

Tyrimo išvadose teigiama, jog dvikoordinačio sekimo režimu gauti akių judesių sekimo sistemos eksperimentiniai duomenys apibūdina akių judesių sekimo sistemos savybes ir yra reikalingi projektuojant sistemas, kuriose operatoriaus žvilgsnio kryptis panaudojama netradicinei žmogaus ir techninio įrenginio sąveikai. Nustatyta, kad dvikoordinate sekimo sistema, kaip buvo teigiama anksčiau, nėra dviejų nepriklausomų, vertikalaus ir horizontalaus, kanalų superpozicija. Akių judesių sekimo sistemos prognozavimo mechanizmo tyrimo rezultatai gali būti panaudoti vėlinimo elementą turinčių techninių valdymo sistemų tikslumui padidinti, kai įėjimo dydis kinta pagal periodinę dėsnį [8].

Dvikoordinate sistema pasivejančių sakadų, atliktų tolydinės taikinio judesio trajektorijos metu, kiekybinė analizė

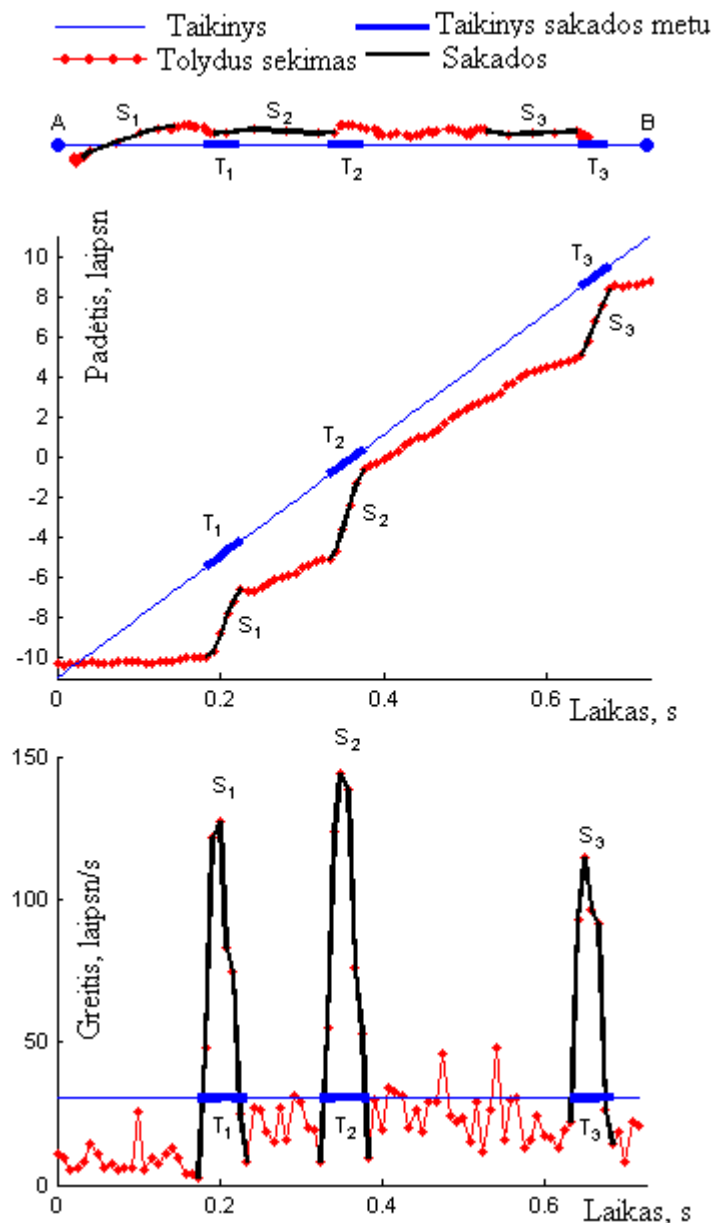
Visos keturios pagrindinės akių judesių posistemės (sakadiniai, sekamieji, vergentiniai akių judesiai ir vestibulinis – okulinis refleksas) yra gerai išnagrinėtos ir jų parametrai yra gerai žinomi. Tolesni tyrimai vykdomi, norint išsiaiškinti kaip šios sistemos veikia kartu ar viena po kitos.

Sekant tolygia trajektorija judantį taikinį, kai jo greitis pasidaro per didelis sekamiesiems akių judesiams, jie yra pertraukiami greitų žvilgsnio šuolių – pasivejančių sakadų, kurios neleidžia pamesti sekamo taikinio.

Pasivejančios sakados sumažina sekimo paklaidą, kai sekimo koeficientas yra mažesnis nei 1.0.

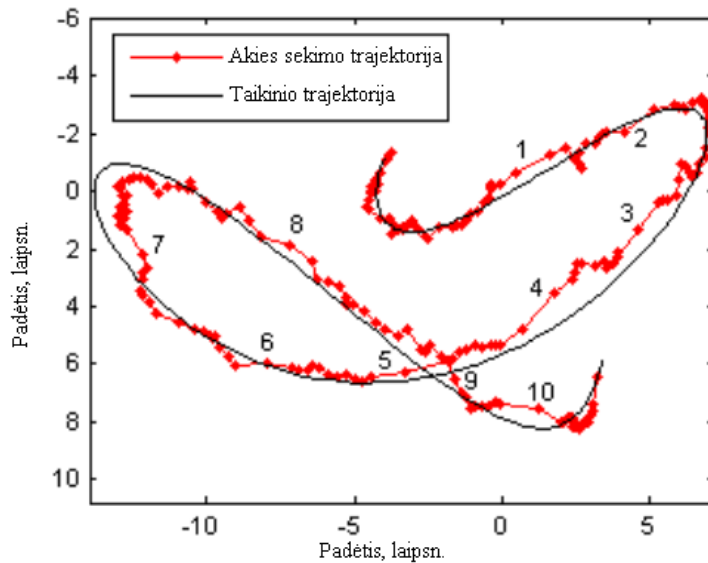
Tarkime, turime objektą, judantį iš taško A į tašką B (mėlyna linija 21 paveiksle). Žmogus seka šį objektą akimis (raudona linija). Jei objektas juda per greitai, staiga pakeičia kryptį ar pan. ir žmogus nebesugeba gerai jo sekti, žvilgsnis staigiu šuoliu perkeliamas link objekto. Šis šuolis vadinamas pasivejančia sakada (*angl. catch-up saccade*, pažymėta juoda linija). Objekto padėtis pasivejančios sakados metu pažymėta stora mėlyna linija [9].

Šie šuoliai ypač gerai matomi 21 paveiksle, laiko ašyje – viršuje, bei greičio grafike – apačioje.

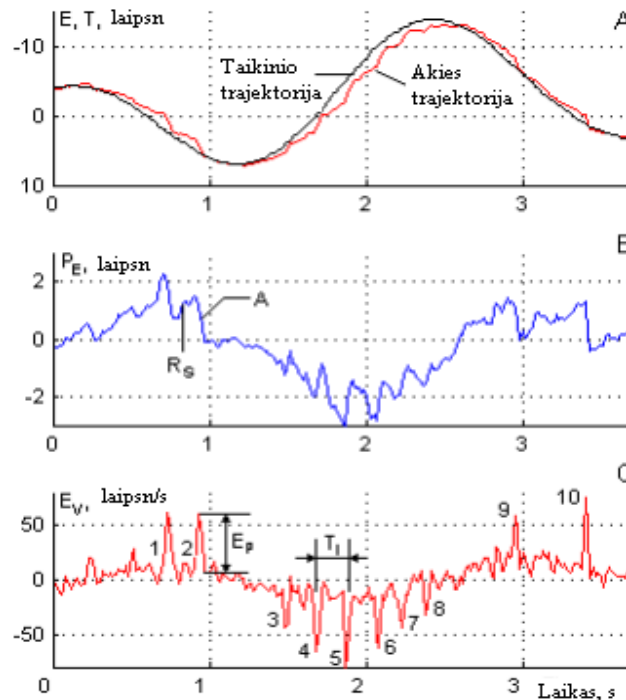


21 pav. Pasivejančių akių šuolių pavyzdys laiko atžvilgiu – viršutinis paveikslas, greičio atžvilgiu – apatinis. Mėlyna linija – taikinio judėjimo trajektorija, greitis, raudona – akių judėjimo trajektorija, greitis. Juodos storos linijos – akių sakados, pažymėtos S₁, S₂ ir S₃.

Straipsnyje aprašomos pasivejančių sakadų, atsirandančių taikiniui judant tolydine trajektorija, kiekybinės charakteristikos. Atlikto eksperimento metu pagaunančios sakados buvo sukeltos panaudojus tolydinę, nežinomą dėsningumu judančio, taikinio trajektoriją, kurios pikinis greitis buvo: 12, 25 ir 50 laipsn/s. Iš gautų eksperimentinių rezultatų buvo nustatytos priklausomybės tarp pasivejančių sakadų parametrų: amplitudės, pikinio greičio bei laiko intervalo tarp dviejų gretimų sakadų jų pakete ir tokių parametrų kaip padėties (sekimo) paklaida akies tinklainėje, paklaidos greitis (slydimas akies tinklainėje) bei momentinis ir integralus taikinio greitis. Išanalizavus šias priklausomybes, pasiūlytas modelis, kaip pasivejančios sakados yra programuojamos ir kaip lėti (švelnaus sekimo) ir greitai (sakadiniai) akies judesiai tarp savęs sąveikauja [14].



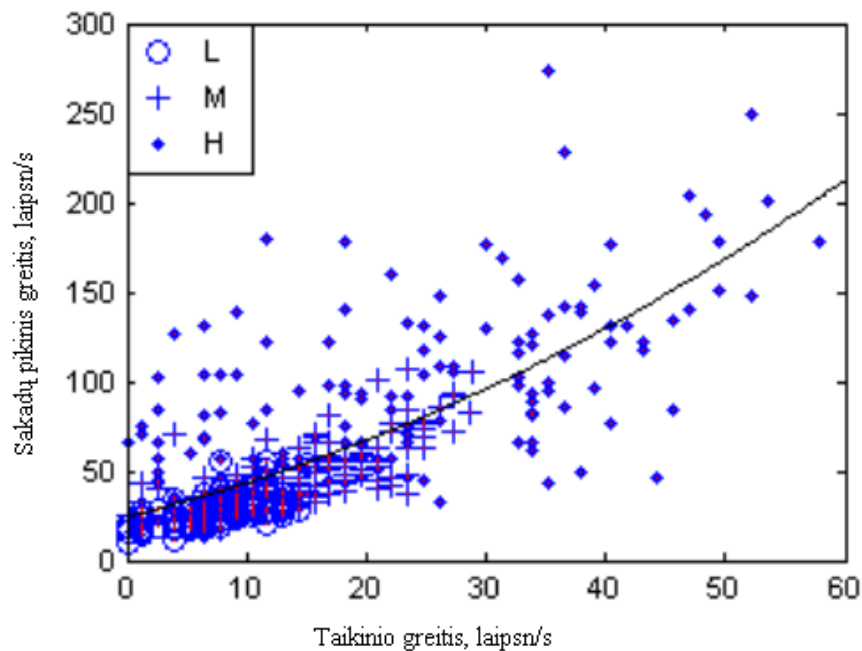
22 pav. Dalis trajektorijos, naudotos tyrime. Pasivejančios sakados pažymėtos numeriais nuo 1 iki 10.



23 pav. A – akies ir taikinio judėjimo trajektorijos, B – akies paklaidos grafikas, C – akies judėjimo greitis

23 paveiksle matome tris grafikus, kurie atvaizduoja tą pačią trajektoriją, kaip ir 22, tačiau atspindi skirtingus aspektus. A grafike vaizduojama akies ir taikinio judėjimo trajektorijos pagal X ašį, B – akies sekimo paklaidų grafikas ir C – akies judėjimo greitis. Kiekvieną kartą, kai įvyksta pasivejančios sakados, padėties paklaida P_E yra sumažinama pasivejančios sakados amplitudė A (23 paveikslas B).

24 paveiksle vaizduojamos akies tinklainės paklaidos ir tinklainės poslinkio tiesinės priklausomybės didėjimai, kai sekamo taikinio greitis didėja eksponentiškai, nepriklausomai nuo jau esamo taikinio greičio. Skirtingomis figūromis pažymėti taikinio judėjimo greičiai L (mažas), M (vidutinis) ir H (didelis) [12] [13].

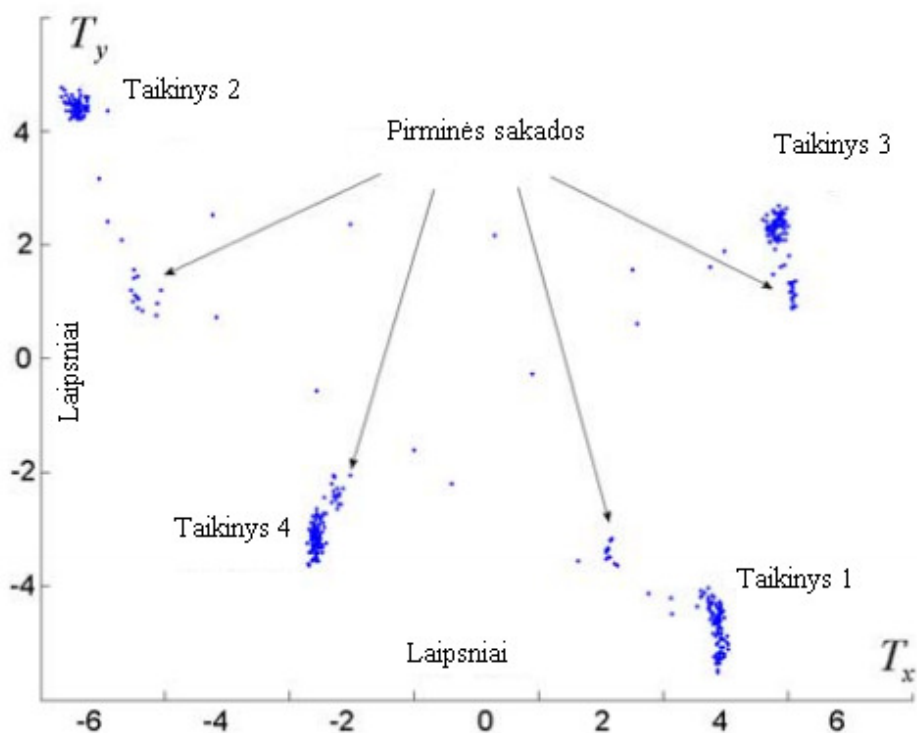


24 pav. Santykis tarp pikinio sakadų greičio ir trumpalaikio taikinio greičio

Bejeso sprendimų teorijos taikymas dvejais etapais formuojamoms sakadoms

Bejeso sprendimų teorija buvo pritaikyta žmogaus sakadiniams akių judesiams, formuojamiems dvejais etapais – pirmine ir korekcine sakadomis. Pirminė sakada, suformuojanti akies posūkį link taikinio, yra didelės amplitudės ir netiksli, o mažos amplitudės koreguojanti sakada perkelia žiūros liniją tiksliai į taikinį. Tai atitinka dviejų pakopų Bejeso sprendimų priėmimą: pirmą su dideliu neapibrėžtumu ir antrą, gavus papildomą informaciją, – tikslesnį. Tai paaiškina, kaip sakadinių akių judesių kontrolės sistema suformuoja tikslų akies šuolį, esant netiksliam regos sistemos naujo taikinio padėties įvertinimui ir akies raumenų paklaidoms. Pirminių sakadų paklaidų išsibarstymas buvo ištirtas teoriškai, naudojant Bejeso modelį, ir eksperimentiškai.

Tyrimo rezultatai parodė, kad jei laikytume, jog taikinio padėties apriorinė tikimybė yra $p_t(T_x, T_y)$, o tikrosios taikinio padėties koordinatės yra T_{x0}, T_{y0} [11].



25 pav. Dviejų etapų akių sakados (mėlyni taškai rodo akių judėjimo trajektorijas gautas kas 8 ms). Mažesni taškų susikaupimai iliustruoja pirmines sakdas ir didesni – korekcines sakadas.

Judančio taikinio nuspėjama trajektorija su nematomais intarpais sekimas

Trys Belgijos tyrėjai (Orban de Xivry; Missal; Lefevre) iš katalikiškojo Louvain universiteto, atlikto tyrimą judančio taikinio nuspėjama trajektorija su nematomais intarpais sekimą (*angl. k.: „A dynamic representation of target motion drives predictive smooth pursuit during target blanking“*).

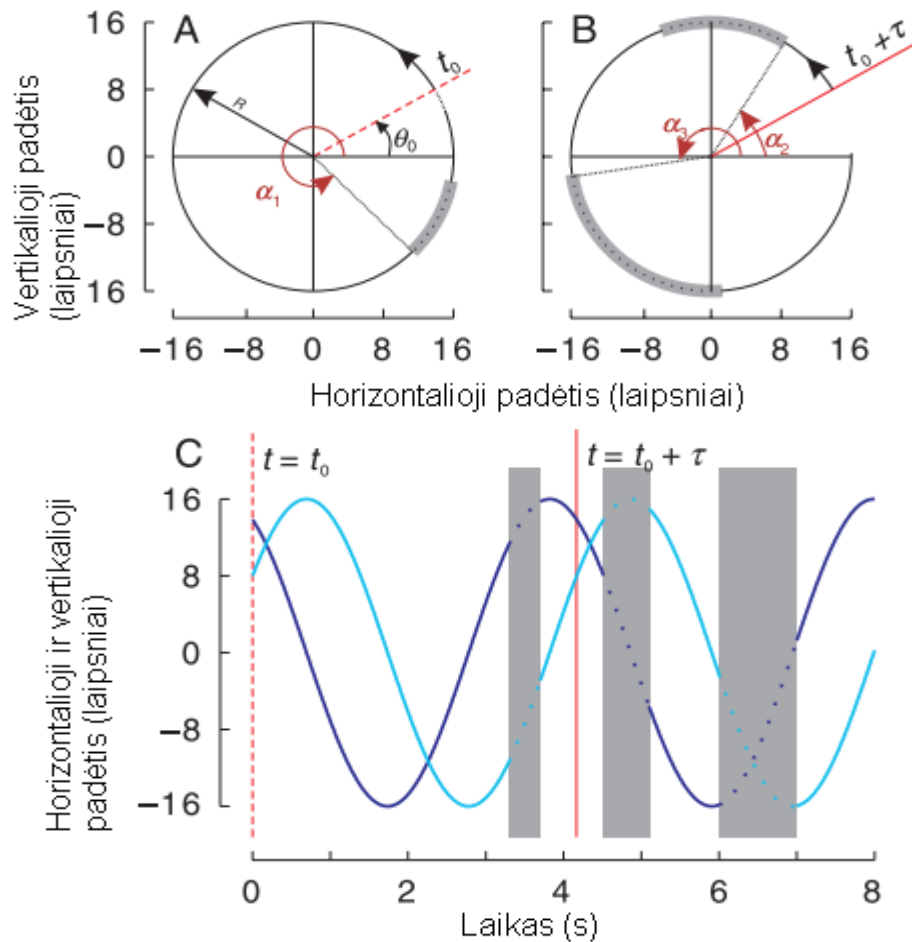
Tyrimo dalyvavo 6 dalyviai, kurių amžius nuo 22 iki 40 metų. Keturi iš jų apskritai nežinojo apie patį tyrimą, nebuvo supažindinti su siektiniais tyrimo rezultatais. Visi tyrimo dalyviai neturėjo regos sutrikimų.

