

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**ELEKTRONIKOS KATEDRA**

Andrius Šimaitis

**ŽMOGAUS SENSOMOTORINIŲ SISTEMŲ INFORMACINIS**  
**VERTINIMAS**  
Magistro darbas

Vadovas

prof. V. Laurutis

ŠIAULIAI, 2009

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**ELEKTRONIKOS KATEDRA**

**TVIRTINU**  
Katedros vedėjas

doc. dr. G. Daunys

2009 06

**ŽMOGAUS SENSOMOTORINIŲ SISTEMŲ INFORMACINIS**  
**VERTINIMAS**  
Magistro darbas

**Vadovas**

prof. V. Laurutis

2009 06

**Atliko**

RM7 gr. stud.

**Recenzentas**

prof. V. Lauruška

Andrius Šimaitis

2009 06

2009 06

ŠIAULIAI, 2009

Šimaitis A. Information evaluation of the human sensorimotor systems. Master thesis of electronics / research advisor habil. dr. V. Laurutis, Šiauliai University, Faculty of Technology, Electronics department. Šiauliai, 2009

## SUMMARY

In this research information theory concepts are used to determinate discreet and continuous eye and hand of the human movements control systems. In this research target jumping from one position to another (discreet tracking experiment) or slow target movement trajectory (continuous tracking experiment) on the screen is defined as input or source information, eye or hand response trajectory on the screen – as output information and difference between them – as lost information. Information amount transferred over eye or hand sensorimotor channels is defined as difference between input and lost information rates. Channel information capacity of the eye or hand sensorimotor system is defined as maximum transferred information over sensorimotor channel during unit of time.

Experimental investigation let us formulate that largest channel information capacity of the discreet tracking eye movements is 4,9 bits/sec, when intersaccadic interval is 0,3 sec. Largest channel information capacity of the discreet tracking hand is 6,5 bits/sec, when intersaccadic interval is 0,25 sec.

During human's eye and hand tracking responses to the continuously moving target, eye and hand sensorimotor control systems have largest channel capacities 7,9 bits/sec and 6,5 bits/sec respectively, when target movement largest velocity 30 deg/sec.

## TURINYS

ĮVADAS .....	5
1 ŽMOGAUS SENSOMOTORINĖS SISTEMOS SAVYBĖS .....	7
1.1 Akių judesiai kaip sensomotorinė sistema .....	7
1.2 Žmogaus ranka kaip sensomotorinės sistemos motorinis elementas .....	8
1.3 Žmogaus akis ir jos judesiai .....	10
2 INFORMACIJOS TEORIJA IR JOS PANAUDOJIMAS ŽMOGAUS SENSOMOTORINĖMS SISTEMOMS VERTINIMUI .....	16
2.1 Informacijos kiekis .....	16
2.2 Entropija. Sąlyginė entropija (neapibrėžtumas) .....	17
2.3 Informacijos teorijos panaudojimas sekimo judesiams aprašyti .....	19
2.4 Tolydaus sekimo teoriniai faktai .....	19
2.5 Diskretaus sekimo teoriniai faktai .....	21
3 AKIŲ IR RANKŲ JUDESIŲ INFORMACIJOS PRALEIDŽIAMOSIOS GEBOS NUSTATYMO METODIKA .....	23
3.1 Tyrimams naudojama akių sekimo sistema LC Technologies .....	23
3.2 Tolydus akių ir rankų sekamųjų judesių tyrimas .....	25
3.2.1 Eksperimento aprašymas .....	25
3.2.2 Rezultatai .....	34
3.3 Diskretus akių ir rankų sekamųjų judesių tyrimas .....	43
3.3.1 Eksperimento aprašymas .....	43
3.3.2 Rezultatai .....	54
IŠVADOS .....	59
LITERATŪRA .....	60

## IVADAS

Šiame darbe tyrinėjamos žmogaus akių ir rankų judesių kontrolės kaip okulomotorinės ir rankos sensomotorinės sistemų informacinės charakteristikos. Žmogus informaciją gali gauti per penkis pagrindinius jutiminius organus: regą, klausą, lytėjimą, kvapą ir skonį. Kadangi daugiausiai informacijos žmogus gauna iš aplinkos per regos sistema, buvo pasirinkta nagrinėti akies sensomotorinė (okulomotorinė) sistema. Rankų sensomotorinė sistema buvo pasirinkta norint nustatyti jos informacines charakteristikas, nes žmogaus galūnių (rankų ir kojų) judesius mokslininkai analizuoja norėdami gauti kuo efektyvesnius rezultatus žmogaus – mašinos sąveikoje, tarp jų ir žmogaus – kompiuterio sąveikoje. Pastaruoju metu šiose sistemose pradedama naudoti ir žiūros linijos kryptis.

Be abejo žmogus turi ribotas galimybes gauti informaciją per sensorinius elementus iš aplinkos ir apdoroti ją, po to atlikti motorinę funkciją. Todėl yra reikalinga nustatyti žmogaus sensomotorinės sistemos informacinį vertinimą pagal informacijos kiekį ir jos ribinę reikšmę, perduotą per sensomotorinį sistemą kaip ryšio kanalą. Šios savybės, sensomotorinio kanalo informacijos kiekis ir informacijos praleidžiamoji geba suteikia pranašumą todėl, kad nusakoma akių ir rankų judesių kontrolės sistema tikrai pagal vieną parametą, t.y. daromas paklaidas sekant taikinį.

Ši darbo tema yra aktuali, kadangi nustatoma ribinė žmogaus informacijos praleidžiamoji geba, eksperimentais nustatoma prie kokių taikinio greičių akis ir ranka nebesugeba sekti judančio taikinio trajektorijos ir pradeda daryti labai didelis paklaidas.

### **Darbo tikslas:**

Panaudojant informacijos teorijos principus iširti žmogaus akių ir rankos judesių kontrolės kaip okulomotorinės ir rankos sensomotorinės sistemų sugebėjimą sekti diskretiškai ir tolydžiai judantį taikinį ir nustatyti šių sistemų informacijos praleidžiamąją gebą.

### **Uždaviniai:**

1. Išanalizuoti žmogaus okulomotorinės ir rankos sensomotorinės sistemų neurofiziologinius mechanizmus sekimo režime.
2. Suformuluoti informacijos perdavimo teorijos principus sensomotorinių sistemų kaip informacijos perdavimo kanalų tyrimui.
3. Sudaryti eksperimentinį kompleksą, įgalinantį atlikti žmogaus okulomotorinės ir rankos sensomotorinės sistemų tyrimus šuolinių ir tolydinių taikinio judesio trajektorijų sekimo metu.

4. Eksperimentais nustatyti okulomotorinės ir rankos sensomotorinės sistemų sekimo judesių paklaidas, sekant tolydine trajektorija judantį taikinį prie skirtingų taikinio greičių.

5. Eksperimentais nustatyti okulomotorinės ir rankos sensomotorinės sistemų sekimo judesių paklaidas, sekant šuoliškai judantį taikinį esant skirtingiems intervalams tarp taikinio šuolių (taikinio pateikimo dažnių).

6. Pritaikius informacijos perdavimo teoriją, nustatyti okulomotorinės ir rankos sensomotorinės sistemų kaip informacijos perdavimo kanalų perduodamos informacijos kiekį ir informacijos praleidžiamąją gebą tolydinėmis ir šuolinėmis trajektorijomis judantiems taikiniams.

Nagrinėjant akies ir rankos sugebėjimą sekti taikinius buvo pasirinkta eksperimentų atlikimo metodika. Akių judesiai visuose bandymuose buvo registruojami naudojant LC Technologies, Ltd sukurta akių judesių sekimo sistema EyeGaze System. Sekimas ranka buvo vykdomas valdant kompiuterio kursorių pelės pagalba, registruojant kursoriaus koordinates į tekstinį failą. O taikinio trajektorijos koordinatės ir sekimo akimi ar ranka koordinatės interpretuojamos panaudojant informacijos teorijos savybes. Taikinio judėjimo trajektorija  $T$  ekrane būtų apibrėžta kaip žmogaus sensomotorinės sistemos šaltinis ar įėjimo informacija, o sekimo akimi ar ranka trajektorija ekrane  $A$  kaip išėjimo informacija ir skirtumas tarp jų kaip prarasta informacija  $L$ . Kai taikinio greitis padidinamas, ar taikinio trajektorija taptų sudėtingesnė arba diskrečiam atvejui padidintume taikinių atsiradimo dažnį, šaltinio informacijos kiekis padidėtų, žmogaus judesių kontrolės sistema taptų nebegebanti sekti taikinį ir skirtumas tarp taikinio ir akių ar rankos padėčių padidėtų, tuo pačiu prarasta informacija taptų didesnė. Tai leido suformuluoti išvadą, kad žmogaus tolydaus ir diskretaus sekimo akių judesių ir rankos judesių kontrolės sistema turi kanalo informacijos gebos ribą ir gali būti panaudota, kaip svarbi savybė nustatyti akių judesių ir rankų judesių kontrolės sistemą [1].