Dalyvių buvo prašoma sekti pasirodžiusį taikinį ekrane prieš laikrodžio rodyklę (žr. 26 paveiksle A ir B grafikai). Eksperimento sesija buvo sudaryta iš 13 testų, kurių bendra trukmė neviršijo 30 minučių. Tiriamasis sėdi visiškoje tamsoje, kurio priekyje, už 1 m stovi skaidraus ekrano vaizduoklis. Taikinys raudonos spalvos taškas, kurio dydis 0.2 laipsnių. Taikinio ir akies padėties įrašytos 500 Hz dažniu, išsaugotos kompiuterio kietajame diske tolimesniems tyrimams, kurie atlikti naudojant matematinio programavimo kalbą Matlab (Mathworks, Natick, MA, USA). Dideli triukšmai gautuose rezultatuose buvo panaikinti, pasitelkus žemų dažnių filtrą. Vienam tiriamajam minimalus taikinio išnykimų skaičius buvo 810, maksimalus – 1125. Pradedant tyrimą, dalyviai buvo apmokomi kaip elgtis su programa.

Tyrimui atlikti buvo sukurta trajektorija (apskritimas). Tačiau apmokymo metu taikinys nebuvo išjungiamas, t.y. pradanginamas. Po 500 ms fiksacijos periodo, taikinys pradeda judėti ir yra

matomas mažiausiai pusė apskritimo. Eksperimentinių tyrimų trajektorijoje taikynys išnyksta trimis skirtingais laikais, nuo 400 ms iki 1000 ms. Po kiekvieno išnykimo, taikynys būdavo matomas nuo 800 ms iki 1500 ms. Pabaigoje trajektorijos, taikynys sustabdomas ir išjungiamas 2 s.

Taikinio trajektorijos (apskritimo) charakteristikos keitėsi atsitiktine tvarka, vykstant eksperimentams. Apskritimo spinduliai (9,6, 12,8 ir 16 laipsnių), judėjimo dažniai (0,15, 0,2 ir 0,25 Hz). Pagal ankstesnius parametrus gauti 5 skirtingi vektoriniai greičiai, kurių diapazonas nuo 9 iki 25 laipsn/s. Pradedant eksperimentą θ_0 greitis buvo parinktas atsitiktiniu būdu [16].

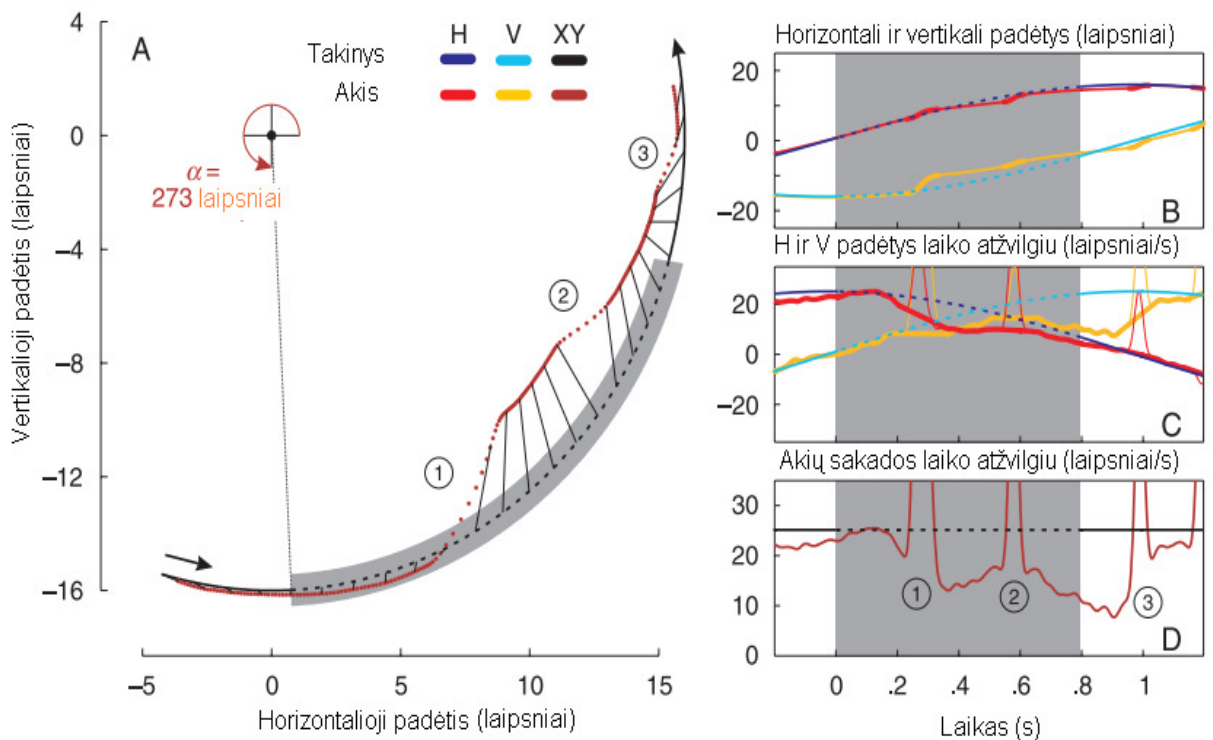


26 pav. Taikinio judėjimas XY ašyse (A ir B figūros) ir XY ašių padėčių pozicija laiko atžvilgiu (C figūra).

A ir B figūrose, XY ašyse, matome pirmąjį apskritimą, kurio spindulys pažymėtas R. Laike t_0 (raudona brūkšninė ir ištisinė linijos) taikynys pradeda judėti apskritimo trajektorija, kryptimi, prieš laikrodžio rodyklę. Vykstant tyrimui, taikynys buvo išnykęs tris kartus (taškuotos pilkos linijos). Taikinių išnykimo pradžios pažymėtos $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. C figūroje pažymėta horizontalioji (tamsiai mėlyna) ir vertikalioji (šviesiai mėlyna) ašys, kurios atitinka A ir B figūras.

27 paveiksle matomas tipinis pavyzdys, kaip žmogaus okulomotorinė sistema reaguoja taikiniui judant apskritimu ir jam išnykus. Pastebėta, jog tolydus taikinio sekimas priklauso nuo

judėjimo greičio, išnykus taikiniui ir praėjus kelioms dešimtims milisekundžių prasideda akių šuoliai, kurie bando nuspėti, kur yra menamas taikiny, greitis eksponentiškai mažėja, tačiau visiškai nesustoja. Atvaizduota trajektorija – apskritimas, taikiny išnyksta ties 273 laipsniais (pilka juosta). A diagramoje vaizduojamos XY horizontalioji ir vertikali padėtys, akies ir taikinio atžvilgiu, 200 ms prieš taikinio išnykimą ir 400 ms po taikinio išnykimo. Ruda linija atvaizduoja akies poziciją taikinio atžvilgiu kas 6 ms. Akių sakados pažymėtos 1, 2 ir 3 skaičiais ir atvaizduotos ruda taškuota linija. Taikinio judėjimo greitis 25 laipsniai/s. Diagramose B, C ir D vaizduojama horizontali ir vertikali padėtys, horizontali ir vertikali padėtys laiko atžvilgiu, akių šuoliai laiko atžvilgiu. Pastebėta tendencija, jog pradžioje dingus taikiniui akies sekimo trajektoriją vis dar veikia įcentrinis taikinio išnykimas, tai reiškia, kad akis pradeda judėti labiau link apskritimo centro. Akių sakados prasideda po keliasdešimties milisekundžių, kai taikiny išnyksta.



27 pav. Tipinis pavyzdys, kaip žmogaus okulomotorinė sistema reaguoja taikiniui judant apskritimu ir jam išnykus. Pilka spalva pažymėti taikinio išnykimai, raudona – akies judėjimo trajektorija

Išvadose autoriai teigia, jog atlikus eksperimentinius tyrimus gauti rezultatai rodo, kad sekant taikinį nuspėjama trajektorija (apskritimu), išnykus taikiniui, nepriklausomai nuo išnykimo trukmės (400 ms iki 1000 ms), akies sekimo trajektorija ir menamo taikinio judėjimas sutampa pirmąsias keliasdešimt milisekundžių. Vėliau akies judėjimo greitis pradeda eksponentiškai mažėti, atsiranda sakados, bandoma nuspėti esamą taikinio vietą. Dažniausiai įvyksta 2 – 3 akių sakados, taikinio išnykimo metu. Praėjus keliasdešimt milisekundžių nuo taikinio išnykimo pradžios, akis pradeda judėti arčiau apskritimo centro [16].

3. TYRIMO STENDO LABORATORINĖ ĮRANGA BEI EKSPERIMENTO VALDYMO IR REZULTATŲ APDOROJIMO PROGRAMA

3.1 Akių judesių matavimo metodai ir laboratorinė įranga

Akių judesių matavimo metodai skirstomi į dvi grupes – į kontaktinius ir bekontaktinius metodus.

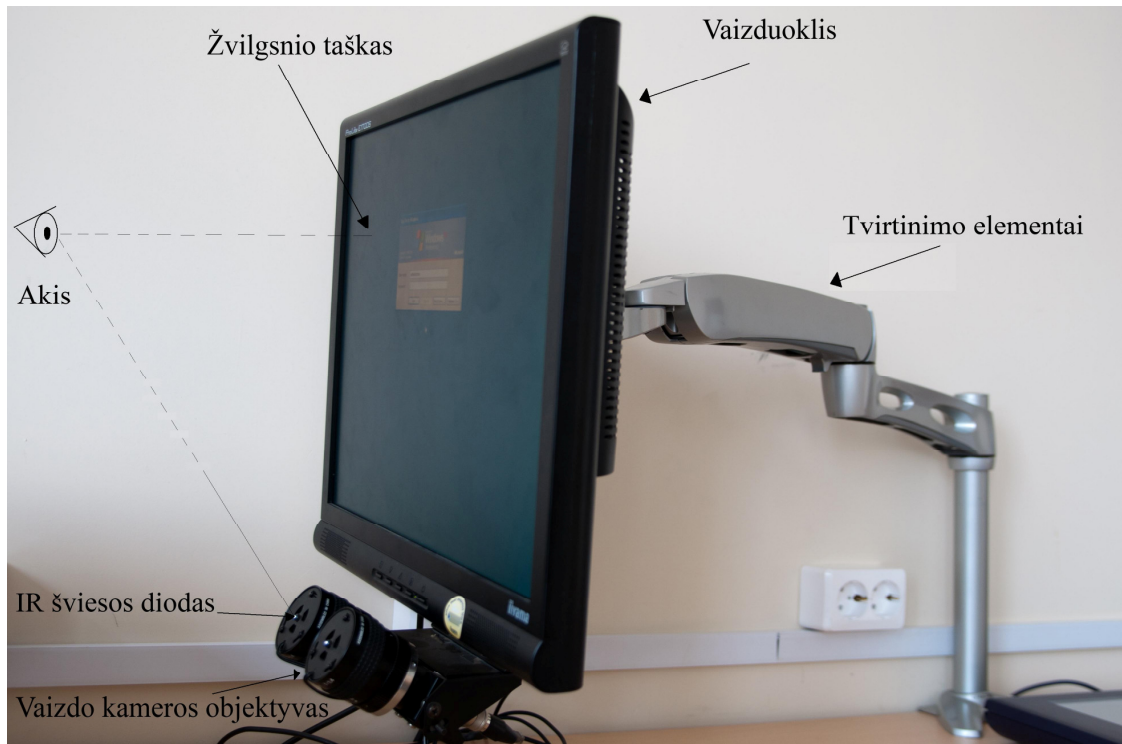
Kontaktiniai metodai:

Dažniausiai praktikoje sutinkamas principas, jog prie akies obuolio pritvirtinami elementai, pavyzdžiui, tai gali būti ferito gabalėlis ar kitokie kontaktiniai lęšiai. Vienas iš būdų yra, kai ant akių uždedami specialūs veidrodiniai kontaktiniai lęšiai ar magnetinio lauko jutikliai. Kitas būdas apima elektros potencialus matuojančius elektrodus, dedamus aplink akis. Svarbu tai, kad potencialas gali būti išmatuotas visiškoje tamsoje ar kai akys yra užmerktos. Tačiau šie metodai nėra patogūs, nes reikalinga intervencija į žmogaus akį.

Bekontaktiniai metodai:

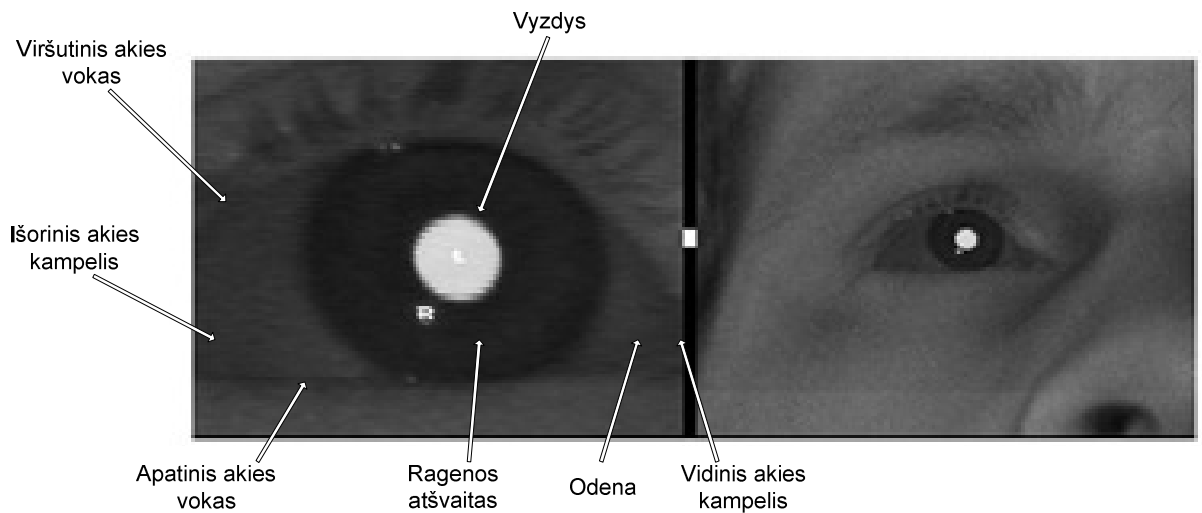
- Elektrokulografinis metodas;
- Fotoelektrinis metodas;
- Televizinis metodas;
- Ragenos atšvaito – vyzdžio centro metodas [7].

Šio darbo eksperimentams pasirinkta sistema „LC Technologies the eyegaze development system“ (žr. 28 pav.). Ši sistema veikia ragenos atšvaito – vyzdžio centro principu, todėl šis metodas bus nagrinėjamas plačiau. Metodas yra tikslus, patogus ir suteikia daug galimybių, vykdant eksperimentus. Tai yra visiškai bekontaktis metodas, nes akies atvaizdai gaunami vaizdo kamera. Dvi žemiau vaizduoklio pritvirtintos „Pentax“ vaizdo kameros realiu laiku seka atskirai abiejų akių judesius. Mažos galios infraraudonųjų (IR) spindulių šviesos diodai, įmontuoti abiejų kamerų objektyvų centruose, apšviečia akį, neviršijant maksimalių leistinų saugių akies apšvietimo parametrų.



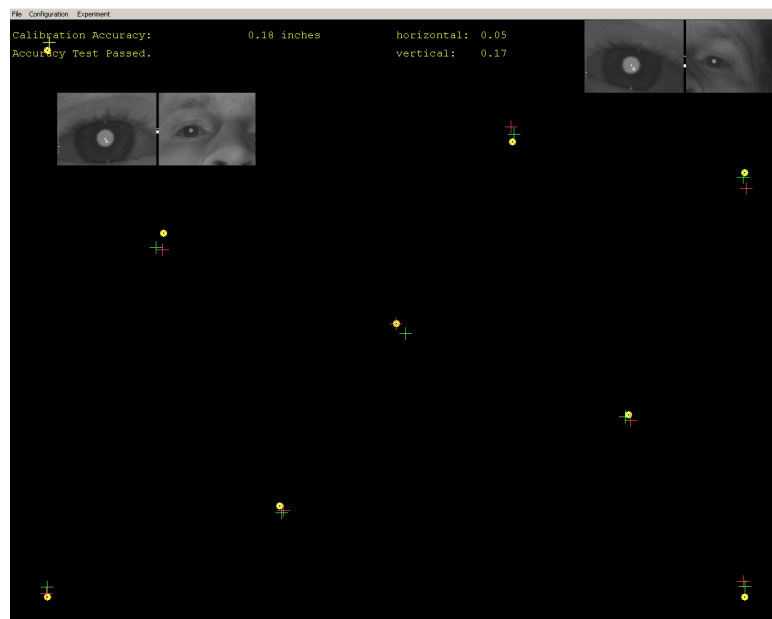
28 pav. Sistemos techninės įrangos konstrukcija

Vaizduoklio rezoliucija, su kuriuo buvo atliekami tyrimai, yra 1280*1024, tiriamasis sėdėjo 70 cm atstumu nuo ekrano. Eyegaze sistemą sudaro procesorius, vaizduoklis, dvi judinamos kameros po vaizduokliu, klaviatūra ir kompiuterinė pelė. Tvirtinimo elementais (lanksčia rankena) galima reguliuoti vaizduoklio aukštį nuo stalo, gylį į toli, pasvirimo kampą į šonus, bei ekrano plokštumos pasvirimą aukštyn ir žemyn. 29 paveiksle vaizduojamas atliekamas kalibravimo fragmentas ir kameros fiksuojamas akies atvaizdas. Vyzdys matomas ryškus, nes šviesos diodo pluoštas atsispindi nuo tinklainės ir grįžta ta pačia kryptimi į kamerą. Kaip analogą, tokį efektą galime sutikti fotografijoje, „raudonų akių“ efektas. Kitu atveju, jei šviesos šaltinis būtų ne kameros viduryje – vyzdys būtų matomas tamsus. Ragenos atšvaito metodas naudojamas siekiant padidinti apdorojimo tikslumą. Kiekvienas kadras yra apdorojamas vaizdų programinės įrangos. Pirmiausia surandamas vyzdys ir ragenos atšvaitas. Tuomet nustatomos jų centrų padėtys. Apdorojantis procesorius iš gautų duomenų apskaičiuoja kampinių akies posūkių horizontalią ir vertikalią reikšmes. Po to iš kalibravimo duomenų perskaičiuoja žvilgsnio taško koordinatės ir rezultatai pateikiami *.erf faile. Jei tyrimo metu akis pasisuka, vienos akies atspindys išnyksta, prietaisas akių koordinatės nustato iš vienos akies ragenos atšvaito atvaizdo ir vyzdžio centro duomenų.