# 1 ŽMOGAUS SENSOMOTORINĖS SISTEMOS SAVYBĖS

## 1.1 Akių judesiai kaip sensomotorinė sistema

Regos sistema žmogaus gyvenime yra viena iš svarbiausių, kadangi žmogus ne tik gauna reikiamą informaciją, bet ir orientuojasi erdvėje. Akies tinklainė turi apie 2000 tūkstančius receptorių. Daugiausiai receptorių akies tinklainėje sutelkta jos centrinėje dalyje – geltonojoje dėmėje (fovea). Skirtinga receptorių koncentracija tinklainės centre ir aplink ją suformuoja centrinį ir periferinį matymą. Centrinis matymas suteikia galimybę matyti daiktus aiškiai, o periferinis – plačiame matymo lauke. Centrinio matymo metu akį reikia nukreipti į pasirinktą objektą, o tuomet akies optinė sistema sufokusuoja jį foveoje. Žmogus savo žvilgsnį gali nukreipti pasukdamas kūną, galvą bei akis. Galva ir akys, valdant žvilgsnio kryptį, pasižymi dideliu koordinuotumu, greičiu ir tikslumu, todėl jie gali būti laikomi pagrindiniais žvilgsnio krypties valdymo sistemos elementais.

Rega iš esmės yra laikoma sensoriniu elementu, nes ji suteikia daugiausiai informacijos apie mus supantį pasaulį. Tačiau dėl gerai išvystyto centrinio matymo ir dėl to atsiradusio poreikio nukreipti žvilgsnį į pasirinktą objektą, regos sistema taip pat pasižymi geromis motorinėmis savybėmis. Nors kitos žmogaus sensorinės sistemos: klausa, uoslė, lytėjimas, skonis dėka savo jutiminių organų taip pat pagal poreikį gali keisti savo padėtį, tačiau šios dvigubos savybės – sensorinė ir motorinė – sunkiai sulyginamos su regos sistemos judėjimo dinaminėmis galimybėmis. Tokiu būdu regos sistemą išskirtinai galime laikyti kartu turinčią geras tiek sensorines, tiek motorines savybes. Nesunku suprasti, kad tiriant regos sistemą mokslininkų dėmesį traukia ne tik labai geros regėjimo savybės, bet ir regos sistemos krypties (akių ir galvos posūkių) valdymo galimybės. Žiūros linijos krypties valdymo sistema kaip regos sistemos motorinė dalis yra vadinama okulomotorine sistema. Ši sistema buvo pradėta tirti susidomėjus žmogaus akių judesiais ir jų savybėmis. Buvo nustatyta, kad akių judesių valdymo sistema turi kelias posistemas. Tai fiksacinių, šuolinių (sakadinių), sekimo akių judesių posistemės. Išskirtinis vaidmuo valdant žiūros linijos kryptį tenka vestibulariniam akies refleksui. Tai akių judesių valdymo posistemė, kuri pasukus galvą, akis pasuka takiu pat kampu, bet priešinga kryptimi. Vestibularinis akies refleksas leidžia išsaugoti centrinį matymą tiek aktyviai, tiek pasyviai sukiojant galvą. Be jau minėtų akių judesių valdymo posistemų dar yra optokinetinio ir vestibularinio nistagmų posistemės bei konvergencinė posistemė, kontroliuojanti abi akis, stebint arti esančius objektus [2].

## 1.2 Žmogaus ranka kaip sensomotorinės sistemos motorinis elementas

Jeigu regos sistema yra pagrindinė sensorinė sistema, tai žmogaus rankų ir pirštų judesių valdymo sistemos yra pagrindinės motorinės sistemos. Rankų ir pirštų judesiais mes galime paimti įvairius daiktus, spaudyti kompiuterio klavišus, groti muzikos instrumentais, nurodyti kryptį ir atlikti daug kitų valdymo komandų. Ilgą laikotarpį sensorinės ir motorinės sistemos dėl jų skirtingos paskirties ir sandaros buvo tiriamos atskirai, tačiau pastaraisiais metais buvo atkreiptas dėmesys į tai, kad atliekant koordinuotus judesius sensorinės ir motorinės sistemos veikia integraliai t.y. kartu. Nesunku pastebėti, kad motorinės sistemos elementai – kojos, rankos, liemuo ir pirštai kartu turi ir sensorinę informaciją, nes mes žinome, kokioje padėtyje jie yra net ir nematydami jų. Kitaip tariant, centrinė nervų sistema (CNS), gavusi iš raumenų informaciją apie jų įtempimus, suformuoja kūno ir jo galūnių padėties erdvėje kopiją, kuri vadinama eferentine (vidine) kopija. Kai atlikdami koordinuotus rankų ar pirštų judesius mes stebime objektą, kurio siekiame, tuomet CNS iš regos sistemos papildomai gauna sensorinę informaciją apie daikto padėtį erdvėje ir suformuoja jo padėties aferentinę (išorinę) kopiją. Atliekant koordinuotą judesį, mes turime išspręsti uždavinį, kaip valdymo organą (ranką ar pirštus) efektyviausiai perkelti iš esamos padėties į naują padėtį. Jeigu remtumėmės vien tik eferentine informacija, gauta iš CNS apie valdymo organo esamą padėtį ir perkeltume jį į įsivaizduojamą naują padėtį, judesys būtų netikslus. Jeigu tuo pačiu metu naudotume aferentinę informaciją, gautą iš regos sistemos t.y. stebėtume valdymo organo judesį iš pradinio taško į galutinį, judesys būtų tikslesnis [2].

Geriausiai žmogaus galūnių motorikos elementus galima apibūdinti panagrinėjus mažų vaikų vystymosi laikotarpį. Gimimo metu, žmogaus kūdikis negali nei pasiekti nei sugriebti kokio nors daikto. Kontrolės požiūriu, dviejų procesų užbaigimui (pasiekimo ir sugriebimo) yra privaloma įvykdyti sėkmingą pasiekimą (rankos tiesimą). Pirma, bet koks nervų valdiklis turi būti gebantis bendrauti su savo „augalu“ (t.y., ranka šiame pavyzdyje) tokiu būdu, kuris centralizuotai suplanuoja, sudėtingesniems veiksams atlikti. Antra, vizualiai apibrėžti tikslai turi būti sujungti, kad paskirtų motorinius aktus. Šitie motoriniai aktai, savo ruožtu, turi būti tinkami, kad perkeltų ranką į pageidaujamą tikslą. Yra daug priežasčių, kurios atrodo paaiškina, kodėl neseniai gimę kūdikiai nėra aprūpinti, kad išspręstų šitas dvi užduotis (pasiekimo, sugriebimo):

- Jie turi ribotą liemens, galvos ir rankų laikysenos kontrolę. Atitinkamai galvai ir liemeniui teisingos reakcijos pradeda pasirodyti po 2 – 3 mėnesių po gimimo.
- Jie turi ribotas žinias apie fizinį jų kūnų modelį (t.y. inercijos, tūsumo, jų rankos dalių kietumo momentus).



- Jie turi tikrai ribotą judėjimo repertuarą, susidedantį iš vaikiškų refleksų rinkinio (t.y. sugriebimo, čiulpimo ir t.t.)

- Jie turi ribotus regiamuosius gebėjimus. Per pirmąjį mėnesį, regimoji sistema suteikia kūdikiui funkciškai naudingą, bet nerafinuotą viziją, apytiksliai 5 procentų suaugusiojo lygmens. Kūdikis greičiausiai gali atskirti veido bruožus apytiksliai iš 50 cm atstumo. Objektai už šio atstumo nėra matomi aiškiai.

- Jie neturi nusistovėjusios baigtinės nervų kontrolės struktūros. Pirmoje stadijoje, žieviniai neuronai iš visų naujų žievių sričių siunčia antrininkus į požievines struktūras. Antroje stadijoje, šitie antrininkai yra „nugenėjami“ priklausomai nuo jų vėlesnės funkcijos (pavyzdžiui, regimasis projektavimas ar motorinis projektavimas).