29 pav. Kameros fiksuojami, sumažintas ir padidintas, vaizdai

Kalibravimo procesas vyksta automatiškai, įrangoje yra paruoštas kalibravimo failas (calibrat.lab). Tiriamajam sėdint, prietaisas turi būti sureguliuotas tinkamai, prietaiso aukštis, gylis, kamerų pasvirimo kampas, ryškus fokusas. Kai akys yra tinkamoje padėtyje, tiriamajam pažiūrėjus į kameros objektyvą (žr. 29 paveiksle), sistema pradeda kalibravimą (žr. 30 paveiksle). Pateikiami devyni taškai, kurie fiksuojami abiejomis akimis su leistina 0,675 cm paklaida. Leistinai paklaidai viršijus bent vieną fiksavimo tašką kalibravimo procedūra kartojama. Jei kalibravimo metu tiriamasis pasuka galvą arba mirksi, kalibravimas sustabdomas ir tęsiamas tik tada, kai tiriamojo akys grįžta į reikiamą padėtį. Pateikiamų taškų kraštinės, keisdamos spalvą, rodo, į kurią pusę reiktų pasislinkti. Tinkamai sukalibravus prietaisą, galima pradėti tyrimą.

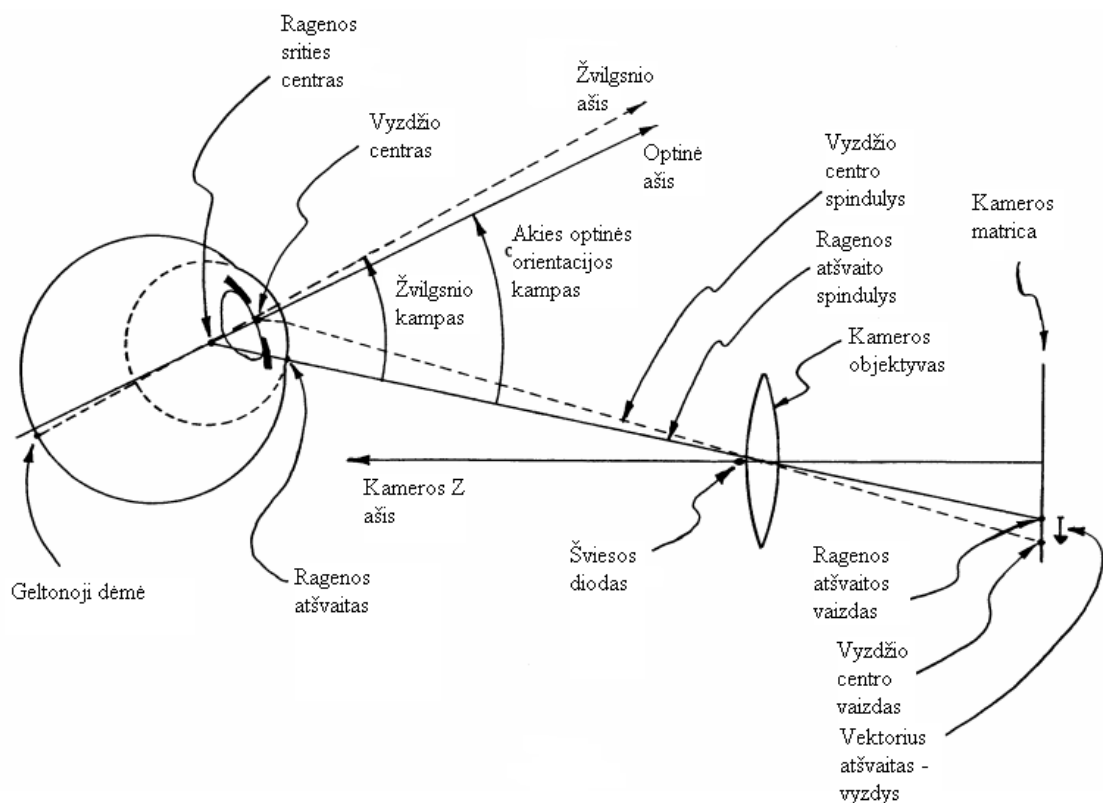


30 pav. Kalibravimo vaizdas ekrane

Ragenos atšvaito – vyzdžio centro metodo (*angl. k. „Pupil Center Corneal Reflection“, toliau darbe – PCCR*) teorija yra paremta šiomis prielaidomis:

- Akies optinė ašis eina per du fiksuotus taškus: ragenos srities centrą ir vyzdžio centrą;
- Akies orientacija gali būti apsprendžiama išmatavus šiuos du taškus;
- Šių taškų padėtys gali būti nustatytos iš kameros fiksuojamo akies vaizdo;
- Ragenos srities centras gali būti nustatytas pagal ragenos atšvaito padėtį. Vyzdžio centras gali būti apskaičiuotas pagal matomas vyzdžio ribas kameros vaizde.

31 paveikslas iliustruoja PCCR metodo geometrinę optiką. Horizontali ir vertikali akies krypties komponentės – išmatuotos linijos tarp kameros objektyvo ir ragenos srities atžvilgiu – gali būti surandamos pagal atšvaito – vyzdžio vektoriaus ilgį [6].



31 pav. PCCR metodo optika

Eyegaze System sistemos žvilgsnio sekimo teorija:

Darbui naudojamoje sistemoje, kur stebima plokštuma yra kompiuterio vaizduoklis, o kamera pritvirtinta žemiau jo, apačioje pateiktos klasikinės lygtys, skirtos žvilgsnio taško nustatymui, yra pakankamos. Dėl to, kad ekranas yra pakreiptas kitu kampu nei kameros Z ašis, atsiranda žymus netiesiškumas. Taip pat akies ragenos paviršiaus geometrija kinta artėjant link kraštų. Siekiant įvertinti šiuos netiesiškumus, naudojamos šios išplėstos lygtys:

$$X_{\text{žvilgsnis}} = A_0 + A_i * d_i + A_j * d_j + A_{ij} * d_i * d_j \quad (\text{mm})$$

$$Y_{\text{žvilgsnis}} = B_0 + B_i * d_i + B_j * d_j + B_{jj} * d_j^2 \quad (\text{mm})$$

Parametrai ($A_j * dj$) ir ($B_i * di$) leidžia įgyvendinti nesutampančias vaizduoklio ir kameros horizontalias ašis. Taigi visiškai horizontalus akių judesys kameros užfiksuotame vaizde gali daryti įtaką ir vertikaliai pokyčiui, apskaičiuojant žvilgsnio taško koordinates. Taip pat ir atvirkščiai.

($A_{ij} * di * dj$) ir ($B_{ij} * dj^2$) parametrai įvertina netiesiškumus dėl ekrano plokštumos ir kameros Z ašių nesutapimo. ($B_{ij} * dj^2$) parametras taip pat įvertina natūralų fiziologinį žmogaus akies ragenos srities geometrinį neidealumą.

Koeficientai A_0, A_i, A_j, A_{ij} ir B_0, B_i, B_j, B_{ij} yra apskaičiuojami kalibravimo metu. Siekiant rasti koeficientų reikšmes, kurios optimaliai sutapatintų atšvaitų – vyzdžio vektorius su žinomais žvilgsnio taškais, panaudojama mažiausių kvadratų regresija.

Norint tiksliai nustatyti operatoriaus žvilgsnio tašką, reikia nustatyti atstumo nuo kameros iki akies svyravimus. Kai vartotojas, žiūrėdamas į tą patį tašką, slenkasi tolyn nuo kameros, atšvaito – vyzdžio vektorius pasikeičia dėl to, kad akies orientacija krypsta žemyn (siekiant išlaikyti tą patį žvilgsnio tašką). Taip pat akies vaizdas, kurį fiksuoja kamera, sumažėja, nes akis nutolsta nuo objektyvo. Abu šie veiksniai sumažina išmatuotą ragenos atšvaito – vyzdžio centro vektorių. Jei skaičiuojant žvilgsnio tašką į tai neatsižvelgiama, apskaičiuotas žvilgsnio taškas pasislenka žemyn. Paprastai, kai žmogus sėdi apie 70 cm nuo kameros ir žiūri į tašką, esantį kompiuterio ekrano viršuje, 2,5 cm galvos poslinkis kameros Z ašies atžvilgiu, sąlygoja ~ 2 cm pokytį skaičiuojamo žvilgsnio taško koordinatėms. Apskaičiuojant atstumo tarp akies ir kameros pasikeitimą, šią įtaką galima sumažinti [6].

Darbe naudojamos „LC Technologies the eyegaze development system“ savybės:

- Pilnai automatinis kalibravimas;
- Jei kalibravimo taškas neatitinka kitų kalibravimo taškų – prašoma pakartotinai sukalibruoti sistemą tame taške;
- Netiesinės žvilgsnio taško koordinačių nustatymo lygtys leidžia pasiekti didesnę tikslumą;
- Atstumo tarp akies ir kameros įtakos rezultatų tikslinimui minimizavimas;
- Su vyzdžiu diametro įtakos rezultatų tikslumui minimizavimas;
- Su vyzdžiu susiliejusio atšvaito išskyrimas;
- Gebėjimas dirbti su 90 – 95% žmonių;
- Atsparumas foninei IR šviesai;
- Gebėjimas dirbti su žmonėmis, dėvinčiais akinius ar kontaktinius lęšius;
- Atsparumas nedidelėms vibracijoms;

Sistema 60 Hz dažniu pateikia tokius parametrus:

- Akies užfiksavimo požymis;
- X, Y žvilgsnio taško (kompiuterio ekrano atžvilgiu) koordinatės taškais ir milimetrais;

- Vyzdžio skersmuo taškais ir milimetrais;
- Akies obuolio centro koordinatės kameros vaizdo atžvilgiu.

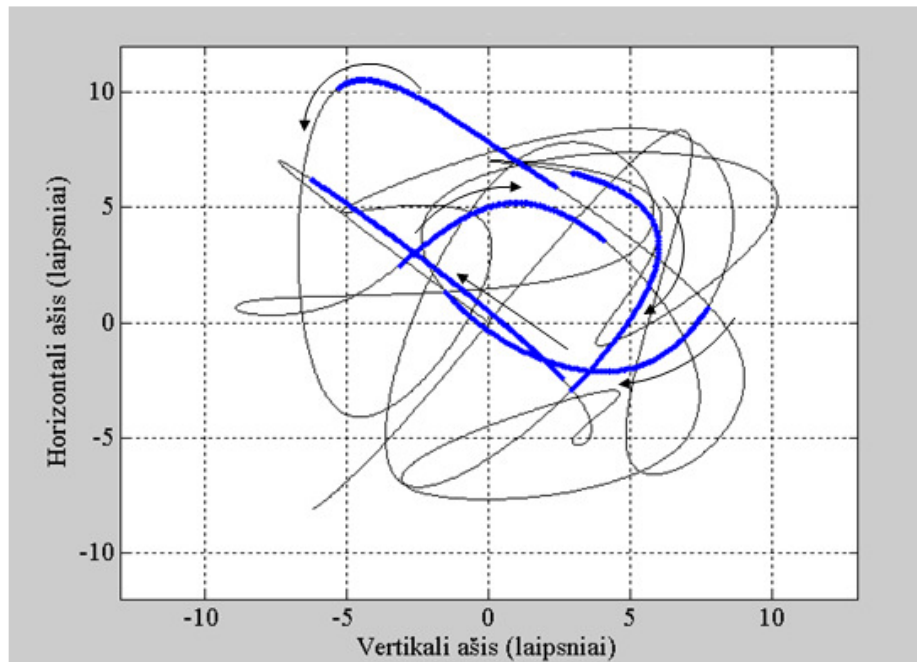
3.2 Programinė įranga

Pagrindinė programinė įranga, naudota tiriamajame darbe, techniniais skaičiavimais pagrįsta, algoritmų programavimo kalba MatLab 2009b, kurios pagalba sukurta tolydaus taikinio judėjimo trajektorija. Užklauso užduoties programa, kuri fiksuoja sekimo rezultatus, juos statistiškai apdoroja. Reikalingi duomenų bazės elementai:

- Užfiksuota žvilgsnio X koordinatė;
- Užfiksuota Y koordinatė;
- Išnykstančių taikinių laiko trukmės ir greičiai.

Rezultatų statistinis apdorojimas vyko naudojant MatLab 2009b ir „Microsoft Office Excel 2003“ programinį paketą. Pagrindinė užduotis – gauti visus reikalingus statistinius parametrus tyrimo rezultatams nustatyti. Atvaizduoti sekimo trajektorijas. Rezultatuose programuojant buvo išimamos tos gautos sekimo duomenų vietos, kuriose sekant taikinį, nebuvo užfiksuotas žiūros taškas. Vietos, kuriose buvo užfiksuoti dideli nukrypimai nuo taikinio sekimo trajektorijos, vadinami „artefaktai“. Duomenys, kurie viršijo nustatytus filtravimo slenksčius, buvo anuliuojami objektyviam apdorojimui ir likusių duomenų įvertinimui.

Ekspimentiniams tyrimams sukurta nenuspėjama taikinio trajektorija (žr. 32 paveikslą).



32 pav. Atvaizduota taikinio trajektorija. Plona pilka linija atvaizduoja taikinio matomą taikinio judėjimo trajektoriją, mėlyna – taikinio išnykimą 1s; Rodyklės žymi kuria kryptimi judėjo taikinis

4. TAIKINIO, JUDANČIO NENUSPĖJAMA TRAJEKTORIJA SU NEMATOM AIS INTARPAIS, SEKIMO ŽVILGSNIU TYRIMO REZULTATAI

4.1 Tyrimo koncepcija

Tikslas:

Ištirti sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos savybes tuo metu, kai sekamas taikiny s pradingsta, bei nustatyti sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos kiekybines charakteristikas ekstrapoliuojant taikinio trajektoriją.

Uždaviniai:

1. Susipažinti su kitų autorių atliktais sekimo akių judesių kontrolės sistemos tyrimais;
2. Įsisavinti "Eye Gaze" akių judesių trajektorijos sekimo įtaiso veikimo parametrus, programinę įrangą;
3. Kompiuterio ekrane sukurti nenuspėjamą taikinio trajektoriją su skirtingais taikinio judėjimo greičiais ir nevienodomis nematomų intarpų trukmėmis;
4. Atlikti eksperimentinius tyrimus ir iš gautų duomenų nustatyti kiekybines akių judesių sistemos charakteristikas, tuo metu, kai taikiny s tampa nematomas.

4.2 Eksperimentinių tyrimų metodika

Šiaulių universiteto Biomedicininės inžinerijos moksliniame centre (toliau darbe – BIMC) atlikti eksperimentiniai tyrimai, kurių pagrindinis tikslas – ištirti sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos savybes tuo metu, kai sekamas taikiny s pradingsta, bei nustatyti sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos kiekybines charakteristikas ekstrapoliuojant taikinio trajektoriją. Žinoma, kad žmogaus okulomotorinė sistema gali nuspėti taikinio greitį ir vietą, kai jis yra išnykęs kelias dešimtis milisekundžių. Po šio periodo akies sekimo greitis lėtėja ir eksponentiškai artėja prie nulio. Bandymas atliktas naudojant nenuspėjamą trajektoriją.

Eksperimentai buvo atlikti su 10 tiriamųjų. Visi iš jų eksperimentą vykdė ir dirbo su JAV firmos „LC Technologies the eyegaze development system“ žvilgsnio krypties registravimo įtaisu pirmą kartą. Tiriamųjų amžius svyruoja tarp 22-26 metų, visi turi normalų regėjimą, nežinomos ir nepastebėtos jokios okulomotorinės anomalijos. Prieš atliekant bandymus dalyviai buvo supažindinti su tyrimui naudojama įranga ir eksperimento taisyklėmis. Tam, kad tyrimų rezultatai būtų teisingi, tyrimai buvo atliekami iš anksto jiems nepasiruošus. Tiriamiesiems pateikta užduotis – sekti judantį taikinį (0,25 laipsnių diametro žalios spalvos tašką) kompiuterio ekrane, judantį nenuspėjama

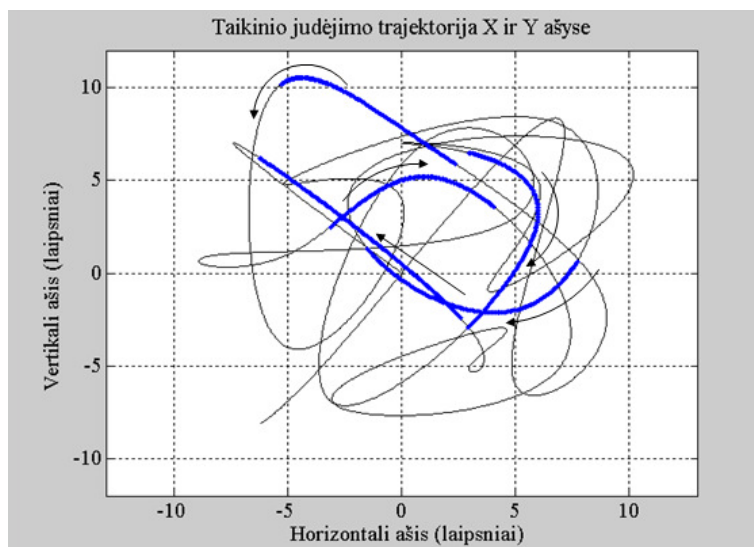
trajektorija (33 paveikslas). Tyrimui atlikti buvo naudojama skirtingų parametrų trajektorija. Generuojant taikinio judėjimo trajektoriją, stengtasi taikinio pradingimus sukurti skirtingose vietose, kad būtų galima matyti akies sekimo tendencijas, kai taikiny s juda tiesiai, apskritimu bei staigiais skirtingų laipsnių posūkiiais. Taikinio pradingimo laikai 500 ir 1000 ms, judėjimo greitis 10 ir 20 laipsn/s. Po 100 ms fiksacijos periodo, taikiny pradeda judėti ir išnyksta 5 kartus skirtingose trajektorijos vietose. Po kiekvieno išnykimo taikiny būdavo matomas 5 s (judant 10 laipsn/s) ir 3 s (judant 20 laipsn/s) greičiais.

Akies sekimo trajektorija įrašyta naudojantis „Eyegaze System“ įtaisu, kuris registruoja žvilgsnio kryptį abiejų akių atskirai 60 Hz dažniu ir išsaugo failą kompiuterio kietajame diske tolimesnei analizei. Kiekvienas eksperimento gautas ir išsaugotas rezultatas buvo apdorotas, naudojant matematinio programavimo kalbą Matlab (Mathworks, Natick, MA, USA,), versija 7.9.0 (R2009b) .