Nepaisant viso šito apribojimo, kūdikiai, anksčiau nei viena savaitė, stengsis atlikti mažus rankos judesius, kuriuos nukreipia į tikslą ir yra gebantys nukreipimą atlikti ir į judantį objektą su koordinuotu galvos ir akių sukimusi sekimu, nors jų galvos gali stipriai svirduliuoti. Šitie ankstyvi rankos judesiai įvyksta nenuspėjamai, bet jie nėra atsitiktinės veiklos ar gryną refleksinių veiksmų rezultatas. Už kelių dienų po to kai gimsta, kūdikiai taip pat sugeba įvykdyti numatomus rankos judesius, bandydami perimti judantį taikinį. Tuo metu, kai naujagimių rankos judesiai yra charakterizuojami pagal gerokai skystą tarpjungtinę struktūrą, pasiekiamumo ir sugriebiamumo judesiai, dviejų ir trijų mėnesių kūdikiams, atsiskleidžia abiemis (pasiekiamumui ir sugriebimui) trumpais smūgiuojančiais judesiais arba palyginti ilgalaikiais trūkčiojančiais judesiais. Atrodo, šitie judesiai yra iš anksto numatyti, „balistiniai“ judesiai, todėl, kad nėra trajektorijos korekcijos. Apie tris mėnesius po siekimo judesių pradžios, kūdikių pasiekiamumas nuolatos gerėja objektams jų aplinkoje ir rečiau praleidžia taikinį. Iki to paties laiko kūdikiai atskleidžia savo manipuliacinių įgūdžių pagerinimus (pavyzdžiui, pagriebimo tikslumas). Kitoje šitos pažangos pasiekiamumo „ko nors“ metodo fazėje, vaikiškos motorinės sistemos tęsia tobulinimo transportinę fazę. Kinematiškai, jų rankų keliai tampa tiesesni, bet svarbiau, jie dabar rodo išorinės jėgos eksploatacijos ženklus. Pavyzdžiui, jie sužino, kad gravitacija ir judėjimas priklauso nuo jėgos ir gali išplėsti jų dilbius. Todėl, jie neturi pradėti alkūnės ištiesimo per raumeninę aktyvaciją, bet leisti gravitaciškai daryti tą darbą. Kaip šio mokymosi proceso pasekmė, vaikiški judesiai tampa labiau ekonomiškai – raumenys bus tikrai aktyvinti kai bus būtina. Tačiau, panašūs įgūdžiai į suaugusio žmogaus neišsivystis nepaėjęs 24-36 amžiaus mėnesiams.

Žmonėms reikia sensorinio stimuliavimo sukelti nervų sistemos išsivystymo procesus, kuris tada paveiks motorinės kontrolės išsivystymą. Be to, nervų sistemos plastiškumas taip pat kaip ir eferentinės ir aferentinės projekcijos išsivystymas yra laiko lemiamas. Tai yra, organizmas patiria kritiškus išsivystymo periodus, kur nervų sistema laukia tam tikrų sensorinių

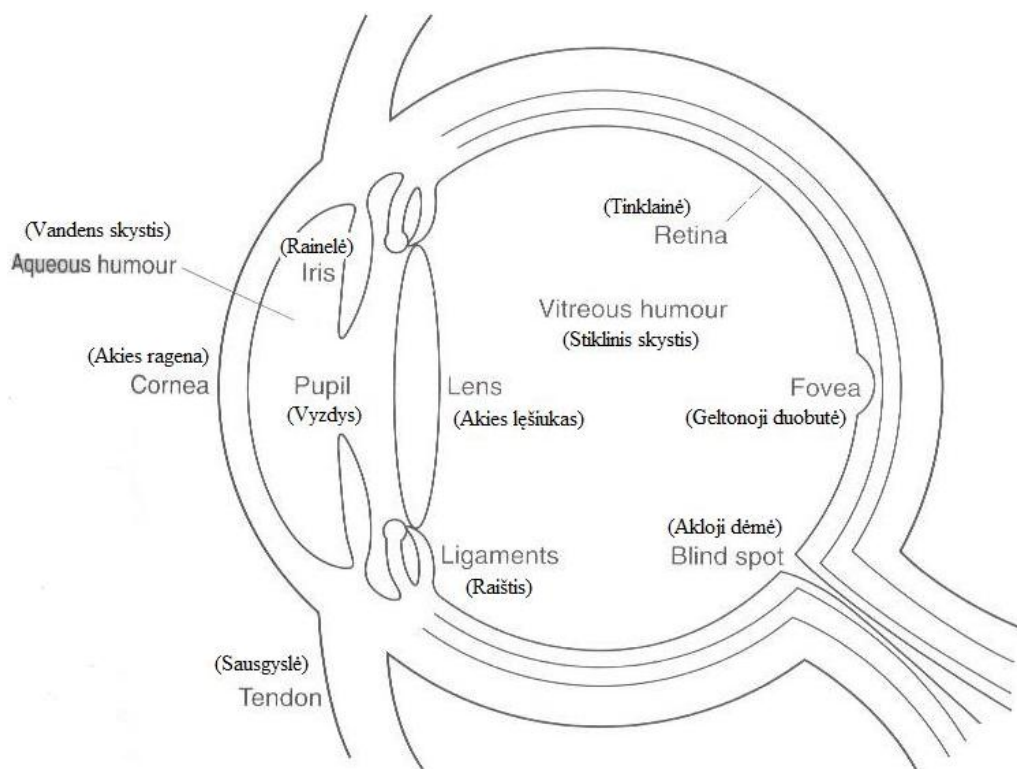
įvesčių. Trūkumas tokių stimulų anksčiau kritiško periodo negalėtų turėti beveik jokių pražūtingų įtakų iki tam tikrų sensomotorinio išsivystymo aspektų, bet nesėkmė tokio stimuliavimo per tokį periodą neigiamai paveiks vėliau sensomotorinę funkciją.

Plačiai žinoma, kad tvarkingas nervų išsivystymas taip pat priklauso nuo organizmo sąveikos su aplinka. Elgesio manifestacijos yra pamatytos šiaurinių kinų kūdikių, kurie yra išauginti smėlio krepšiuose (sanitariniais tikslais), kuris priveda prie kūdikio judėjimo apribojimo. Jei ši praktika bus tęsta po pirmų gyvenimo metų, vaikas ne tikai parodys užlaikytą motorinę išsivystymą, bet tai kritiškai susilpnins vėlesnę motorinę ir pažintinę funkciją [3].

### 1.3 Žmogaus akis ir jos judesiai

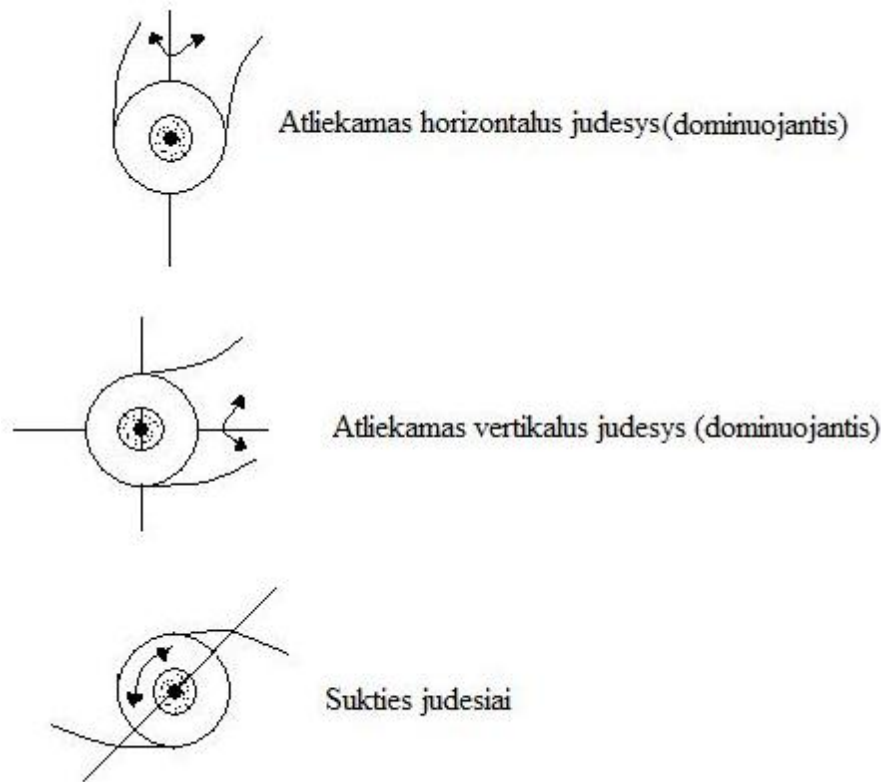
Žmogaus stebimas vaizdas yra patalpinamas į tinklainę. Daugiausiai receptorių tinklainėje yra geltonojoje duobutėje (fovea). Vaizdas matomas ryškiausiai tada, kai jis yra patalpinamas į tą geltonąją duobutę (fovea). Todėl akis nuolat juda, kad mus dominančius objektus patalpintų į jautriausią akies tinklainės sritį (fovea).

Akį sudaro: vokai, ašarų aparatas, junginė, ragena, odena, priekinė kamera, rainelė, vyzdis, lęšiuokas, stiklakūnis, krumplynas, gyslainė, tinklainė, regos nervas, akiduobė [4]. Akies sandara pateikta 1 paveiksle.



1 pav. Žmogaus akis [5]

Akies obuolį judina šeši raumenys. Jie sudaro tris pozicines poras. Kai raumuo susitraukia, tada judina akies obuolį, akis atlieka judesį. Viena raumenų pora susitraukdama atlieka horizontalų judesį (dominuojantis judesys), kita raumenų pora atlieka vertikalų judesį (taip pat dominuojantis judesys) ir trečioji akies raumenų pora atlieka sukties judesius. Akį judinantys raumenys pateikti 2 paveiksle.



**2 pav.** Akį judinantys raumenys

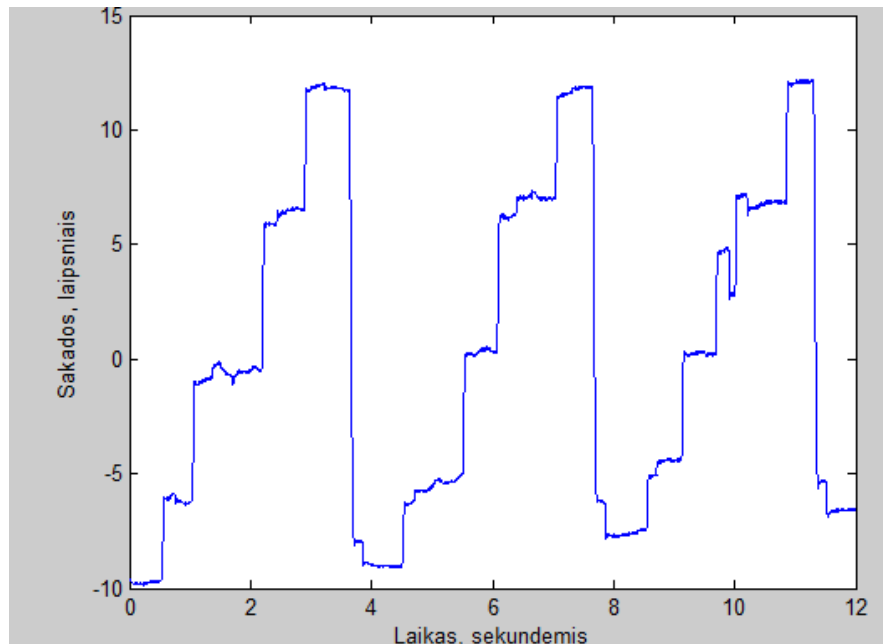
Akių judesius galima suskirstyti į sakadas, tolygų sekimą, vestibulinio akies reflekso judesius, optokinetinį nistagmą, vergentinius judesius.

Sakados, tai akies šuoliukai. Tokie judesiai pasireiškia, kai dėmesį perkeliame į kitą objektą. Mano eksperimente sakados pasireiškia, kada taikinyje ekrane juda diskretiškai. Sakadų šuoliai pavaizduoti 3 paveiksle. Sakadų žmogus nevaldo, jas kontroliuoja centrinė nervų sistema. Sakados trukmė yra labai trumpa. Tarkim vienos sakados trukmė gali būti  $t = 0,0242$  sekundės, o amplitudė  $\Delta\varphi = 5,1754$  laipsnio. Taigi sakados greitis ir pagreitis būtų

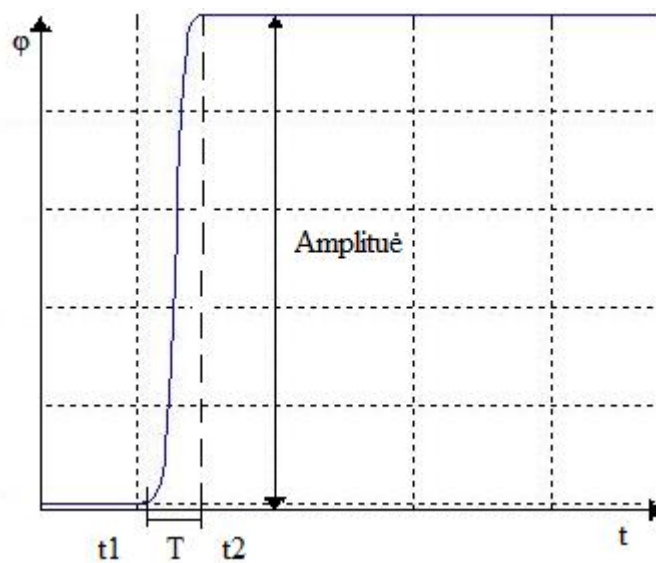
$$v = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_1 - t_2} \left[ \frac{\text{laipsniai}}{\text{sekundė}} \right] \quad (1.1)$$

$$a = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \left[ \frac{\text{laipsniai}}{\text{sekundė}^2} \right] \quad (1.2)$$

Taigi sakados greitis gali būti  $v = \frac{5,1754}{0,0242} = 213,8595 \frac{\text{laipsniai}}{\text{sekundė}}$ . Iš čia mes galime daryti išvadą, kad akies maksimalus kampinis greitis yra proporcingas sakados amplitudei ir gali siekti iki 500 laipsn/sek. Amplitudės gali kisti labai plačiose ribose. Gali būti kelios laisnio minutės arba kelios dešimtys laipsnio. Sakados laikas gali būti 20 – 100 ms. O akies kampinis pagreitis gali siekti iki 30000 laipsn/s<sup>2</sup>. Sakados charakteristika pateikta 4 paveiksle.

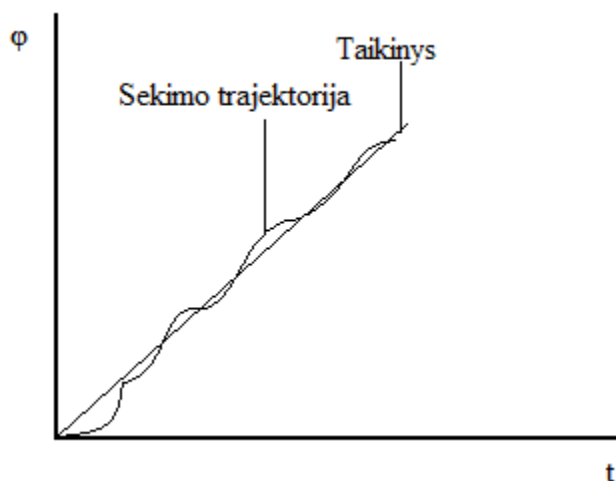


**3 pav.** Akies daromos sakados



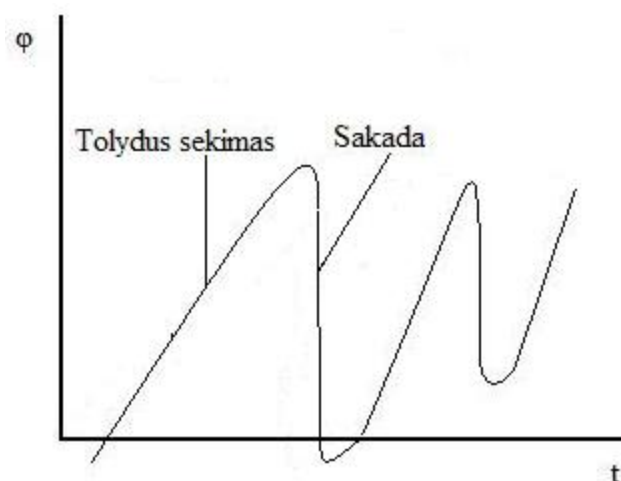
**4 pav.** Sakados amplitudė ir laikas

Kad akis atliktu tolydinį sekimo judesį reikia stebėti mažą judantį objektą. Tada akis atlieka tolydų sekimą. Tolydus sekimas galėtų atrodyti taip, kaip pavaizduota 5 paveiksle.