Tyrimui atlikti buvo naudojama skirtingų parametrų nenuspėjama trajektorija:

Pirma trajektorija (33 paveikslas):

- Vidutinis greitis 10 laipsn/s ir 20 laipsn/s;
- Taikiny išnyksta 5 kartus;
- Taikinio išnykimo trukmės 0.5 ir 1s



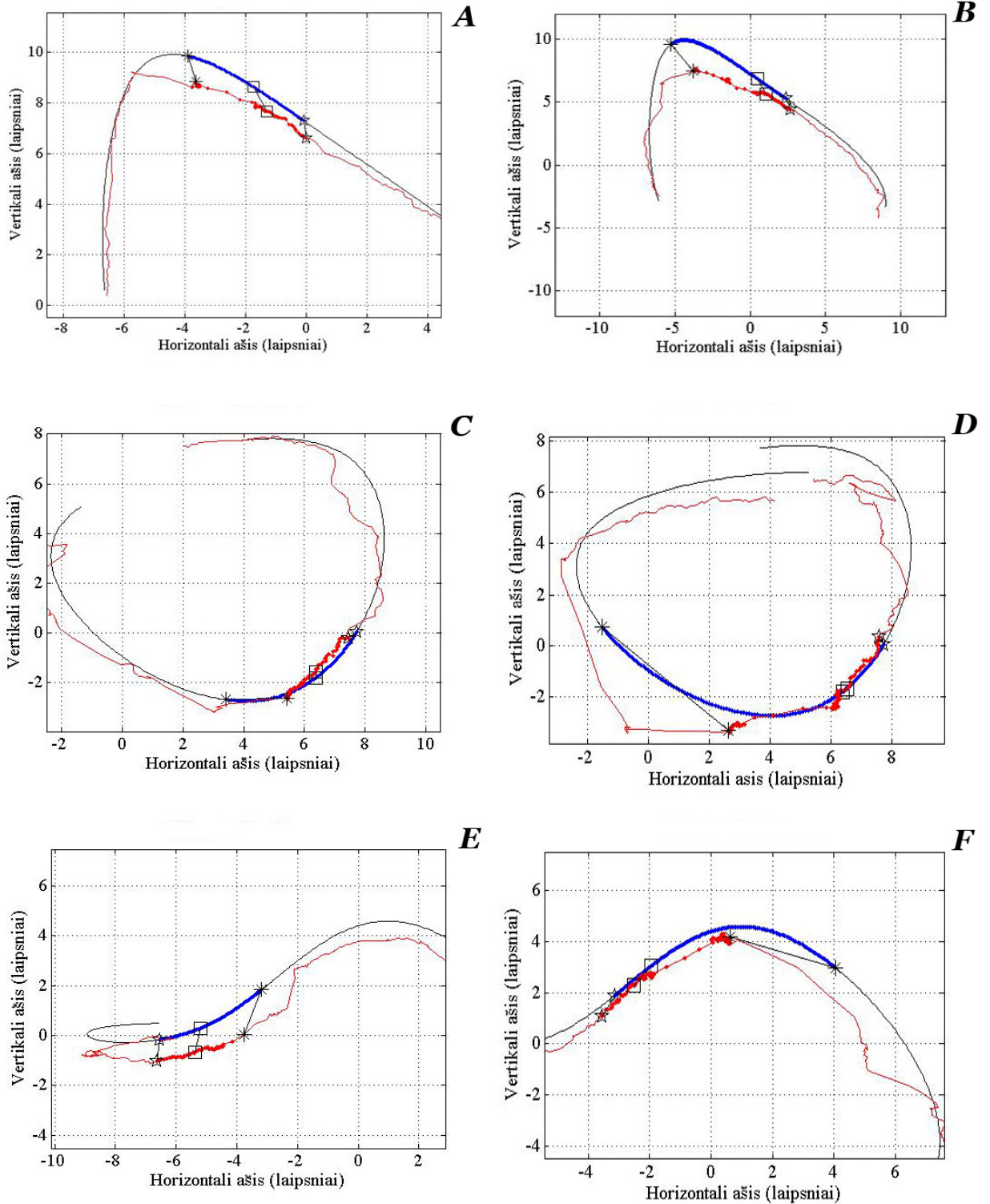
33 pav. Atvaizduota taikinio trajektorija; Plona pilka linija atvaizduoja taikinio matomą taikinio judėjimo trajektoriją, mėlyna – taikinio išnykimus 1s; Rodyklės žymi kuria kryptimi judėjo taikiny s

Kokybinei gautų rezultatų sekimo analizei apibendrinti buvo naudojamas standartinis nuokrypis (žr. (6)). Formulėje naudojami elementai: S – standartinis nuokrypis; n – visų nuokrypiui skaičiuoti narių skaičius; x_i – viena iš paklaidos verčių, kurių kiekis lygus n; \bar{x} – aritmetinis visų x_i narių vidurkis.

$$s = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6), \quad \text{kur} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

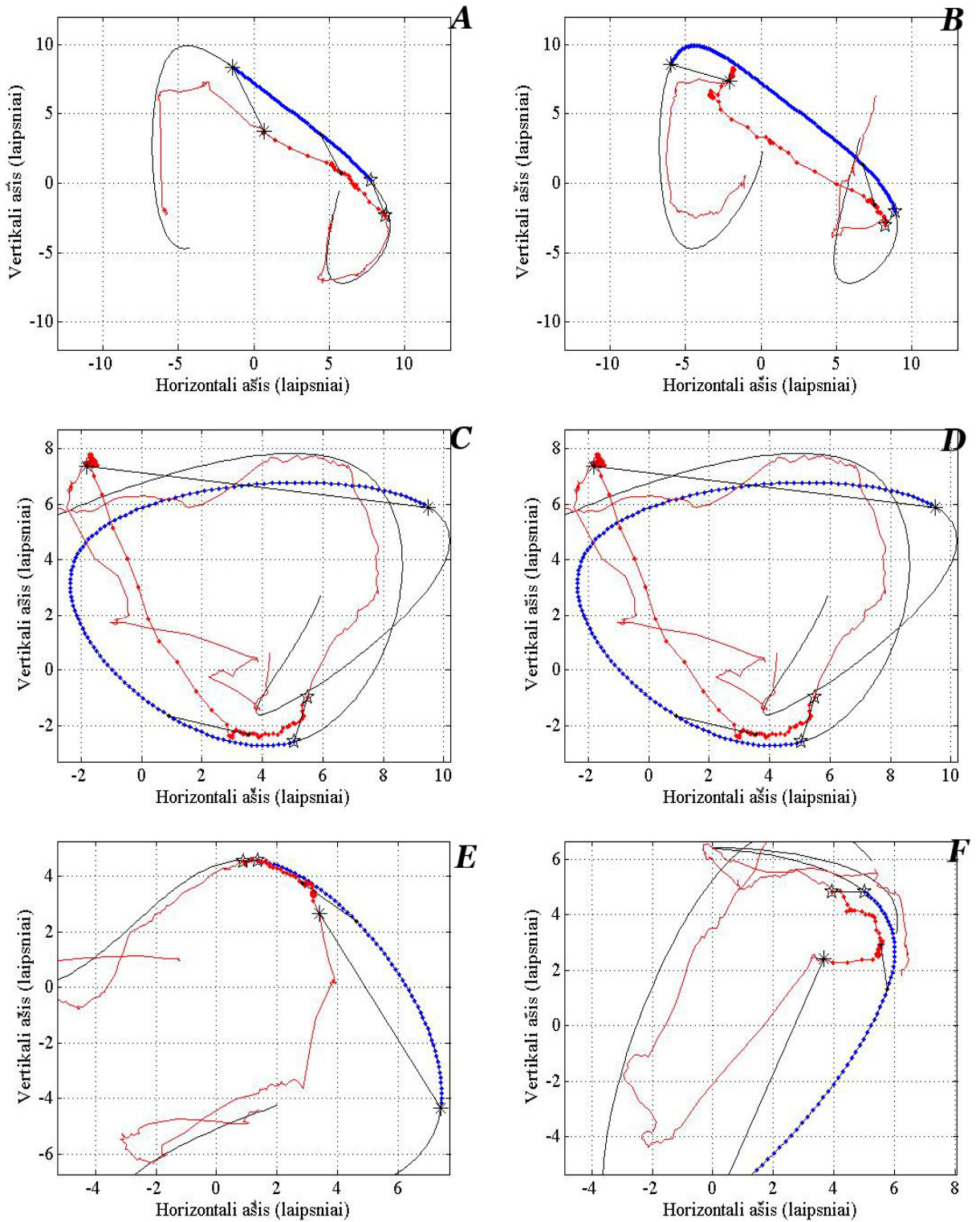
4.3 Eksperimentinių tyrimų rezultatai

34 paveiksle galima matyti padėties paklaidas tarp taikinio trajektorijos ir akies trajektorijos. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s, palyginimui pateikti grafikai su 0.5s (žr. A, C, E) ir 1s (žr. B, D, F) taikinio išnykimo laikais.



34 pav. Atvaizduotos akies sekimo trajektorijos ir taikinio išnykimo vietos, judėjimo greitis 10 laipsn/s; Plona pilka linija vaizduoja matomą taikinio judėjimo trajektoriją, raudona – akies, mėlyna – taikinio išnykimas 0.5s ir 1s;

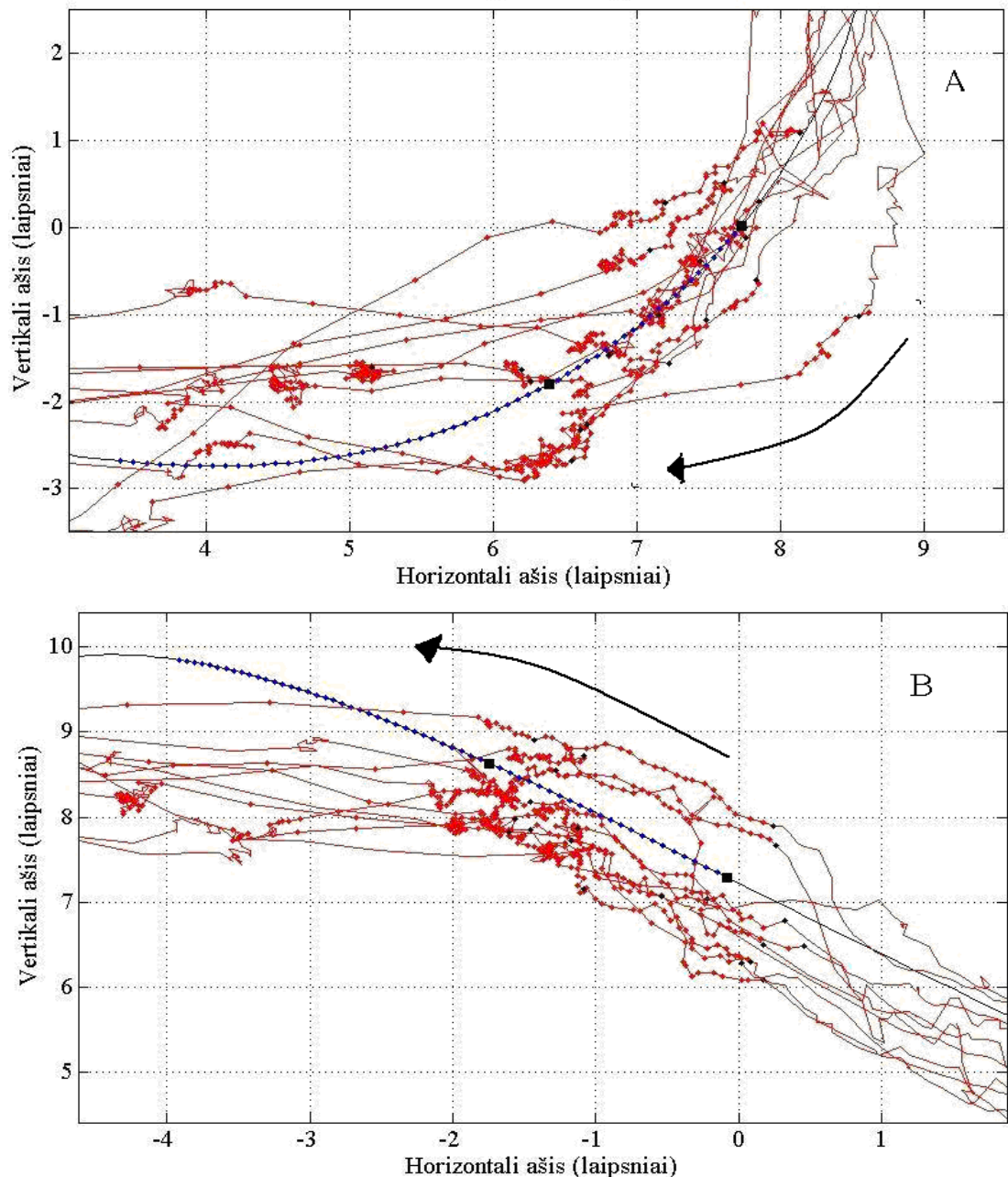
35 paveiksle galime matyti padėties paklaidas tarp taikinio trajektorijos ir akies trajektorijos. Taikinio judėjimo greitis 20 laipsn/s, palyginimui pateikti grafikai su 0.5s (žr. A, C, E) ir 1s (žr. B, D, F) taikinio išnykimo laikais.



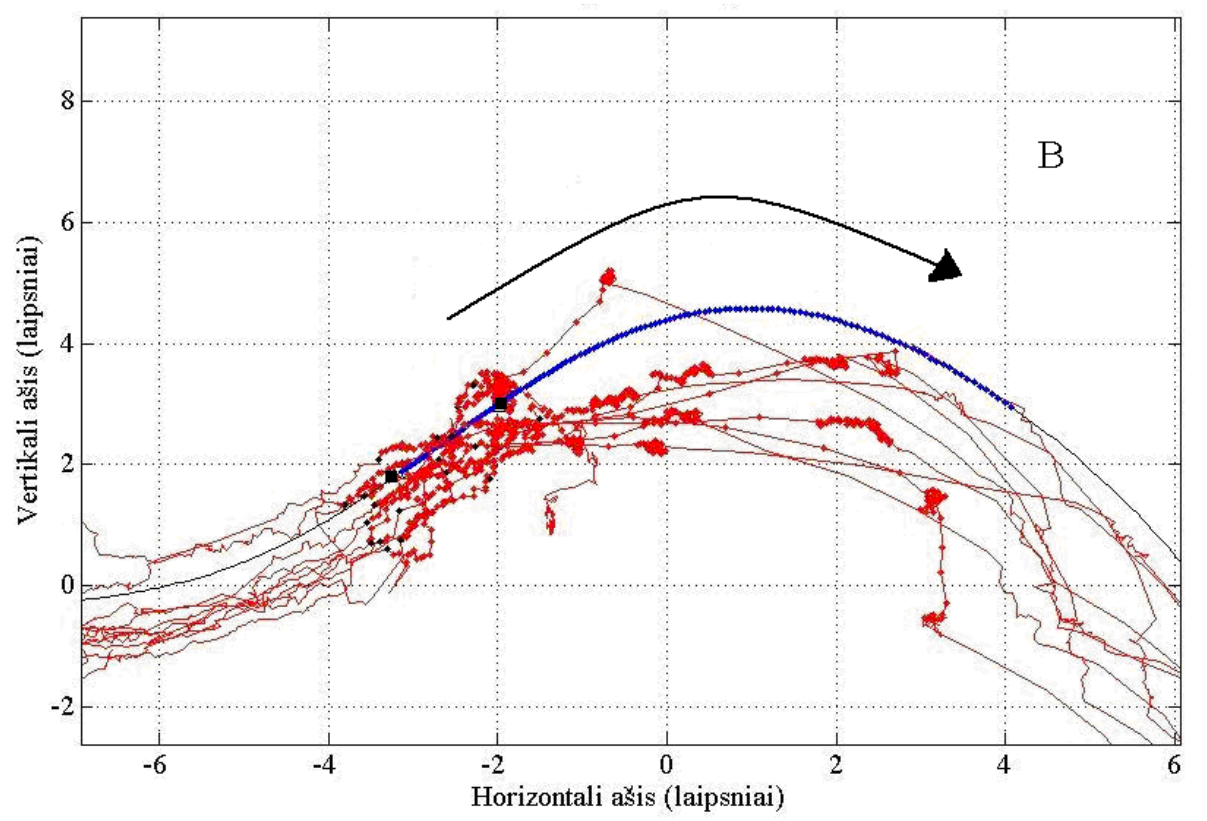
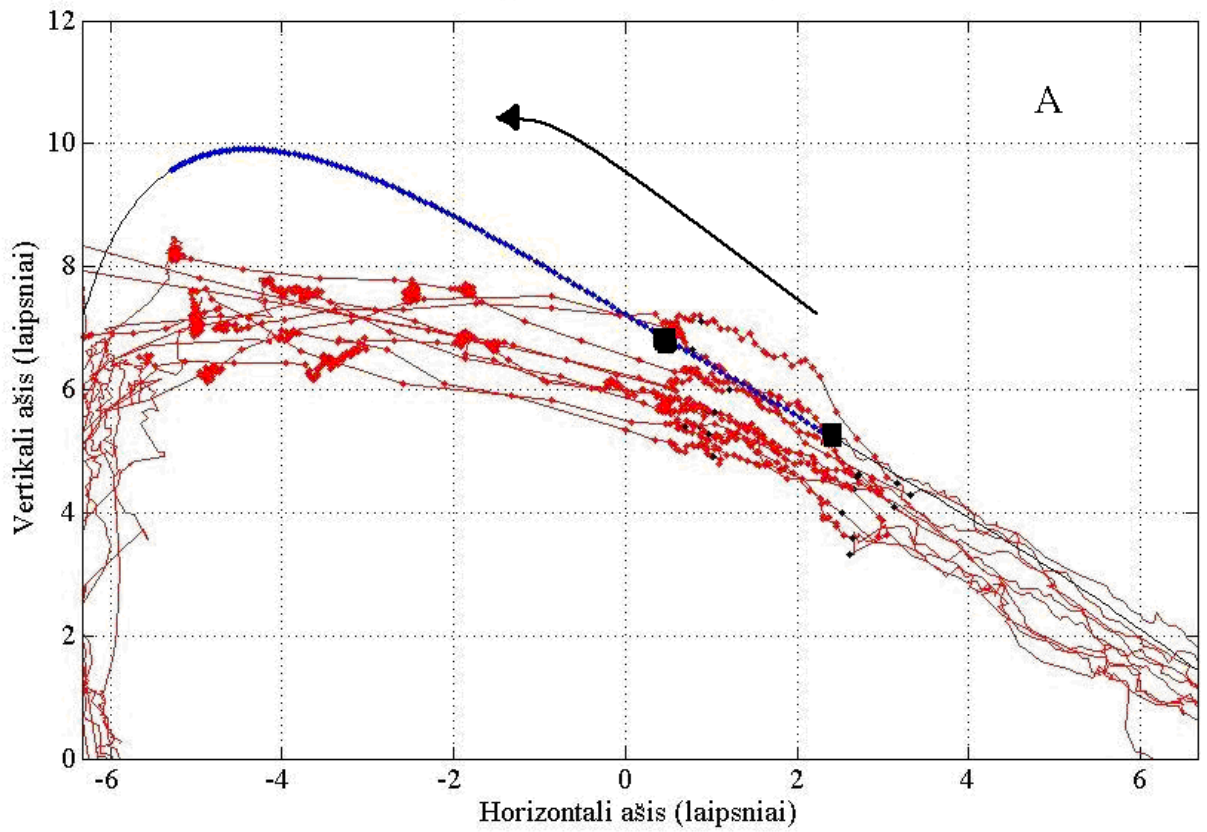
35 pav. Atvaizduotos akies sekimo trajektorijos ir taikinio išnykimo vietos, judėjimo greitis 20 laipsn/s; Plona pilka linija vaizduoja matomą taikinio judėjimo trajektoriją, raudona – akies, mėlyna – taikinio išnykimas 0.5s ir 1s;

Grafikuose vaizduojamos akies ir taikinio judėjimo trajektorijos 1000 ms prieš ir po sekamo taikinio išnykimo. Taikinio išnykimas trunka 500 ms (žr. 34 ir 35 pav. A, C, E) ir 1000 (žr. 34 ir 35

pav. B, D, F) ms. Žvaigždė trajektorijoje žymi taikinio išnykimo pradžią, o akies sekimo trajektorijoje – kur buvo akis tuo metu, kai taikiny s išnyko. Kvadratai žymi padėtis 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios. Snaigės – taikinio pradingimo pabaigą ir akies padėtį jos metu. Po 200 ms akies judėjimo greitis pradeda mažėti, kartu pradeda didėti akies sekimo paklaida, nes okulomotorinė sistema nebesugeba nuspėti judančio taikinio padėties. Kai taikiny nėra matomas, akis atlieka šuolius į tariamas vietas, kur galėtų būti taikiny. Po taikinio išnykimo, akies padėties paklaida yra mažinama padedant sakadoms ir pasivejančiomis sakadoms. Apdorojant rezultatus, įvertinant paklaidas, trajektorijos atvaizdavimas prieš taikinio pradingimą padeda spręsti, kiek įtakos akies sekimui prieš išnykimą turėjo taikinio judėjimo trajektorija.