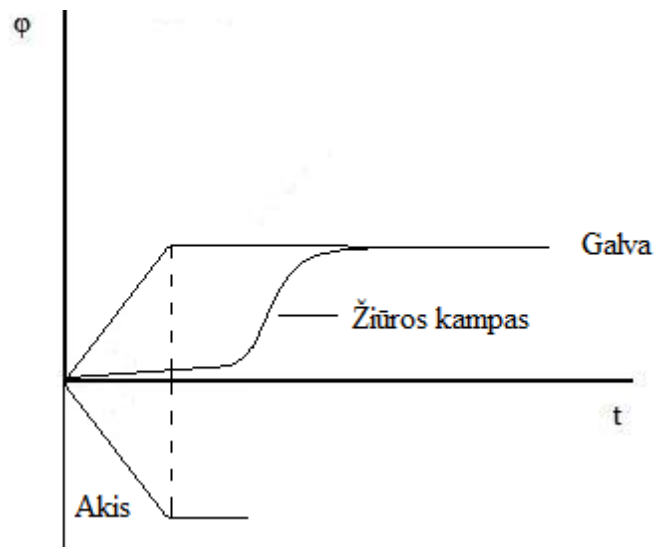
5 pav. Tolydaus sekimo pavyzdys

Jeigu juda didelis objektas ar visas fonas (pvz. važiuojant mašina) tada atsiranda optokinetinis nistagmas. Optokinetinį nistagmą sudaro lėta fazė, panašiai kaip tolydiniame sekime, kai akis nukrypsta į šoną ir greita fazė, kai akis sugrįžta į pirminę padėtį. Optokinetinio nistagmo judėjimas pateiktas 6 paveiksle.



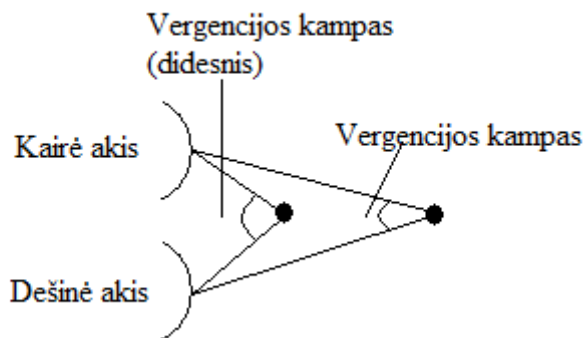
6 pav. Optokinetinio nistagmo pavyzdys

Jei pasyviai ar aktyviai pajuda galva, tai akis pasisuka tiek pat į priešingą pusę, kad išlaikytų pastovų matymo kampą. Toks akių judėjimas vadinamas vestibulinis okulinis refleksas. Jo pavyzdys pateiktas 7 paveiksle.



7 pav. Vestibulinis akių refleksas

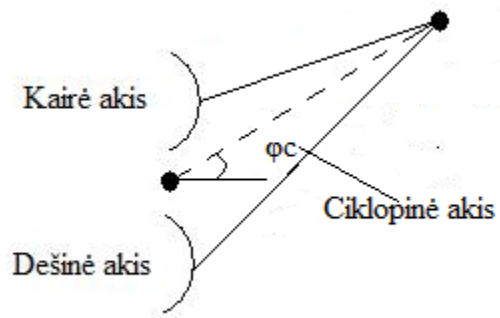
Verguojamieji akių judesiai yra kai dvi akys turi matyti, kad nesusidvejintu vaizdas. T.y. kai stebimas objektas yra arti. Tada kairiosios ir dešinėsios akių judesiai turi būti skirtingi, kad abi akys galėtų nukreipti fovea į tą patį tašką. Vergentinių akių judesių pavyzdžiai pateikti 8 ir 9 paveiksluose.



8 pav. Vergentinis akių judesių pavyzdys

Vergencijos kampo formulė pateikta sekančiai, kur  $\varphi_v$  – vergencijos kampas,  $\varphi_k$  – kairės akies kampas  $\varphi_d$  – dešinės akies kampas. Jei objektas yra toli  $\varphi_v \rightarrow 0$ , tada akių žiūros linijos yra lygegriačios.

$$\varphi_v = \varphi_k - \varphi_d \quad (1.3)$$



**9 pav.** Vergentinis akių judesių pavyzdys 2

Konjuguotiems judesiams kampas taip nustatomas.  $\varphi_c$  – vergencijos kampas (ciklopinė akis).

$$\varphi_c \approx \frac{\varphi_k + \varphi_d}{2} \quad (1.4)$$

## 2 INFORMACIJOS TEORIJA IR JOS PANAUDOJIMAS ŽMOGAUS SENSOMOTORINĖMS SISTEMOMS VERTINIMUI

### 2.1 Informacijos kiekis

Šiame skyriuje aptartas kiekybinis informacijos vertinimas. Esminiai matavimų teorijos klausimai ir terminai aptarti daugelyje standartų, bet tik pastaruoju metu į juos įtraukiamos tikimybinės bei informacinės sąvokos, nors tikimybių teorija gyvuoja jau gerokai daugiau kaip 100 metų, o informacijos teorija – per 50 metų.

Pagrindinis matavimų tikslas yra bandymo būdu gauti kiekybinę informaciją apie matuojamąjį dydį, jį kiekybiškai įvertinti. Kartu iškyla gautos informacijos kiekio įvertinimo problema. Matavimo rezultatai yra kiekybinė objekto charakteristika. Jeigu įsivaizduotume, kad matavimo priemonės išėjimo dydžio verčių ruožas padalijamas į tam tikrą skaičių intervalų ir reikia nustatyti, kuriam iš šių intervalų reikia priskirti tikrąją matuojamojo dydžio vertę. Bendrą prietaiso skiriamų matuojamojo dydžio gradacijų skaičių galima išreikšti taip:

$$N = \frac{x_{max} - x_{min}}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Čia  $x_{max}$  ir  $x_{min}$  – didžiausia ir mažiausia matuojamojo dydžio verčių ruožo reikšmės,  $\Delta x$  – intervalo dydis. Toliau galime išreikšti taip, kadangi matavimo rezultatas yra skaičius:

$$N = h^l \quad (2.2)$$

Čia  $h$  – pozicinės skaičiavimo sistemos (skaitmeninio kodo) pagrindas,  $l$  – skilčių skaičius (kordinio žodžio ilgis). Dydžio priklausomybė nuo  $l$  yra eksponentinė, tai skaičius  $N$  nėra patogus informacijos kiekio matas. Kiekiui apibūdinti yra patogesnis logaritminis matas, todėl abi puses logaritmuojame ir pasinaudodami logaritmo savybe, skaičiaus laipsnio rodiklį perkeliame prieš logaritmą.

$$I = \log N = l \log h \quad (2.3)$$

Dabar turime tiesinę priklausomybę tarp  $I$  ir skilčių skaičiaus  $l$ .

Amerikiečių mokslininkas R. Hartlis nustatė įvairių sistemų gebėjimo siųsti informaciją kiekybinį matą. Jo pasiūlytu adityviuoju dvejetainiu logaritminiu matu galima apskaičiuoti informacijos kiekį dvejetainiais vienetais – bitais. Taigi Hartlio dėsnis būtų:

$$I = \log_2 N = l \log_2 h \quad (2.4)$$

*Informacijos kiekis*  $I$  yra dvejetainių skilčių, kurių reikia matavimo rezultatams išreikšti dvejetainiu kodu, skaičius. Bitas yra dvejetainio kodo vieno simbolio informacijos kiekis. Ir jis atitinka vieną elementarųjį įvykį, kuris gali įvykti arba neįvykti. Jei matuojame  $X_1, X_2, \dots, X_k$  nepriklausomų dydžių, bendras informacijos kiekis bus:



$$I(X_1, X_2, \dots, X_k) = I(X_1) + I(X_2) + \dots + I(X_k) \quad (2.5)$$

Vartojant dvejetainį logaritmą, tiesiogiai gaunamas informacijos kiekis bitais gerai derinasi su dvejetainė logika, dvejetainiu kodavimu ir relinė technika. Adityvųjį Hartlio matą galima vartoti tada, kai matuojamojo dydžio tikimybės yra vienodos. K. Šėnonas vienas informacijos teorijos kūrėjų, įrodė, kad adityvusis Hartlio matas nėra pilna informacijos šaltinio charakteristika. Pavyzdžiui, jei metama moneta, bandymo rezultatui apibūdinti užtenka dviejų simbolių. Kai metamas kubas, kurio vienas šonas baltas, o kiti juodi, bandymo rezultatui apibūdinti taip pat užtenka dviejų simbolių, tačiau pranešimo šaltinio charakteristika neįvertina tikimybinių informacijos šaltinio charakteristikų, būtent to, kad metant monetą abiejų galimų būsenų tikimybės yra vienodos:

$$P_1 = P_2 = 0,5$$

Antruoju atveju

$$P_1 = \frac{1}{6}; \quad P_2 = \frac{5}{6}$$

Pirmuoju atveju pranešimo kompleksą sudaro du pranešimai, antruoju – šeši. Jei pranešimų yra  $N$  ir visų pranešimų tikimybės yra vienodos, tai kiekvieno pranešimo tikimybė

$$P = \frac{1}{N} \quad (2.6)$$

Kadangi informacijos kiekis išreiškiamas  $\log_a N$ , tai

$$\log_a N = \log_a \frac{1}{P} = -\log_a P \quad (2.7)$$

Čia pasinaudojome laipsnio su sveikuoju neigiamuoju rodikliu veiksmu, tad  $P^{-1} = (\frac{1}{P})^1 = \frac{1}{P^1} = \frac{1}{P}$ . O po to laipsnį  $-1$  perkeliame pasinaudodami logaritmo savybę prieš logaritmą.