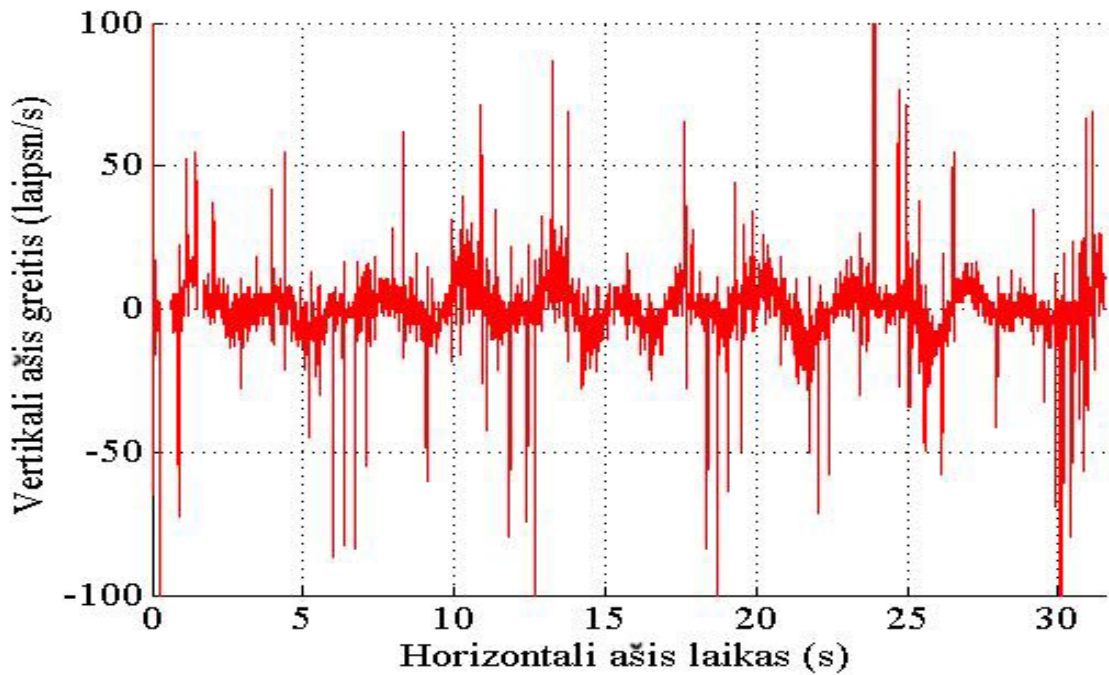


36 pav. Aukščiau pateiktuose grafikuose A ir B atvaizduota dešimtys tiriamųjų akies sekimo trajektorijos ir taikinio išnykimo vieta. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s; Plona pilka linija atvaizduoja matomos taikinio judėjimo trajektorijos, raudona – akies, mėlyna – taikinio išnykimą 0.5s. Raudoni kvadratai taikinio pradingimo pradžią ir 200 ms nuo pradingimo pradžios. Rodyklės rodo taikinio judėjimo kryptį.



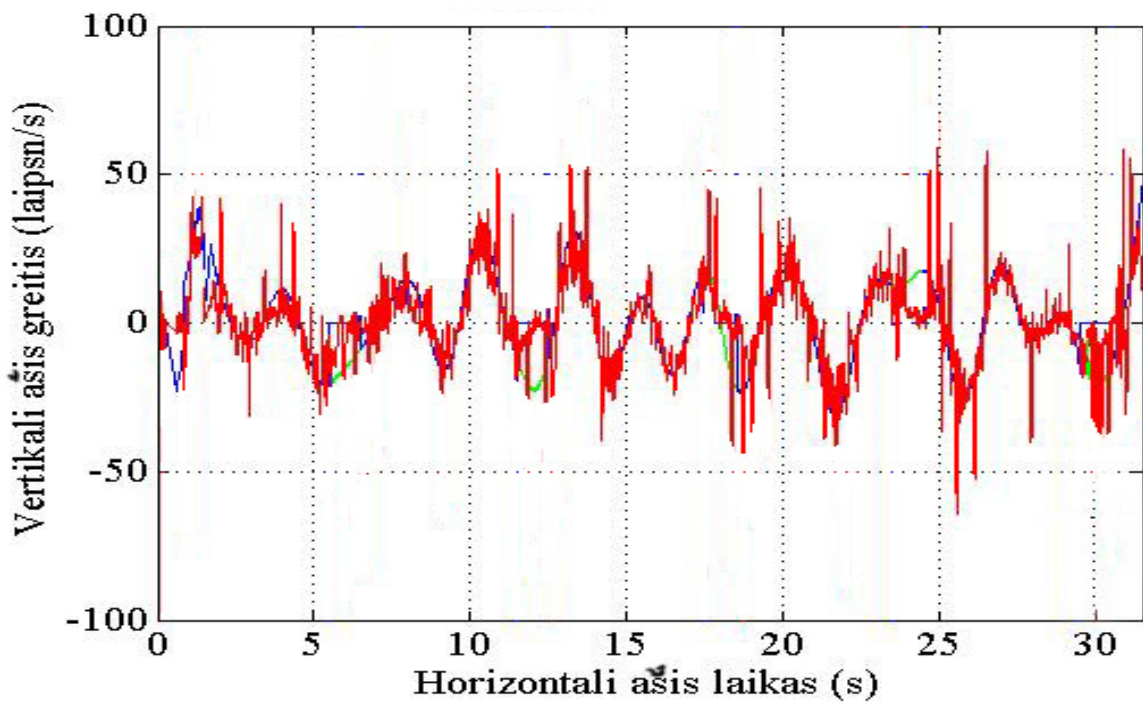
37 pav. Aukščiau pateiktuose grafikuose A ir B atvaizduota dešimtys tiriamųjų akies sekimo trajektorijos ir taikinio išnykimo vieta. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s; Plona pilka linija atvaizduoja matomos taikinio judėjimo trajektorijos, raudona – akies, mėlyna – taikinio išnykimą 1s. Raudoni kvadratai taikinio pradingimo pradžią ir 200 ms nuo pradingimo pradžios. Rodyklės rodo taikinio judėjimo kryptį.

38 paveiksle vaizduojamas nefiltruotas akies greičio signalas, sekant taikinį. Horizontalioje ašyje atvaizduotas laikas s , vertikaloje ašyje greitis, išreikštas laipsniai/s. Taikinio vidutinis judėjimo greitis – 10 laipsn/s.



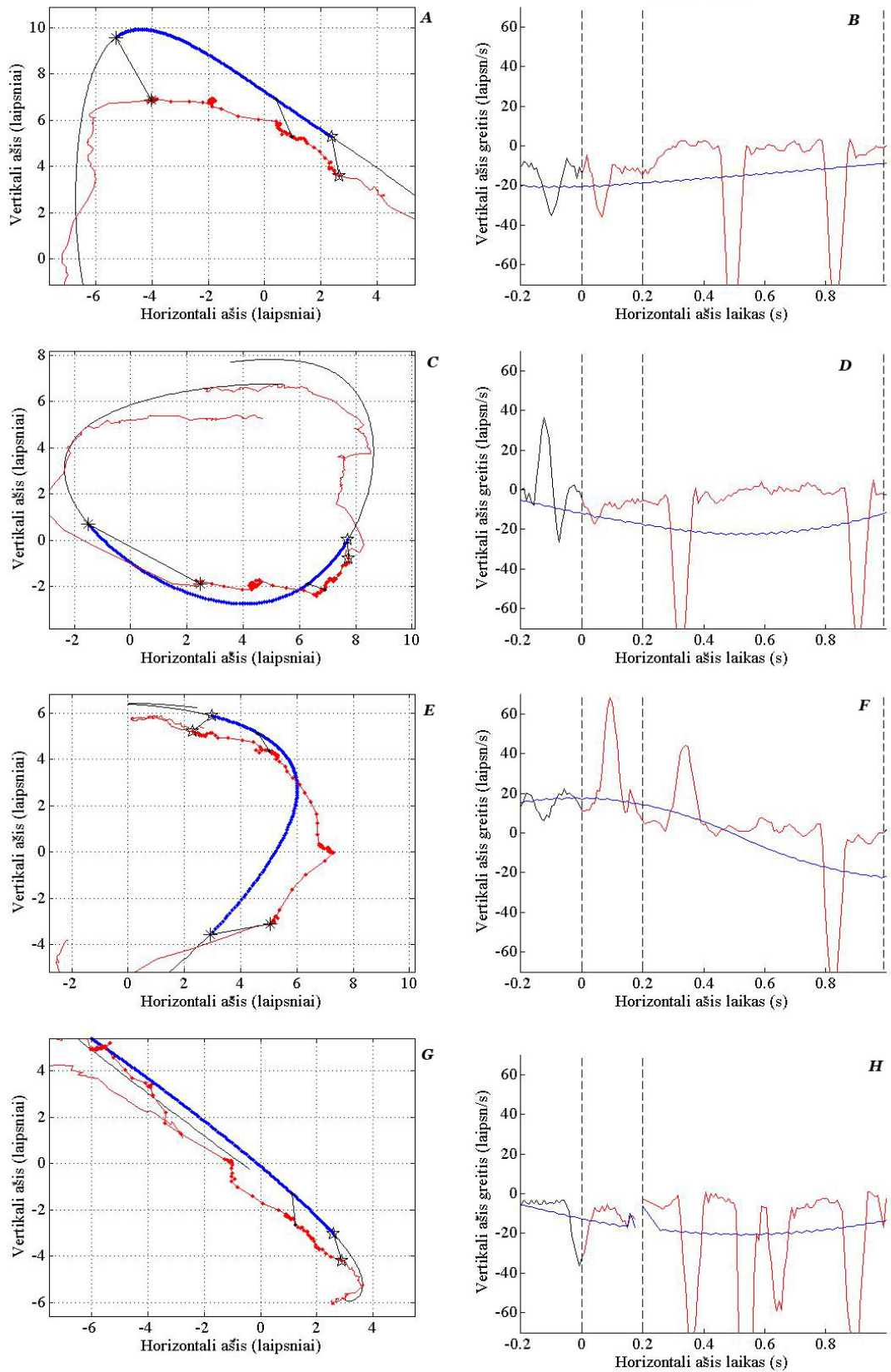
38 pav. Nefiltruotas akies greičio signalas. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s

39 paveiksle vaizduojamas filtruotas (50 ms vidurkio sudarymo principu) akies greičio signalas, sekant taikinį.



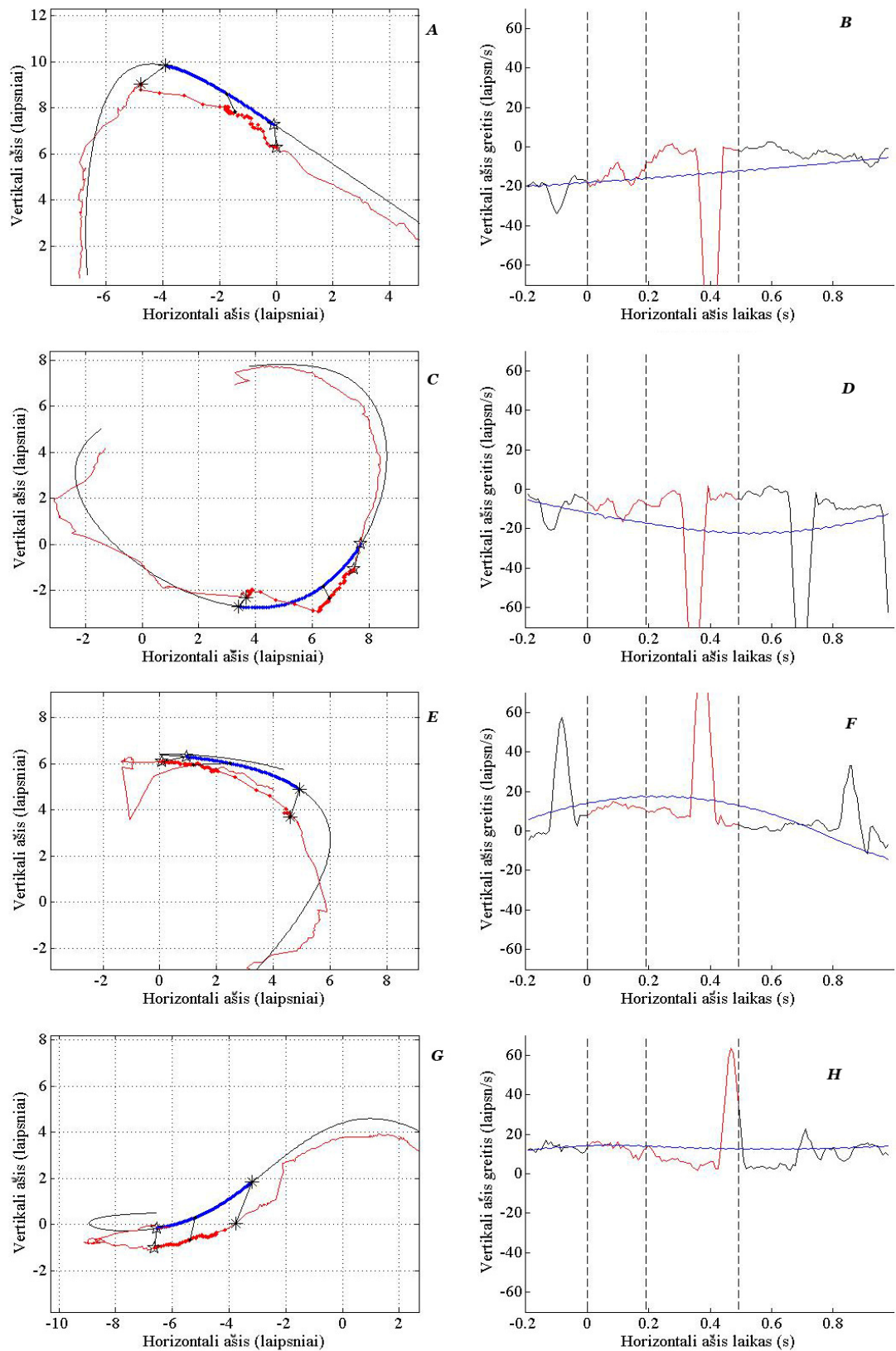
39 pav. Filtruotas akies greičio signalas – raudona linija. Mėlyna linija – taikinio trajektorija. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s

40 paveiksle pateikti vieno iš tiriųjų rezultatai – akies sekimo greičio (žr. B, D, F, H) ir padėčių grafikai (žr. A, C, E, G), sekant išnykusį taikinį 1 s. Taikinio judėjimo greitis – 10 laipsn/s.



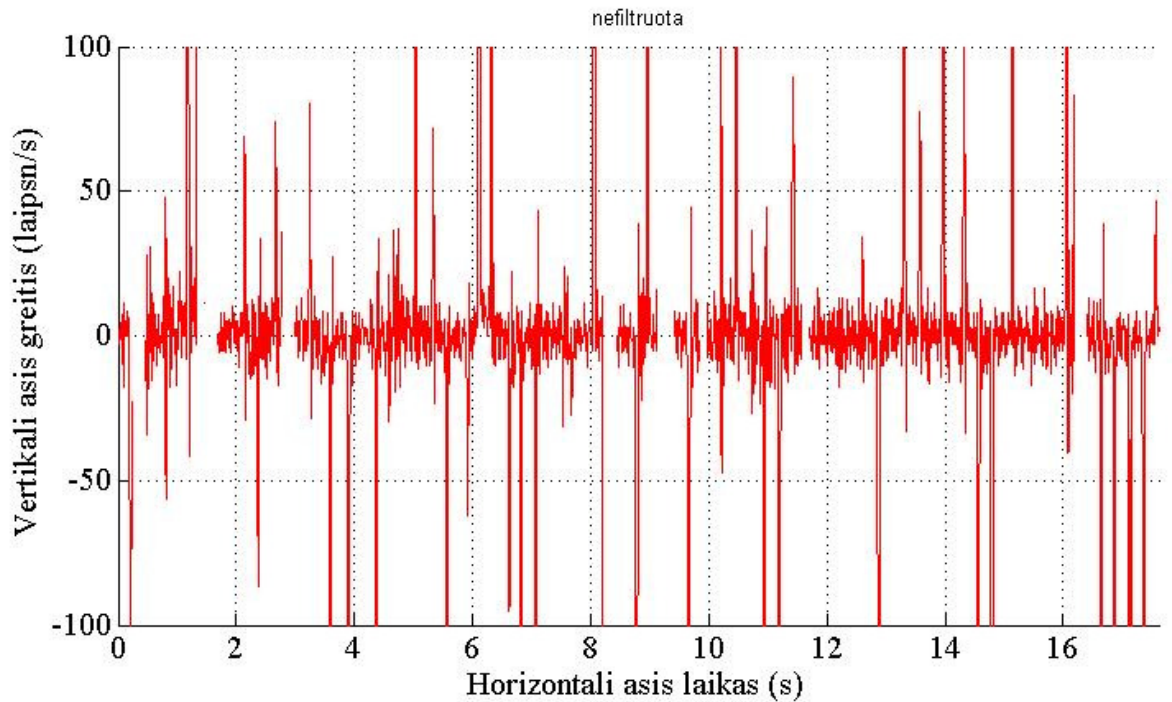
40 pav. Atvaizduotos akies sekimo greičio ir padėčių grafikai, sekant išnykusį taikinį. Judėjimo greitis 10 laipsn/s; Plona pilka linija vaizduoja matomą taikinio judėjimo trajektoriją, raudona – akies, mėlyna – taikinio išnykimą 1s;

41 paveiksle pateikti vieno iš tiriamųjų rezultatai – akies sekimo greičio (žr. B, D, F, H) ir padėčių grafikai (žr. A, C, E, G), sekant išnykusį taikinį 0.5 s. Taikinio judėjimo greitis – 10 laipsn/s