Taigi kai pranešimų tikimybės yra vienodos, vienas pranešimas teikia informacijos

$$I = -\log P \quad (2.8)$$

## 2.2 Entropija. Sąlyginė entropija (neapibrėžtumas)

Kai pranešimų tikimybės skirtingos, vadovaujantis tuo pačiu informacijos kiekio nustatymo principu galima teigti, kad  $I$ -tojo pranešimo, kurio tikimybė  $P_i$ , teikiamos informacijos kiekis lygus  $-\log_a P_i$ . Norint apibūdinti pranešimų kompleksą, kai pranešimų tikimybės skirtingos, neapibrėžtumo matu galima laikyti dydžio  $-\log_a P_i$  vidurkį

$$H = I_{vid} = -(P_1 \log_a P_1 + P_2 \log_a P_2 + \dots + P_n \log_a P_n) \quad (2.9)$$

Tokį kiekybinį informacijos šaltinio neapibrėžtumo matą pasiūlė K. Šėnonas ir pavadino jį *entropija*. Jei  $X$  yra tolydusis atsitiktinis dydis, kurio skirstinio tankis  $p(X)$ , tai jo entropija

$$H(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(X) \log_a p(X) dX \quad (2.10)$$

Reikia paminėti, kad dydžiai, kurių reikšmių skaičius tam tikrame intervale yra begalinis, vadinami tolydžiais. O dydžiai arba signalai, kurie perduoda tik baigtinį skaičių reikšmių, vadinami diskrečiais [6]. Jei  $X$  yra diskretusis atsitiktinis dydis, turintis baigtinį galimų verčių skaičių  $x_1, x_2, \dots, x_n$  su jas atitinkančiomis tikimybėmis  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , tai jo entropija

$$H(X) = \sum_{i=1}^n P_i \log_a P_i \quad (2.11)$$

Entropija reiškia vidutinį informacijos kiekį, kurį teikia vienas pranešimas. Entropija yra kiekybinis informacijos šaltinio neapibrėžtumo matas ir patogus informacijos kiekio matas. Entropijai būdingos šios savybės:

1. Entropija niekada nebūna neigiama, nes tikimybių reikšmės yra trupmeninės, o jų logaritmai – neigiami dydžiai, todėl nariai  $\log_a(P_i) = -(-c)$  negali būti neigiami.

2. Entropija lygi nuliui tuo ribiniu atveju, kai viena vieno iš galimų komplekso įvykių tikimybė yra lygi 1, o visų kitų – nulinė. Tai yra toks įvykis, kai apie bandymą ar dydį viskas žinoma iš anksto ir bandymo rezultatas nesuteikia jokios naujos informacijos.

3. Entropijos reikšmė yra didžiausia, kai tikimybės yra  $P_i$  yra lygios:  $P_1 = P_2 = \dots = P_n = \frac{1}{N}$ , šiuo atveju  $H = -\log_a \frac{1}{N} = \log_a N$ , tai yra pranešimo teikiamas informacijos kiekis sutampa su informacijos kiekiu, apskaičiuotu pagal Hartlio lygtį. Informacijos kiekių vertinimų Šenono ir Hartlio matais sutapimas reiškia, kad sistemos informacinė talpa visiškai išnaudota. Kai pranešimų tikimybės  $P_i$  nevienodos (nelygios), informacijos kiekis pagal Šenoną yra mažesnis už informacinę sistemos talpą.

Pranešimo teikiamą informacijos kiekį  $I$  galime įvertinti pasinaudodami entropijos sąvoka. Tačiau dydis  $I$  sutampa su entropija  $H$  tik tada, kai gavus informaciją situacijos neapibrėžtumas visiškai pašalinamas. Tačiau informacijos perdavimą realiomis sąlygomis visada lydi trikdžiai ar paklaidos. Dezinformacinę šių trikdžių įtaką galima įvertinti šių trikdžių, kaip atsitiktinių dydžių, entropiją. Informacijos kiekį, veikiant trikdžiams, nusako entropijų skirtumas:

$$I = H(X) - H(\Delta) \quad (2.12)$$

Čia  $H(X)$  – perduodamo pranešimo entropija,  $H(\Delta)$  – trikdžio entropija. Taigi informacijos praradimas dėl trikdžių ar atsitiktinių paklaidų lygus šių atsitiktinių paklaidų entropijai. Pradinį matuojamojo dydžio  $X$  neapibrėžtumą prieš matuojant, kurį nusako šio dydžio verčių skirstinys, galima įvertinti apskaičiavus entropiją  $H(X)$ . Neapibrėžtumą, liekantį po matavimo, matuojant suradus realiąją dydžio vertę  $x_r$ , apibūdina atsitiktinių matavimo paklaidų entropija  $H(\Delta)$ . Ji dar vadinama *sąlygine entropija*  $H(X/x_r)$  [7].

Matavimu gautos informacijos kiekis yra pradinio ir likusio neapibrėžtumų skirtumas

$$I = H(X) - H(X/x_r) \quad (2.13)$$

### 2.3 Informacijos teorijos panaudojimas sekimo judesiams aprašyti

Žmogaus sensomotorinėms sistemoms aprašyti yra panaudota informacijos teorija. Eksperimentuose tiek akių sensomotorinei sistemai, tiek rankų sensomotorinei sistemai buvo naudojami taikiniai ekrane pagal horizontalią ir vertikalią koordinates atskirai ir pagal dvimatę koordinatinę sistemą. Taikinyis buvo paruoštas judėti tolydžiai prie įvairių greičių. Taikiniui judant diskrečiai buvo naudojami įvairūs taikinio šuolių greičio intervalai.

Panaudojant informacijos teorijos savybes, akių ir rankų judesių kontrolės sistema apibrėžiama taip: taikinio judėjimo trajektorija  $T$  ekrane būtų apibrėžta kaip okulomotorinės ar rankos sensomotorinės sistemos šaltinis ar įėjimo informacija, žiūros linijos arba pelės kursoriaus trajektorija ekrane  $A$  kaip išėjimo informacija ir skirtumas tarp jų kaip prarasta informacija  $L$ . Kai taikinio greitis padidinamas, ar taikinio trajektorija tampa sudėtingesnė, šaltinio informacijos kiekis padidėtų, akių judesių kontrolės sistema ar rankų judesių kontrolės sistema tampa nebegebanti sekti taikinį ir skirtumas tarp taikinio ir akių padėties arba prarasta informacija taptų didesnė. Tai leido suformuluoti išvadą, kad žmogaus okulomotorinė ir rankų sensomotorinė sistemos turi kanalo informacijos gebos ribą ir gali būti panaudota, kaip svarbi savybė nustatyti akių judesių ir rankų judesių kontrolės sistemą.

### 2.4 Tolydaus sekimo teoriniai faktai

Kai taikinyis juda pagal tolydinio laiko analogine trajektorija  $T$  horizontalioje ašyje šaltinio informacijos kiekis nustatomas kaip taikinio entropija  $H(T)$  ir priklauso nuo taikinio trajektorijos tikimybinio skirstinio  $p(T)$  pagal lygtį:

$$H(T) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(T) \log p(T) dT \quad (2.14)$$

Didžiausią informacijos kiekį turi trajektorija, kurios tikimybinis skirstinys yra pasiskirstęs pagal Gauso dėsnį

$$p(T) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{T^2}{2\sigma_T^2}\right) \quad (2.15)$$

kur  $\sigma_T$  - taikinio  $T$  trajektorijos standartinis nuokrypis. Spręsdami 2.14 ir 2.15 lygtis mes gauname

$$H(T) = 0,5 * \ln(2\pi e \sigma_T^2) \quad (2.16)$$

Abipusė informacija tarp taikinio trajektorijos  $T$ , kaip šaltinio informacija  $H(T)$  ir žiūros linijos trajektorijos, kaip priimta informacija  $I_p(T, L)$  vienu laiko momentu yra susieti pagal lygtį

$$I_p(T, L) = H(T) - H(T/L) \quad (2.17)$$

Kur  $H(T/L)$  yra sąlyginis tikimybinis skirstinys, atstovaujantis prarastai informacijai ar paliktam neapibrėžtumui. Jei skirtumas tarp taikinio ir žiūros linijos trajektorijų yra kaip tolydinio laiko analoginio triukšmo signalas ir būtų apibrėžtas pagal Gauso tikimybinį skirstinį su standartiniu nuokrypiu  $\sigma_L$ , informacijos kiekis perduotas per rankų sensomotorinę ar okulomotorinę sistemą, bus

$$I_p(T, L) = 0,5 * \log_2\left(1 + \frac{\sigma_T^2}{\sigma_L^2}\right) \quad (2.18)$$