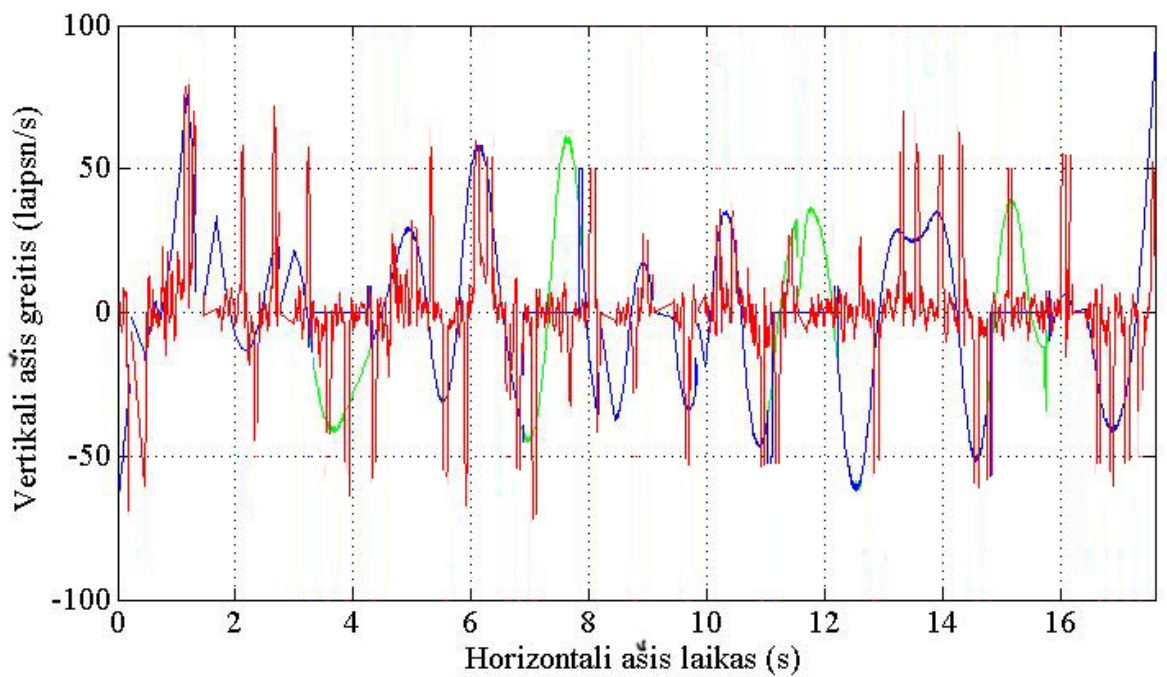
41 pav. Atvaizduotos akies sekimo greičio ir padėčių grafikai, sekant išnykusį taikinį. Judėjimo greitis 10 laipsn/s; Plona pilka linija vaizduoja matomą taikinio judėjimo trajektoriją, raudona – akies, mėlyna – taikinio išnykimą 0,5s;

42 paveiksle vaizduojamas nefiltruotas akies greičio signalas, sekant taikinį. Horizontalioje ašyje atvaizduotas laikas s , vertikaloje ašyje greitis, išreikštas laipsniais/s. Taikinio vidutinis judėjimo greitis – 20 laipsn/s.



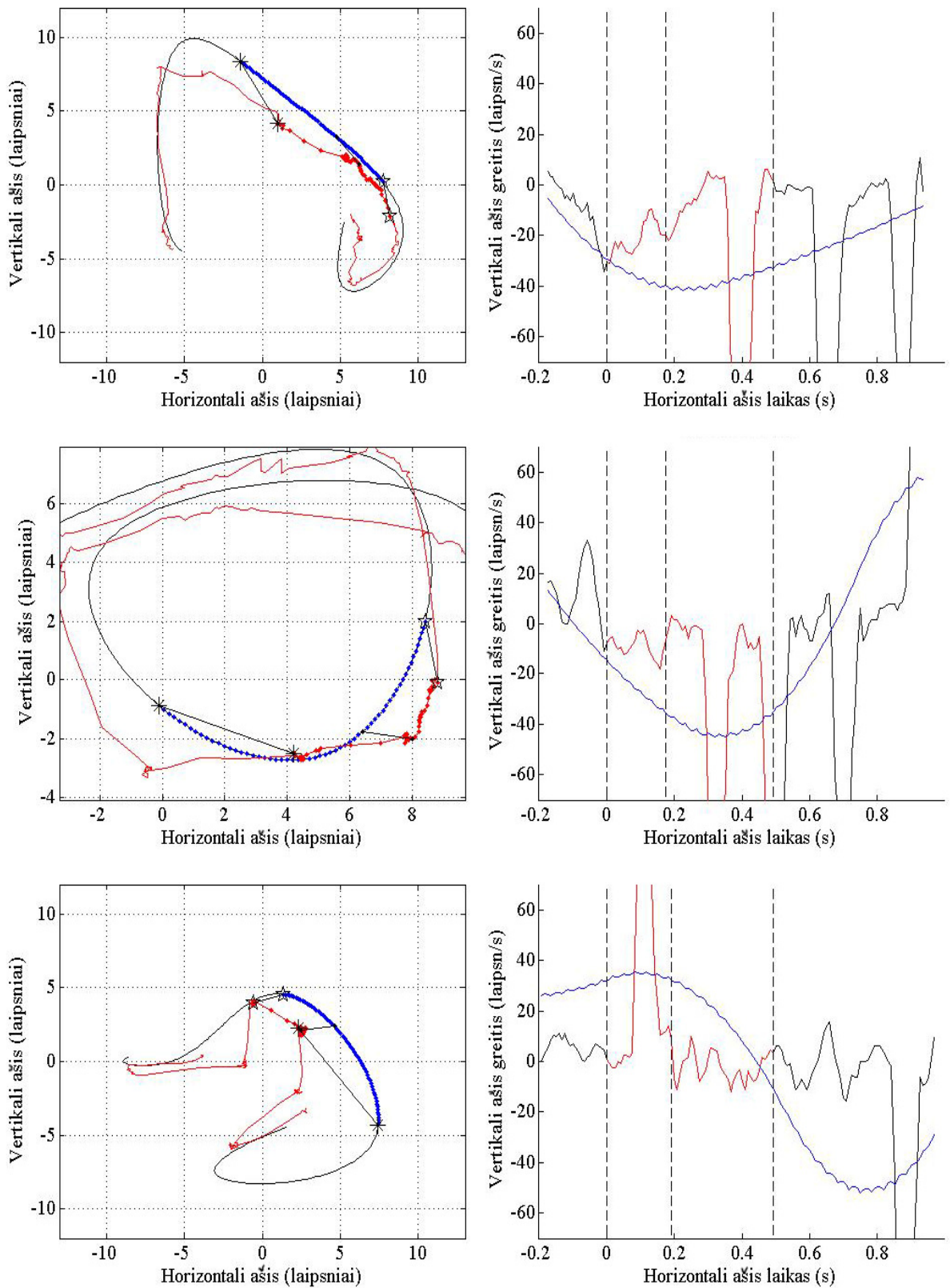
42 pav. Nefiltruotas akies greičio signalas. Taikinio judėjimo greitis – 20 laipsn/s

43 paveiksle vaizduojamas filtruotas (50 ms vidurkio sudarymo principu) akies greičio signalas, sekant taikinį.



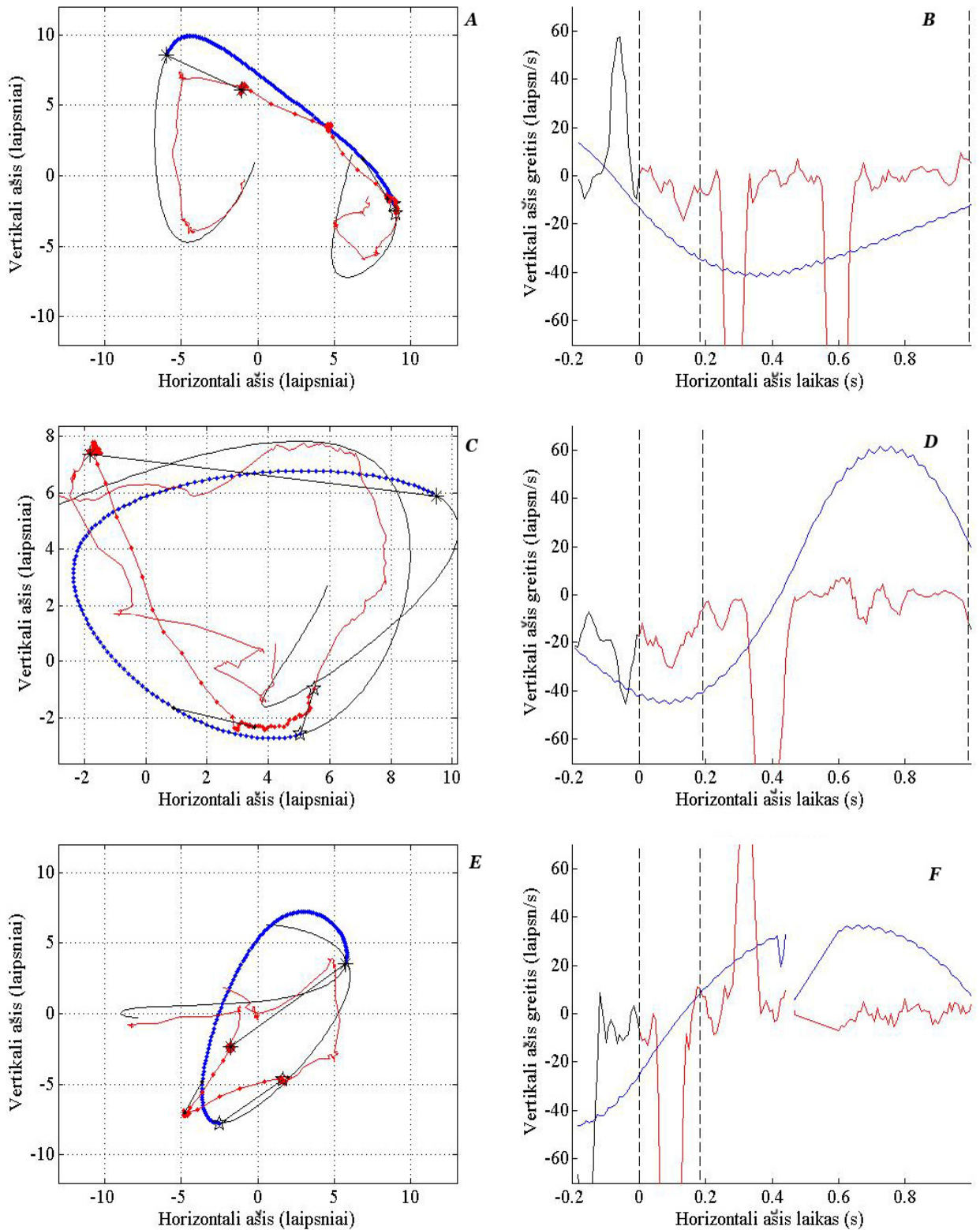
43 pav. Filtruotas akies greičio signalas – raudona linija. Mėlyna linija – taikinio trajektorija. Žalia – taikinio išnykimo vieta. Taikinio judėjimo greitis – 20 laipsn/s

44 paveiksle pateikti vieno iš tiriamųjų rezultatai – akies sekimo greičio (žr. B, D, F, H) ir padėčių grafikai (žr. A, C, E, G), sekant išnykusį taikinį 0.5 s. Taikinio judėjimo greitis – 20 laipsn/s



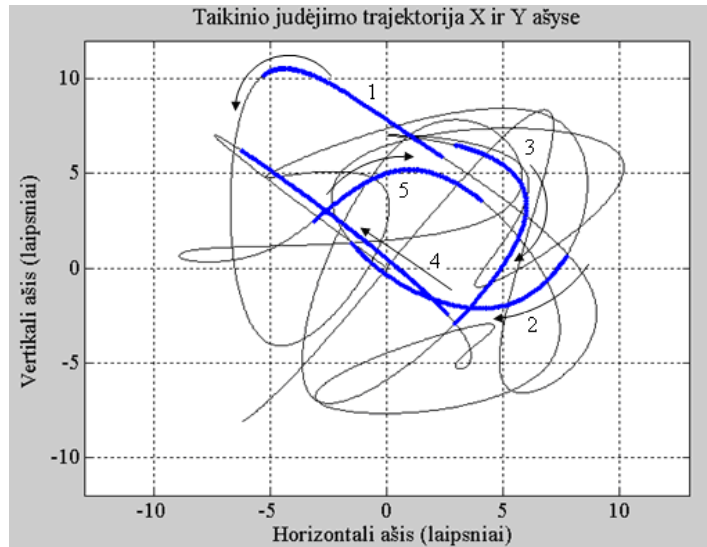
44 pav. Atvaizduotos akies sekimo greičio ir padėčių grafikai, sekant išnykusį taikinį. Judėjimo greitis 20 laipsn/s; Plona pilka linija vaizduoja matomą taikinio judėjimo trajektoriją, raudona – akies, mėlyna – taikinio išnykimą 0.5s;

45 paveiksle pateikti vieno iš tiriųjų rezultatai – akies sekimo greičio (žr. B, D, F, H) ir padėčių grafikai (žr. A, C, E, G), sekant išnykusį taikinį 1 s. Taikinio judėjimo greitis – 20 laipsn/s



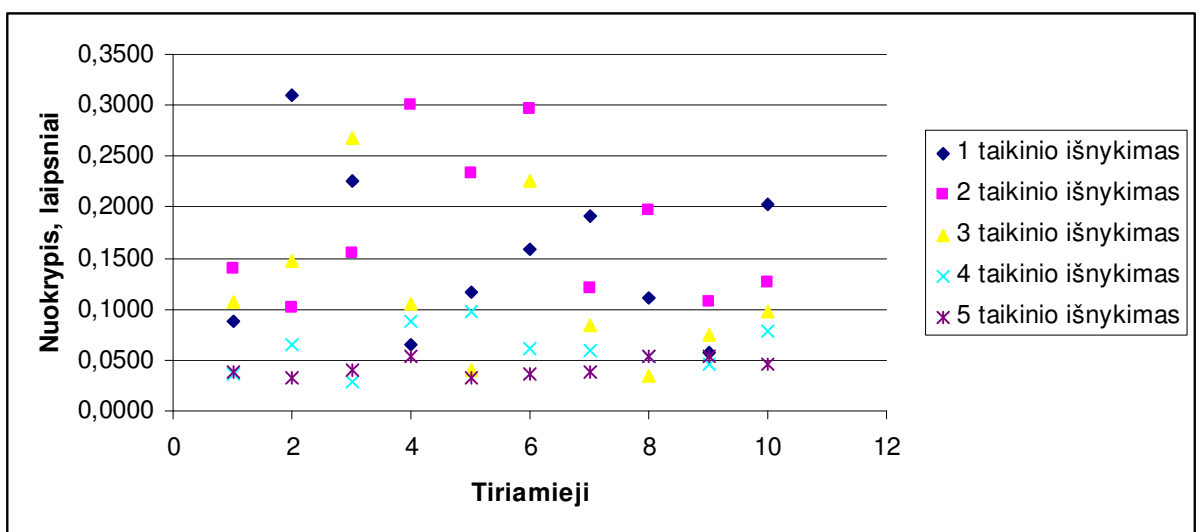
45 pav. Atvaizduotos akies sekimo greičio ir padėčių grafikai, sekant išnykusį taikinį. Judėjimo greitis 20 laipsn/s; Plona pilka linija vaizduoja matomą taikinio judėjimo trajektoriją, raudona – akies, mėlyna – taikinio išnykimą 1s;

Kokybinei gautų rezultatų sekimo analizei apibendrinti buvo naudojamas standartinis nuokrypis (žr. (6)). Paveiksluose (žr. 47 – 51 pav.) pateikti visų 10 eksperimente dalyvavusių tiriamųjų akies taikinio sekimo standartiniai nuokrypiai (arba vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai), kurie parodo atsitiktinio dydžio įgyjamų reikšmių sklaidą apie vidurkį. 46 paveiksle atvaizduotos 5 taikinio išnykimo vietos ir sužymėtos numeriais, pagal eiliškumą.

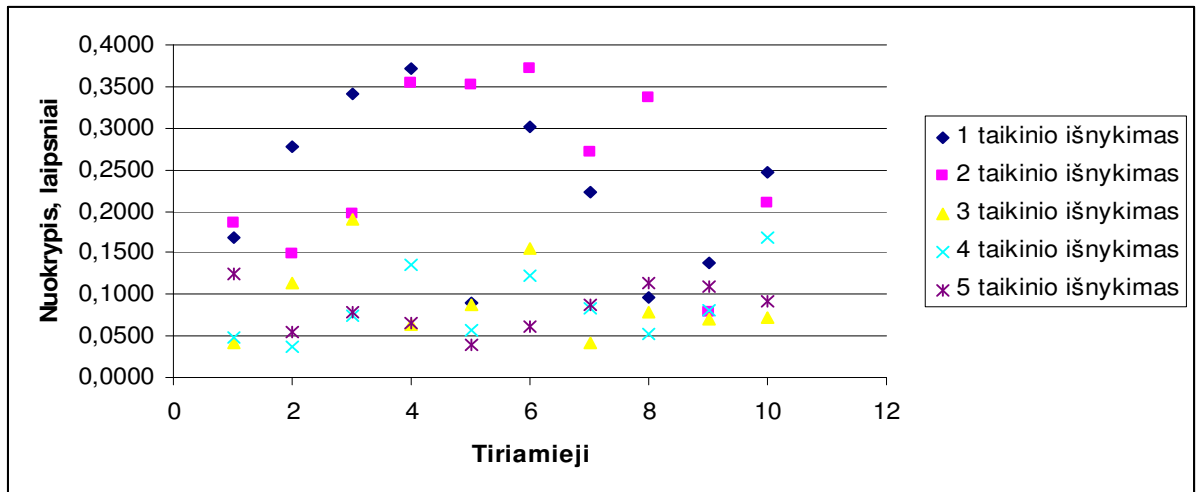


46 pav. Taikinio judėjimo trajektorija. Taikinio išnykimai vaizduojami mėlyna linija, sužymėti numeriais pagal eiliškumą.

Paveiksluose (žr. 47 ir 49 pav.) pateikti akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartiniai nuokrypiai 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios, pagal X ir Y ašis. Taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s. Skirtingos figūros diagramoje žymi skirtingas taikinio išnykimo vietas, kurios yra atvaizduotos aukščiau paveiksle (žr. 46 pav.). Standartinio nuokrypio išsidėstymas pateiktas laipsniais.

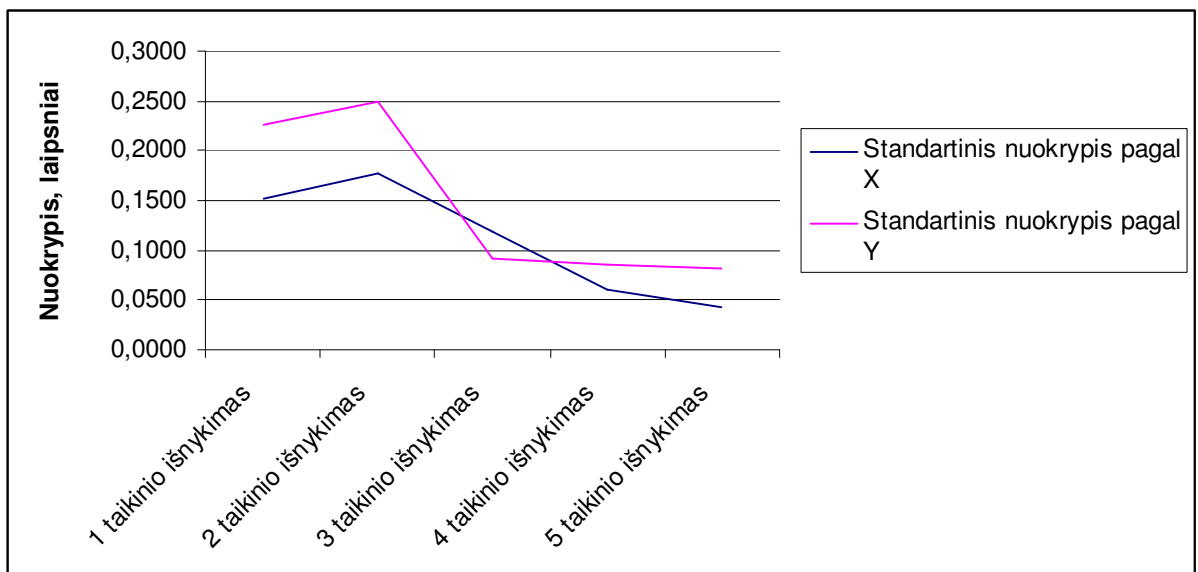


47 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal X, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios.



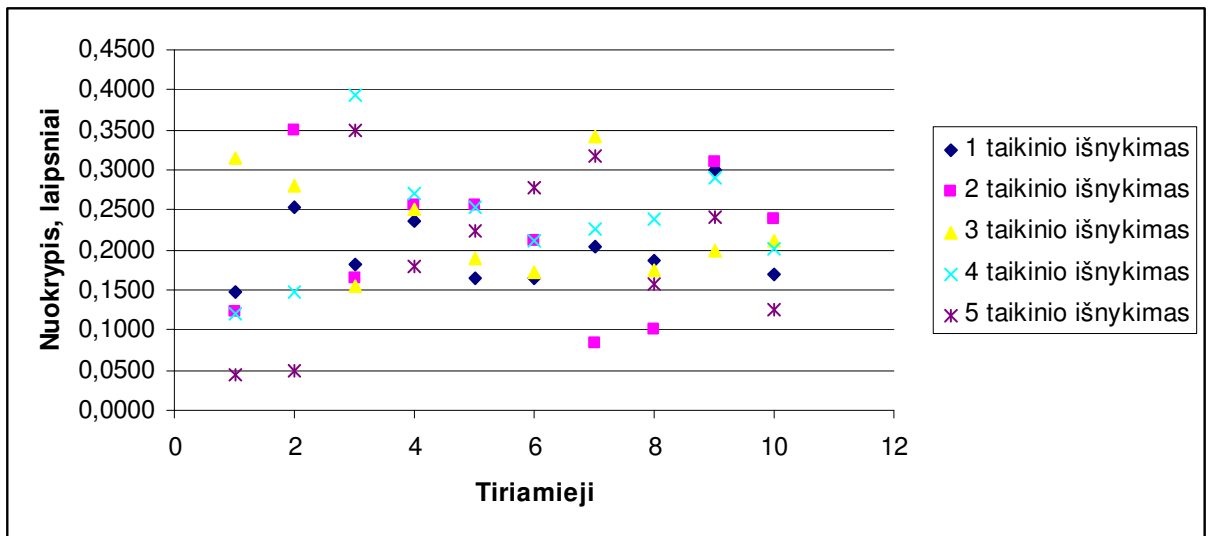
48 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal Y, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios.

49 paveiksle pateikiamas akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Mėlyna linija žymi standartinę nuokrypį pagal X, violetinė standartinę nuokrypį pagal Y. Diagramoje matome, kad standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,05 iki 0.25 laipsnių, kai taikinio judėjimo greitis yra 10 laipsn/s.



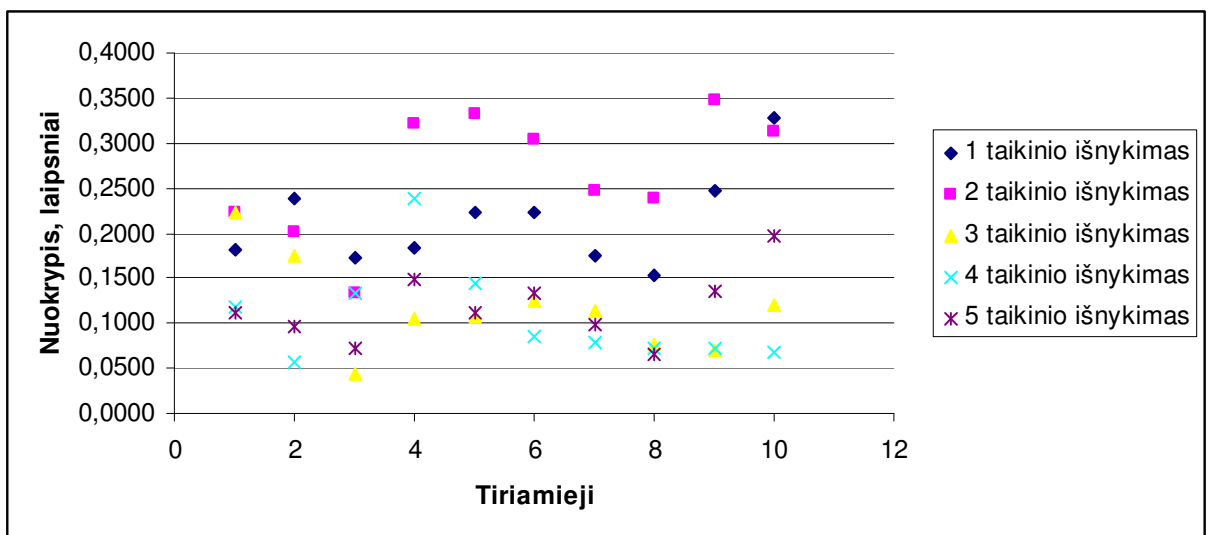
49 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Judėjimo greitis 10 laipsn/s. Mėlyna linija – standartinis nuokrypis pagal X, violetinė – standartinis nuokrypis pagal Y.

Paveiksluose (žr. 50 ir 51 pav.) palyginimui pateikti akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartiniai nuokrypiai prieš taikinį išnykstant, pagal X ir Y ašis. Skirtingos figūros diagramoje žymi skirtingas taikinio išnykimo vietas, kurios yra atvaizduotos aukščiau paveiksle (žr. 46 pav.).



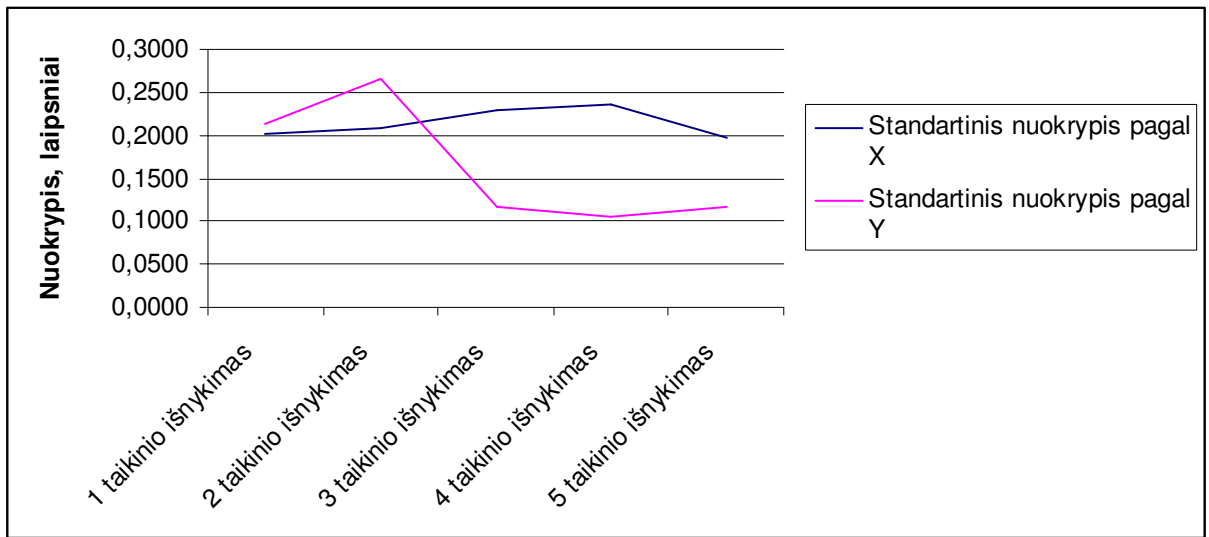
50 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal X, prieš taikinio išnykimą.

Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio išsidėstymas pateiktas laipsniais. Diagramose matome, jog standartinis nuokrypis svyruoja nuo ~ 0,05 iki 0,35 laipsnių. Lyginant su rezultatais, gautais, kai taikinas buvo sekamas pradingęs pirmąsias 200 ms, standartinių nuokrypių paklaidos tarp šių dviejų palyginimų yra mažos (vidutiniškai 0.5 laipsn.).



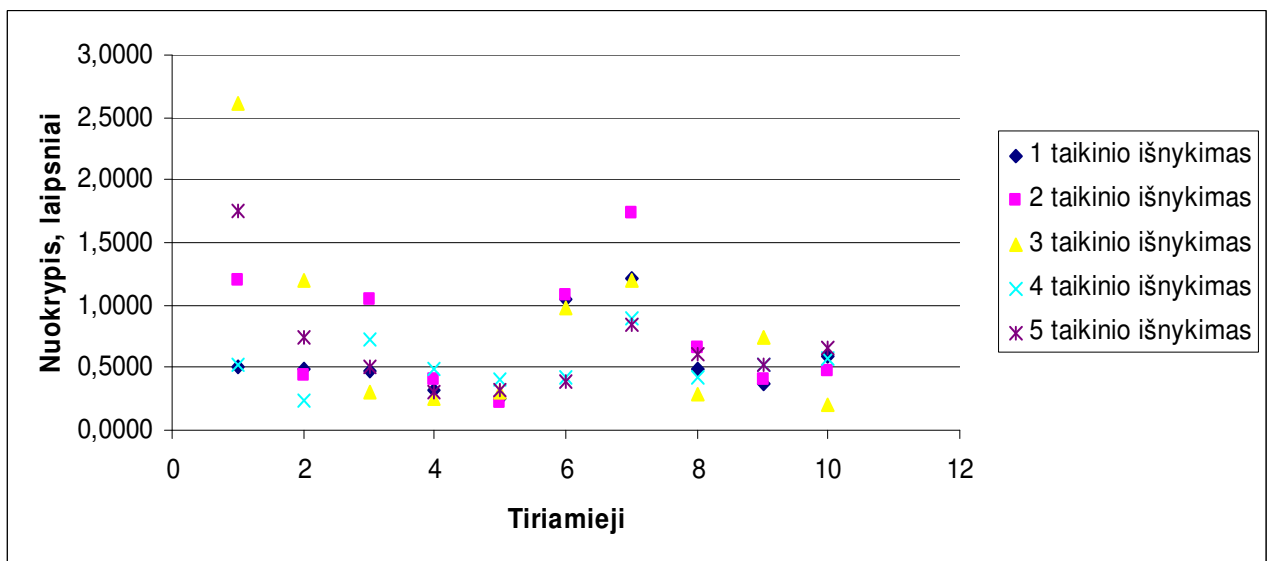
51 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal Y, prieš taikinio išnykimą.

52 paveiksle pateikiamas akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Mėlyna linija žymi standartinį nuokrypį pagal X, violetinė – standartinį nuokrypį pagal Y. Diagramoje matome, jog standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,1 iki 0,25 laipsnių, kai taikinio judėjimo greitis yra 10 laipsn/s.

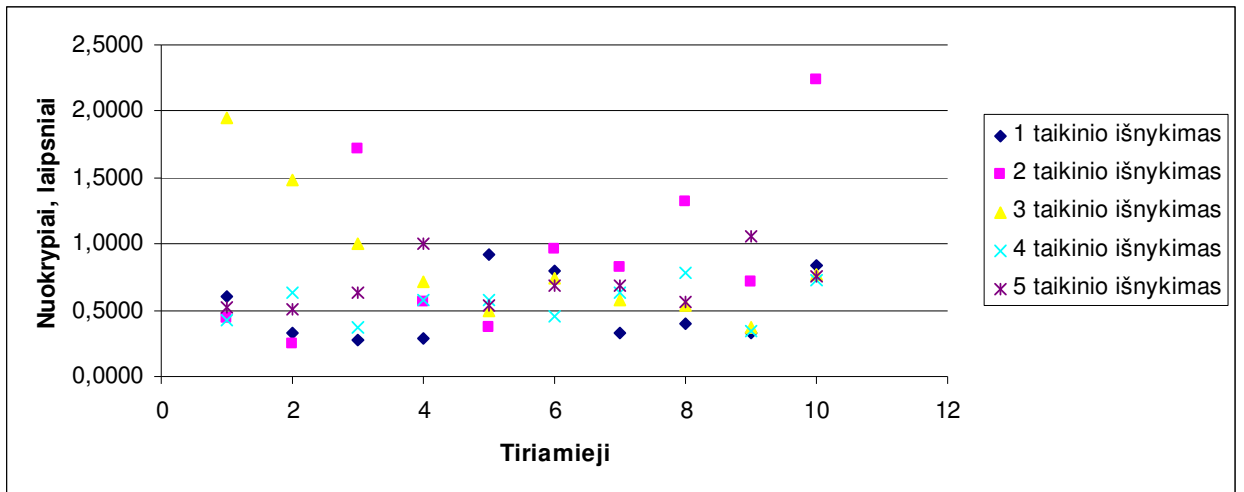


52 pav. Standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Judėjimo greitis 10 laipsn/s. Mėlyna linija – standartinis nuokrypis pagal X, violetinė – standartinis nuokrypis pagal Y.

Paveiksluose (žr. 53 ir 55 pav.) pateikti akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartiniai nuokrypiai 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios, pagal X ir Y ašis. Taikinio judėjimo greitis 20 laipsn/s. Skirtingos figūros diagramoje žymi skirtingas taikinio išnykimo vietas, kurios yra atvaizduotos aukščiau paveiksle (žr. 46 pav.). Standartinio nuokrypio išsidėstymas pateiktas laipsniais.

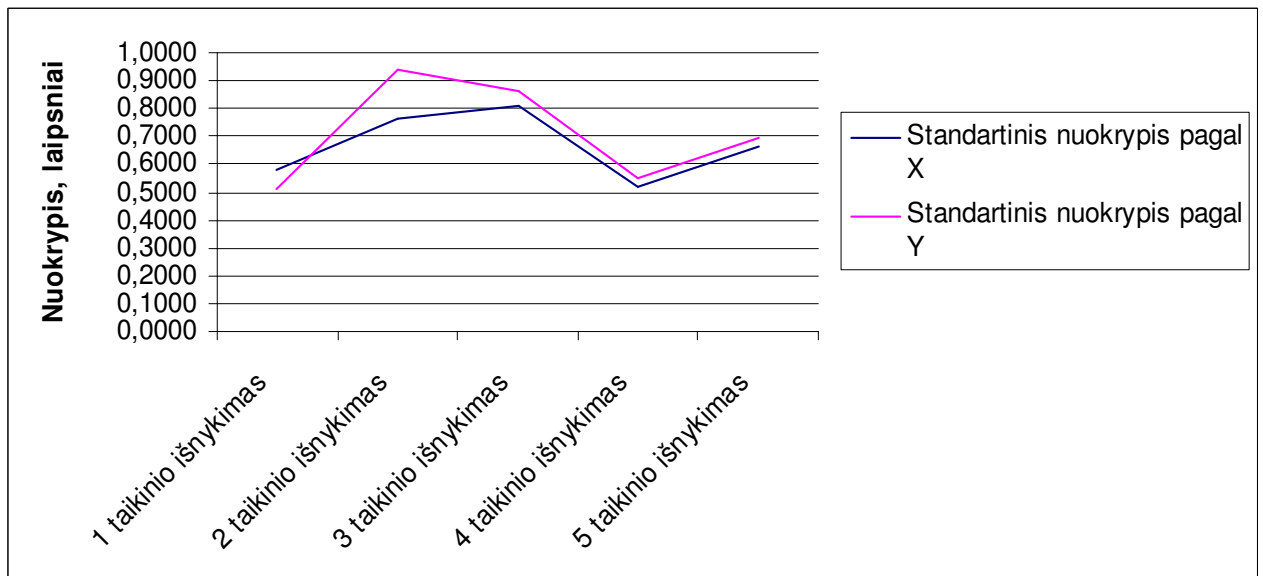


53 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal X, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios. Taikinio judėjimo greitis 20 laipsn/s



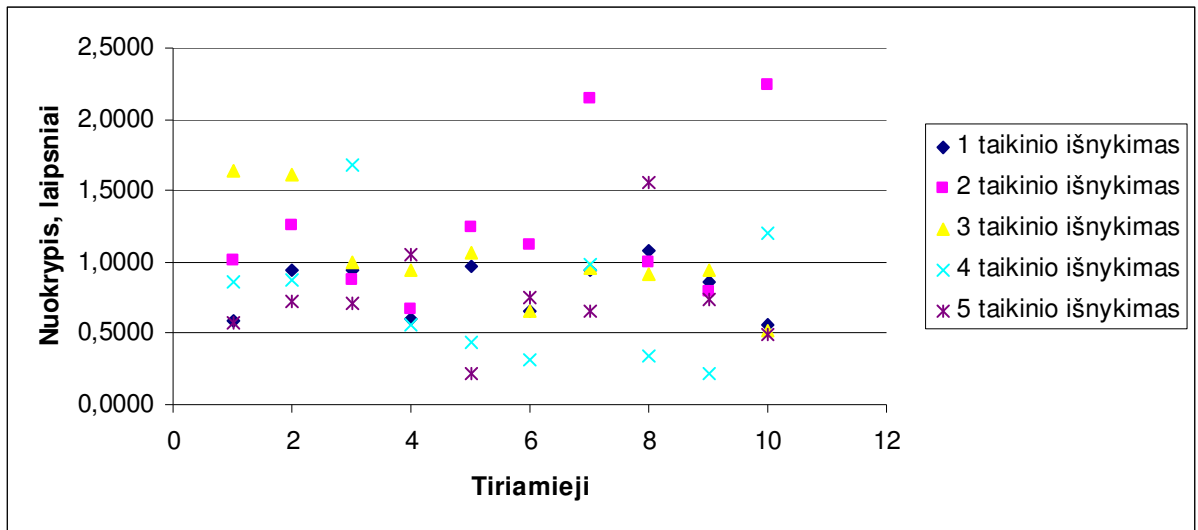
54 pav. Standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal Y, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios. Taikinio judėjimo greitis 20 laipsn/s

55 paveiksle pateikiamas akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Mėlyna linija žymi standartinę nuokrypį pagal X, violetinė standartinę nuokrypį pagal Y. Diagramoje matome, kad standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,6 iki 1 laipsnio, kai taikinio judėjimo greitis yra 20 laipsn/s.