Jei tolygaus sekimo eksperimento trukmė būtų  $t$  ir žmogaus rankų okulomotorinės sistemos dažnio slenkstis būtų  $F$ , perduotos informacijos kiekis per ją bus

$$I_{pt} = F * t * \log_2\left(1 + \frac{\sigma_T^2}{\sigma_L^2}\right) \quad (2.19)$$

ir vieno matmens žmogaus rankų sensomotorinės ar okulomotorinės sistemos kanalo geba, kai eksperimento trukmė  $t$  būtų gana ilga

$$C_{p1} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} [F * t * \log_2\left(1 + \frac{\sigma_T^2}{\sigma_L^2}\right)] \quad (2.20)$$

Jei taikiny s juda dviejose koordinatėse  $T_x$  ir  $T_y$ , akių ar rankų judesių kontrolės sistema atlieka dvimatį koordinatinį tolygų sekimą. Taikiny ar šaltinio informacijos kiekis  $H(T_x, T_y)$  šiuo atveju būtų apibrėžtas pagal dviejų dimensijų tikimybinį skirstinį  $p(T_x, T_y)$ . Kai taikinio trajektorijos horizontaliose ir vertikaliose koordinatėse nėra koreliuotos tarpusavyje, dviejų dimensijų tikimybinis skirstinys būtų visiškai nustatytas pagal taikinio sumos horizontalų ir vertikalų tikimybinius skirstinius:  $p(T_x, T_y) = p(T_x) + p(T_y)$ . Tariant, kad dvidimensinė žmogaus tolygaus sekimo akių judesių kontrolės sistema dirba pagal dvi atskiras horizontalę ir vertikalę nervų grandines, rankos sensomotorinės ar okulomotorinės sistemos kanalo informacijos geba būtų maždaug du kartus didesnė.

$$C_{p2} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} [F_x t \log_2\left(1 + \frac{\sigma_{Tx}^2}{\sigma_{Lx}^2}\right) + F_y t \log_2\left(1 + \frac{\sigma_{Ty}^2}{\sigma_{Ly}^2}\right)] \quad (2.21)$$

kur  $\sigma_{Tx}$ ,  $\sigma_{Ty}$ ,  $\sigma_{Lx}$ ,  $\sigma_{Ly}$  – standartinės taikinio ir paklaidos signalų (trajektorijų) nuokrypos horizontalioje ir vertikalioje kryptimis atitinkamai.

Paskutinė prielaida gali būti eksperimentiškai patvirtinta matuojant pagal vieną ir dviejų dimensijų žmogaus tolygaus sekimo akių ar rankų judesių kontrolės sistemos kanalų informacijos gebą.

## 2.5 Diskretaus sekimo teoriniai faktai

Kai taikinyš šokinėja atsitiktinai iš vienos padėties į kitą, mes turime diskretišką šaltinio informaciją ir prarasta informacija būtų skirtumas tarp taikinio ir akių padėties po šuolio į naują taikinio padėtį. Šiame funkcionavime informacijos kiekis perduotas per okulomotorinį kanalą ar rankos sensomotorinį kanalą, bus skirtumas tarp įvesties ir prarastos informacijos kiekių. Kai taikinio šuolių dažnis bus padidintas, sakadinė okulomotorinė sistema ar rankos sensomotorinė sistema bus daugiau nebegebanti sukelti tinkamus šuolius ir prarasta informacija prie dažnio slenksčio žymiai padidėja. Tai reiškia, kad sakadinė okulomotorinė sistema ar rankos sensomotorinė sistema taip pat turi kanalo informacijos gebos ribą.

Diskrečiam sekimui yra panaudota taininio šokinėjimai iš vienos vietos į kitą. Kai taikinyš šoka iš vienos pozicijos į kitą, sakadinių akių judesių kontrolės sistema yra veiksmė. Šiuo atveju mes galime laikyti, kad įvesties arba šaltinio informacija okulomotorinei sistemai yra diskreti [9]. Jei visos taikinio pozicijos turi vienodas tikimybes  $p(T_x, T_y)$ , dvi dimensinis informacijos kiekis bus

$$H(T_x, T_y) = -\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m p(T_x, T_y) * \log p(T_x, T_y) \quad (2.22)$$

kur  $n$  ir  $m$  galimų taikinių skaičius horizontalioje ir vertikalioje koordinatėse. Jei mes laikytume, kad horizontalios ir vertikalios taikinio koordinatės nėra koreliuotos, šaltinio informacijos kiekis

$$H(T_x, T_y) = H(T_x) + H(T_y) = -\sum_{x=1}^n p(T_x) \log p(T_x) - \sum_{y=1}^m p(T_y) * \log p(T_y) \quad (2.23)$$

Sakadinių akies judesių tikslumas yra ribotas. Paklaidos po akies šuolio  $E_x$  ir  $E_y$  gali būti laikomos kaip prarasta informacija, kuri gali būti apibrėžta pagal du nepriklausomus horizontalaus ir vertikalaus akies judesio kontrolės kanalų  $H(T_x/L_x)$  ir  $H(T_y/L_y)$  sąlygines tikimybes. Perduotas per okulomotorinę sistemą informacijos kiekis per vieną vienintelę sakadą gali būti gautas kaip skirtumas tarp šaltinio informacijos ir prarastos informacijos kiekių [9]

$$I_S(T, L) = H(T_x) - H(T_x/L_x) + H(T_y) - H(T_y/L_y) \quad (2.24)$$

Sakados trukmė priklauso nuo sakados amplitudės ir kartu su programuojamu laiku yra apie 0.25 sek. Taigi po vieno šuolio kitas taikinyš gali būti pateiktas tikslai po laiko intervalo  $D$ ,

kuris yra 0.1 – 1 sek. Kanalo informacijos geba per sakadinius akių judesius, kai eksperimento trukmė yra pakankamai ilga, gali būti gauta pagal lygtį

$$C_S = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left[ \frac{t}{D} I_S(T, L) \right] = \frac{1}{D} \left[ \log \frac{k}{0.41 \cdot \sigma_x} + \log \frac{l}{0.41 \cdot \sigma_y} \right] \quad (2.25)$$

Šioje lygtyje  $k$ ,  $l$  yra amplitudžių ribos ir  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  yra sakadinių akies judesių paklaidų standartiniai nuokrypiai horizontaliose ir vertikaliose kryptyse atitinkamai.

Paklaida diskretiniame sekime gali būti įvertinta kaip skirtumas tarp naujos taikinio padėties ir žiūros linijos pradinės koordinatės po šuolio. Vėliau akis pašalina šią paklaidą, atlikdama vieną ar kartais dvi korekcines sakadas. Paklaidos, išmatuotos per eksperimentinį tyrimą, visada priklauso nuo taikinio šuolio amplitudės per sakadinius akių judesius. Normalios sakados gali būti taip pat per mažos (hipometrinės) ir nutūpti prieš taikinį arba per didelės (hipermetrinės) ir prašauti numatomą taikinio poziciją. Apie 70 % pirmųjų sakadų paprastai yra hipometrinės.