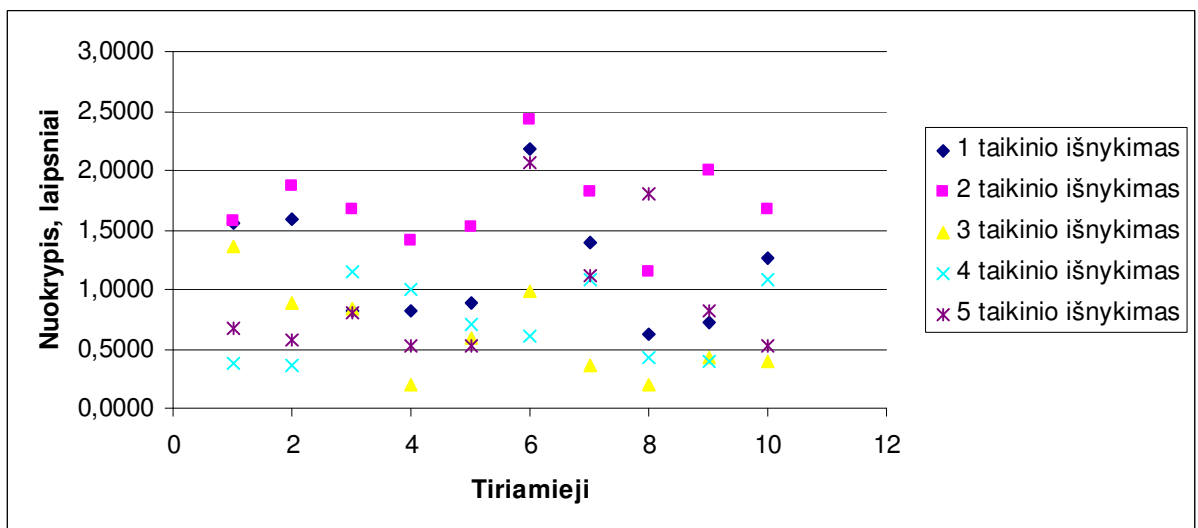
55 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Judėjimo greitis 20 laipsn/s. Mėlyna linija – standartinis nuokrypis pagal X, violetinė – standartinis nuokrypis pagal Y.

Paveiksluose (žr. 56 ir 58 pav.) palyginimui pateikti akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartiniai nuokrypiai prieš taikiniai išnykstant, pagal X ir Y ašis. Skirtingos figūros diagramoje žymi skirtingas taikinio išnykimo vietas, kurios yra atvaizduotos aukščiau paveiksle (žr. 46 pav.).



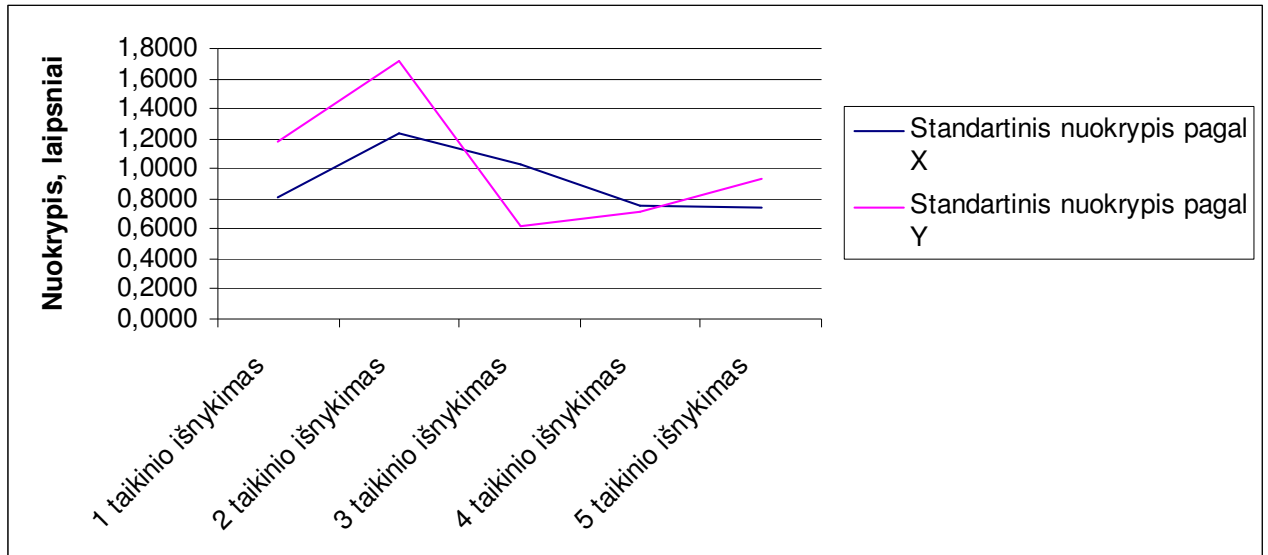
56 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal X, prieš taikinio išnykimą.

Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio išsidėstymas pateiktas laipsniais. Diagramose matome, jog standartinis nuokrypis svyruoja nuo ~ 0,5 iki 2,3 laipsnių pagal X ir nuo ~ 0,5 iki 2,5 laipsnių pagal Y. Lyginant su rezultatais, gautais, kai taikinis buvo sekamas pradingęs pirmąsias 200 ms, standartinių nuokrypių paklaidos tarp šių dviejų palyginimų yra mažos (vidutiniškai 1 laipsn.).



57 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio pasiskirstymas pagal Y, prieš taikinio išnykimą.

58 paveiksle pateikiamas akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Mėlyna linija žymi standartinį nuokrypį pagal X, violetinė – standartinį nuokrypį pagal Y. Diagramoje matome, kad standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,7 iki 1,7 laipsnių, kai taikinio judėjimo greitis yra 20 laipsn/s.



58 pav. Akies žvilgsnio sekimo paklaidų standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas. Judėjimo greitis 20 laipsn/s. Mėlyna linija – standartinis nuokrypis pagal X, violetinė – standartinis nuokrypis pagal Y.

Atlikti eksperimentiniai tyrimai Šiaulių universiteto „BIMC“, kurių pagrindinis tikslas buvo iširti sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos savybes tuo metu, kai sekamas taikiny s pradingsa. Eksperimentuose dalyvavo 10 tiriamųjų, kurie iš anksto nebuvo paruošti bandymams, tik buvo supažindinti su naudojama įranga ir taisyklėmis. Visi iš jų eksperimentą vykdė ir dirbo su JAV firmos „LC Technologies the eyegaze development system“ žvilgsnio krypties registravimo įtaisu pirmą kartą. Supažindinimui su naudojama įranga, buvo naudojama sistemos demonstracinė versija. Vienas tiriamasis vykdydamas eksperimentus vidutiniškai užtruko 30 minučių. Bendras taikinio išnykimų skaičius visiems tiriamiesiems – 500 kartų. Bandymų metu gauta 100 failų, tinkančių tolimesniam duomenų apdorojimui ir kiekybinių charakteristikų nustatymui. Tyrimai buvo atliekami penkiomis skirtingomis taikinio išnykimo trukmėmis, kurios svyravo nuo 500 iki 1500 ms. Darbe pateikti gauti rezultatai esant taikinio išnykimo trukmėms 500 ir 1000 ms. Eksperimentuose buvo naudojama viena neprognozuojama trajektorija, kuria taikiny s judėjo dviem skirtingais greičiais – 10 ir 20 laipsn/s.

Paveiksluose, nuo 34 iki 37 gauti, išanalizuoti ir apdoroti duomenys, kuriuose matome akies ir taikinio pozicijas pateiktas laipsniais. Pagal gautas taikinio ir akies pozicijas laipsnių atžvilgiu, rasta tendencija, jog trajektorijos prognozė leidžia sekti pranykusį taikinį apie 200 ms. Kai okulomotorinė sistema nebesugeba sekti išnykusio taikinio, žvilgsnis nukreipiamas nuo prieš tai buvusios trajektorijos, o taip pat nuo ekrano kraštų. Praėjus vidutiniškai 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios, žmogaus okulomotorinė sistema akių sakadų ir pasivejančių sakadų pagalba bando nuspėti taikinio

menamą vietą – atlieka tariamus šuolius, kur galėtų būti dingęs taikiny. Tai yra dėl ilgalaikėje atmintyje sukauptos tikimybės, jog taikiny pasirodys netoli ekrano centro. Išanalizavus visų tiriamųjų gautus rezultatus, matoma, kad akies žvilgsnio sekimas taikiniui išnykus taip pat yra įtakojamas pačios trajektorijos. Taikiniui judant tiese arba apskritimu, ir išnykus, sekimo paklaida yra nedidelė, tačiau kai taikiny juda „staigių kilpų“ formomis ir tuo metu įvyksta pradingimas, sekimo paklaida didėja.

Paveiksluose, nuo 38 – 45 pateikti akies sekimo greičiai taikinio išnykimo metu. Pastebėta, jog sekimui įtakos turi taikinio judėjimo greitis. Didėjant greičiui žmogaus okulomotorinė sistema sunkiau geba prognozuoti tolimesnę taikinio judėjimo trajektoriją. Galima teigti jog optimalus taikinio judėjimo greitis, kada pasiekiami geriausi sekimo rezultatai, yra 10 laipsn/s. Pirmąsias 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios akies sekimo greitis beveik vienodas kaip ir taikinio judėjimo greitis, tačiau po šio laiko tarpo akies sekimo greitis ima eksponentiškai mažėti, artėti prie nulio. Vėl atsiradus taikiniui vidutiniškai po 100 ms akies sekimo greitis vėl ima didėti. Tariamus akių šuolius matome ir greičio grafikuose. Vidutinis laikas tarp paskutinės akių sakados prieš taikiniui dingstant ir pirmosios taikinio išnykimo pradžios yra 80 ms. Praėjus vidutiniškai 400 ms nuo taikinio išnykimo pradžios įvyksta viena arba dvi sakados (retu atveju trys), kurių pagalba akis bando nuspėti dingusio taikinio menamą vietą. Sakadų metu akies greitis žymiai padidėja.

Paveiksluose, nuo 47 iki 58 palyginimui pateikti standartiniai nuokrypiai prieš taikiniui išnykstant ir 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios, pagal X ir Y ašis. Pastebėta, jog standartinio nuokrypio vertės didėja, esant didesniai taikinio judėjimo greičiui. Rasta, jog standartinis nuokrypis priklauso nuo taikinio judėjimo trajektorijos sudėtingumo. Kai taikiny juda lengviau nuspėjama trajektorija, vidutinis kvadratinis nuokrypis yra mažesnis, lyginant su taikinio pradingimo sudėtingesnėmis vietomis, tokiomis kaip „staigios kilpos“. Diagramose, 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios (žr. 49 ir 55 paveikslus) matome, kad standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,05 iki 0,25 laipsnių, kai taikinio judėjimo greitis yra 10 laipsn/s. Esant 20 laipsn/s standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,6 iki 1 laipsnio. Palyginimui pateiktas standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas prieš taikiniui išnykstant. Kai taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,1 iki 0,25 laipsnių. 20 laipsn/s – nuo ~ 0,7 iki 1,7 laipsnių.

5. APIBENDRINIMAS IR IŠVADOS

1. Literatūros analizė ir kitų autorių atlikti tyrimai parodė, jog sekimo akių judesių kontrolės sistemos tyrimai tuo metu, kai taikinyš išnyksta, dar tik pradedami. Artimiausias mano darbui eksperimentas atliktas, trijų Belgijos tyrėjų (Orban de Xivry, J.J., Missal, M., Lefèvre, Ph.) iš katalikiškojo Louvain universiteto. Iki šiol akies žvilgsnio sekimui su išnykstančiais taikiniais eksperimentiniuose tyrimuose buvo naudojama nuspėjama trajektorija.
2. Darbo užduoties – sekamųjų akių judesių kontrolės sistemos savybių tyrimams tuo metu kai sekamas taikinyš atsitiktine trajektorija pradingsta – Šiaulių BIMC laboratorijoje sudarytas standas eksperimentams atlikti.
3. Eksperimentai atlikti su 10 tiriamųjų. Išanalizuotos ir įvertintos jų žvilgsnio sekimo savybės ir kiekybinių charakteristikų parametrai, kai taikinyš buvo išnykęs.
4. Tyrime buvo naudojama atsitiktinė nuspėjama trajektorija, su taikinio išnykimais 500 ir 1000 ms. Pasirinkti du taikinio judėjimo greičiai 10 ir 20 laipsn/s. Objekto judesio numatymas leidžia sekti objektą jam pranykus. Praėjus vidutiniškai 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios, žmogaus okulomotorinė sistema akių sakadų ir pasivejančių sakadų pagalba bando nuspėti taikinio menamą vietą. Po šio laiko tarpo taikinio padėties nuspėjimas yra sąlygotas tikimybės, jog taikinyš vėl pasirodys. Akis atlieka tariamus šuolius, kur galėtų būti dingęs taikinyš. Tai yra dėl ilgalaikėje atmintyje sukauptos tikimybės, jog taikinyš pasirodys netoli ekrano centro. Objekto judesio numatymas leidžia sekti objektą jam pranykus.
5. Pirmąsias 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios akies sekimo greitis beveik vienodas kaip ir taikinio judėjimo greitis, tačiau po šio laiko tarpo akies sekimo greitis ima eksponentiškai mažėti, artėti prie nulio. Kai taikinyš nėra matomas, akis atlieka šuolius (sakadas) į tariamas vietas, kur galėtų būti taikinyš. Vidutinis laikas tarp paskutinės akių sakados prieš taikiniui dingstant ir pirmosios taikinio išnykimo pradžios yra 80 ms. Praėjus vidutiniškai 400 ms nuo taikinio išnykimo pradžios įvyksta viena arba dvi sakados (retu atveju trys), kurių pagalba akis bando nuspėti dingusio taikinio menamą vietą. Sakadų metu akies greitis žymiai padidėja.
6. Kai okulomotorinė sistema nebesugeba sekti išnykusio taikinio, žvilgsnis nukreipiamas nuo prieš tai buvusios trajektorijos, o taip pat nuo ekrano kraštų, didėja paklaida tarp akies sekimo ir taikinio judėjimo trajektorijų. Tai yra dėl ilgalaikėje atmintyje sukauptos tikimybės, jog taikinyš pasirodys netoli ekrano centro. Šis teiginys atitinka Bejeso sprendimų teorijos principus.
7. Pastebėta, jog standartinio nuokrypio vertės didėja, esant didesniam taikinio judėjimo greičiui. Rasta, jog standartinis nuokrypis priklauso nuo taikinio judėjimo trajektorijos sudėtingumo. 200 ms nuo taikinio išnykimo pradžios standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,1 iki 0.25 laipsnių, kai taikinio judėjimo greitis yra 10 laipsn/s. Esant 20

laipsn/s standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,6 iki 1 laipsn. Palyginimui pateiktas standartinio nuokrypio vidurkių pasiskirstymas prieš taikiniui išnykstant. Kai taikinio judėjimo greitis 10 laipsn/s pasiskirstymas svyruoja nuo ~ 0,1 iki 0.25 laipsnių. 20 laipsn/s – nuo ~ 0,7 iki 1,7 laipsnių.

LITERATŪRA

1. Baixauli, V.M., Negri, M. (1999). *Anatomija. Žmogus. Iliustruotas žinynas*. Kaunas: Šviesa.
2. Bennett, S.J., Orban de Xivry, J.J., Graham, R.B., Lefèvre, Ph. (2007). Target Acceleration Can Be Extracted and Represented Within the Predictive Drive to Ocular Pursuit. *Journal of Neurophysiology*, Nr 6 (98). – p. 1405–1414.
3. Burnie, D. (2001). *Žmogaus kūnas. Mokslinė enciklopedija*. Vilnius: Alma littera.
4. Damiam, A., (2009). Averted Vision – Friend or Fovea? [interaktyvus]. [žiūrėta 2012.03.02]. Prieiga per internetą: <<http://www.somewhereville.com/?p=805>>.
5. Enderle, J.D. (2010). *Models of Horizontal Eye Movements, Part I: Early Models of Saccades and Smooth Pursuit*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2011.10.17]. Prieiga per internetą: <www.morganclaypool.com>.
6. LC Technologies, Inc. (2003). Section 2: User's manual. The eyegaze development system for Windows NT/2000. Fairfax, Virginia 22031–4713 U.S.A.
7. Laurutis, V., (1996) Bekontakčiai akių judesių registravimo metodai. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392–1215 p. 42–45.
8. Laurutis, V., Daunys, G., (1996). Akių judesių kontrolės sistemos savybės, sekant dvikoordinate trajektorija judantį taikinį. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392–1215 p. 55–63.
9. Laurutis, V., Daunys, G., Zemblys, R. (2010). Quantitative Analysis of Catch-up Saccades Executed during Two-dimensional Smooth Pursuit. *Electronics and electrical engineering*. Kaunas: Technologija. Nr. 2(98). – p. 83–86.
10. Laurutis, V., Lakiūnaitė, N., Zemblys, R. (2010). *Šuolinių akių judesių okulomotorinio kanalo informacijos praleidžiamoji geba*. Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje: [konferencijos medžiaga]. T. 7. ISSN 1822-4652 p. 190-194.
11. Laurutis, V., Zemblys, R. (2009). Bayesian Decision Theory Application for Double-step Saccades. *Electronics and electrical engineering*. Kaunas: Technologija. Nr. 4(92). – p. 99–102.
12. Laurutis, V., Zemblys, R. (2009). *Catch-up saccades during two-dimensional smooth pursuit*. Conference „Biomedical Engineering“: [interaktyvus]. [žiūrėta 2012.02.03]. Prieiga per internetą: <<http://bimc.su.lt/lt/pub/50-p1e/58-catch-up-saccades-during-two-dimensional-smooth-pursuit>>.
13. Laurutis, V., Zemblys, R. (2010). Informational characteristics of double-step saccadic eye movements. *Information Technology and Control*. ISSN 1392-1241 p. 55–60.
14. Laurutis, V., Zemblys, R., Niauronis, S. (2010). Quantitative Analysis of Two-Dimensional Catch-Up Saccades Executed to the Target Jumps in the Time-Continuous Trajectory. *Medicon*. ISBN 9783642130380 p. 1-4.

15. Orban de Xivry, J.J., Bennett, S.J., Lefèvre, Ph. (2005). Evidence for Synergy Between Saccades and Smooth Pursuit During Transient Target Disappearance. *Journal of Neurophysiology*, Nr 9 (95). – p. 418–427.
16. Orban de Xivry, J.J., Missal, M., Lefèvre, Ph. (2008). A dynamic representation of target motion drives predictive smooth pursuit during target blanking. *Journal of Vision*, p. 1–13.
17. Stankus, A., Didžiokas, R. (2010). *Biomechatronika*. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
18. Vigue, M., (2006). *Žmogaus kūno atlasas. Mokslinė enciklopedija*. Vilnius. Mūsų knyga.