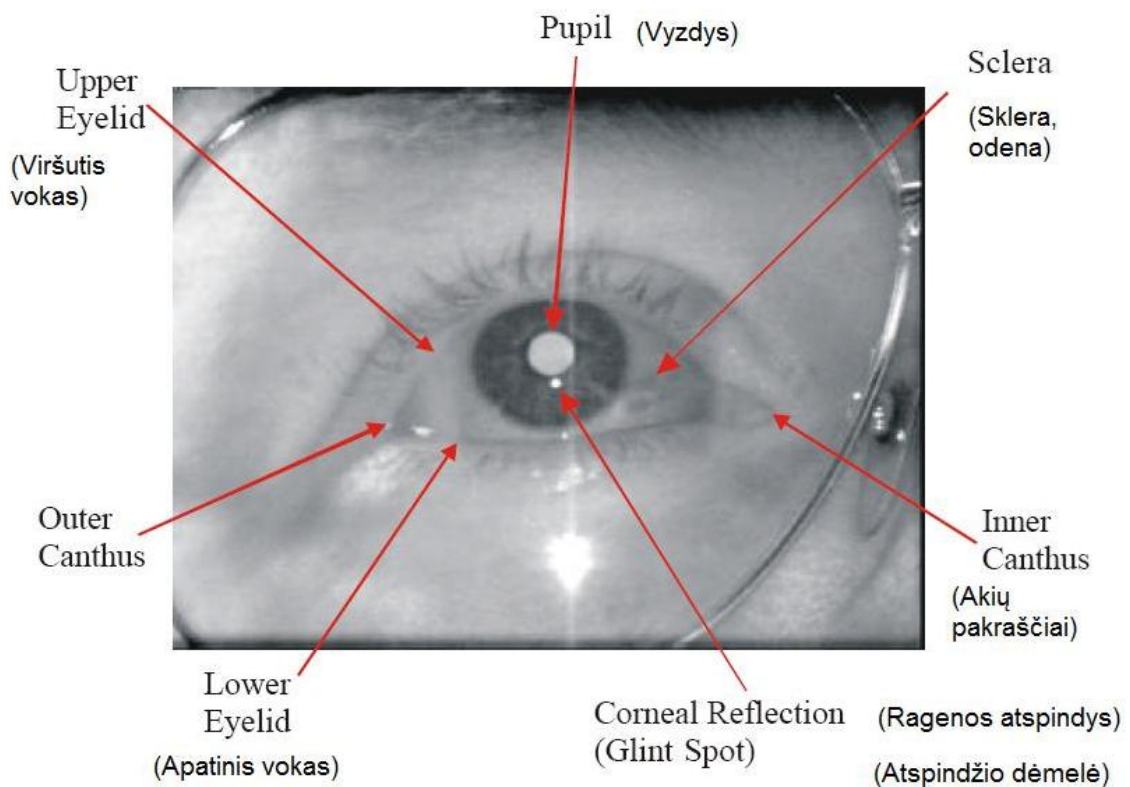
Taip pat ši formulė (2.25) tinka ir rankų sensomotorinio kanalo informacijos praleidžiamajai gebai nustatyti, kai atliekamas diskrečiai judančio taikinio sekimas.

### 3 AKIŲ IR RANKŲ JUDESIŲ INFORMACIJOS PRALEIDŽIAMOSIOS GEBOS NUSTATYMO METODIKA

#### 3.1 Tyrimams naudojama akių sekimo sistema LC Technologies

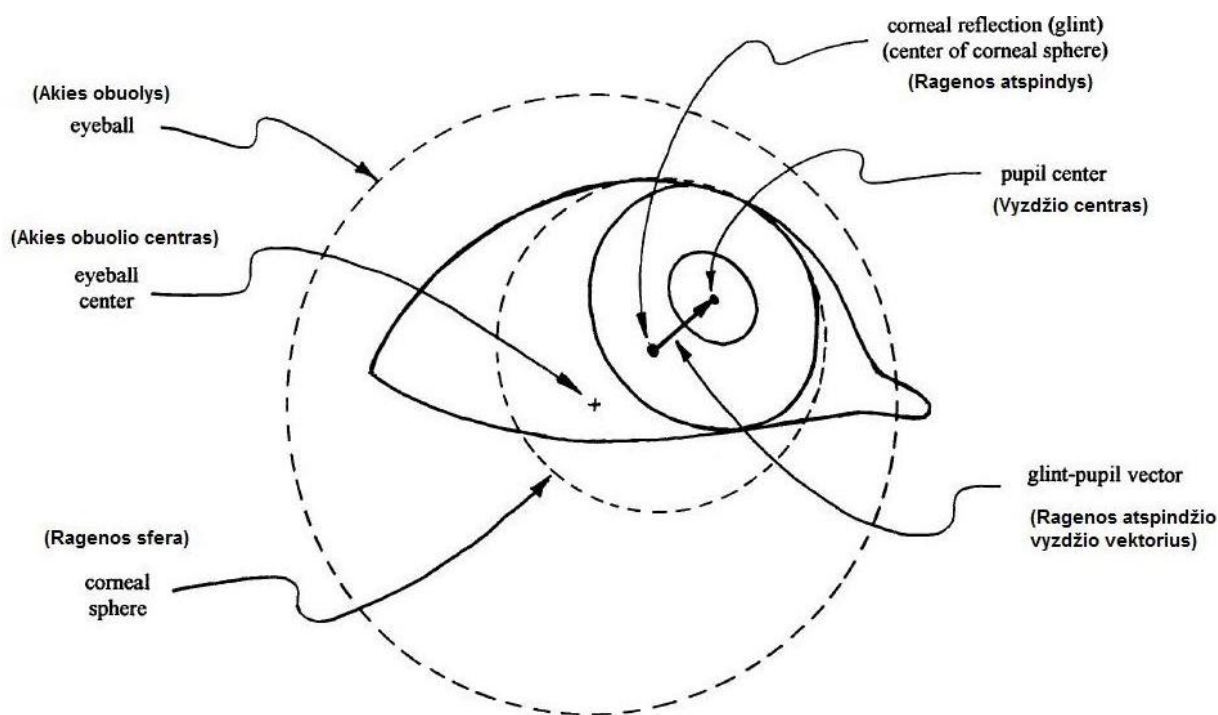
Tiriamųjų akių judesiai visuose bandymuose buvo registruojami naudojant LC Technologies, Ltd sukurta akių judesių sekimo sistema EyeGaze System. Šią sistemą sudaro dvi kameros, kurios yra pritvirtintos monitoriaus apačioje, jos yra reguliuojamos, t.y. galima pakelti arba nuleisti, pasukti į vieną kampą arba į kitą, kad eitu sukalibruoti žmogaus žvilgsnį. Kameros centre yra nedidelis, mažos galios infraraudonųjų spindulių diodas, kuris apšviečia akį. Kompiuteryje įmontuota vaizdo įvedimo plokštė.

Vaizdo kameros matomas akių sistemos vaizdas pavaizduotas 10 paveiksle. Ragenos atspindžio vaizdas gaunasi dėl diodo šviesos, atsispindinčios nuo ragenos paviršiaus. Ryškus šviesus vyzdys gaunasi dėl infraraudonųjų spindulių diodo šviesos, atsispindėjusios nuo tinklainės ir grįžtančios atgal per vyzdį link diodo. Vaizdo kamera mato šviesą, grįžtančią iš vyzdžio link diodo, kadangi diodas yra sumontuotas kameros optinės sistemos centre (jei jis būtų ne centre tai vyzdys atrodytų tamsus). Akių sekimo sistema naudoja šviesaus vyzdžio efektą vaizdo apdorojimo tikslumui pagerinti.



10 pav. Akies vaizdas su šviesiu vyzdžiu ir ragenos atspindžiu [11]

Vaizdo apdorojimo programinė įranga, kadruose, gautuose iš kameros, pirmiausia ieško vyzdžio ir ragenos atspindžio, tada išmatuoja jų centro koordinatas ir apskaičiuoja žvilgsnio kryptį. Žvilgsnio kryptis šioje akių sekimo sistemoje matuojama naudojantis vyzdžio centro ir ragenos atspindžio (VCRA) metodu. VCRA metodas remiasi tuo, kad žvilgsnio kryptis yra tiesiogiai susijusi su vektoriumi nuo ragenos atspindžio iki vyzdžio centro vaizdo kadre. Vektorius pateiktas 11 paveiksle.



**11 pav.** Vyzdžio centro ir ragenos atspindžio (VCRA) metodas [11]

Kai tiriamasis žiūri tiesiai į kamerą, ragenos atspindžio vaizdas atsiranda šalia vyzdžio centro vaizdo (nors infraraudonųjų spindulių diodas yra sumontuotas kameros optinės sistemos centre, tačiau ragenos atspindys neatsiranda tiksliai vyzdžio centre, kadangi akies centrinė duobutė yra truputį nutolusi nuo akies optinės ašies). Vartotojui nukreipus žvilgsnį aukštyn nuo kameros, vyzdžio centras taip pat juda aukštyn ir toliau nuo ragenos atspindžio, todėl ragenos atspindžio – vyzdžio centro vektorius yra nukreiptas aukštyn. Analogiškai ir vartotojui žiūrint į kameros dešinę (vartotojo kairę), vyzdžio vaizdas juda į dešinę nuo ragenos atspindžio, o ragenos atspindžio-vyzdžio centro vektorius yra nukreiptas į dešinę.

VCRA metodas taikomas tiek naudojanti šviesaus, tiek tamsaus vyzdžio efektą. Šis metodas remiasi tokiomis prielaidomis:

a) Akies optinė linija kerta du fiksuotus taškus akyje: ragenos sferos centrą ir vyzdžio centrą.



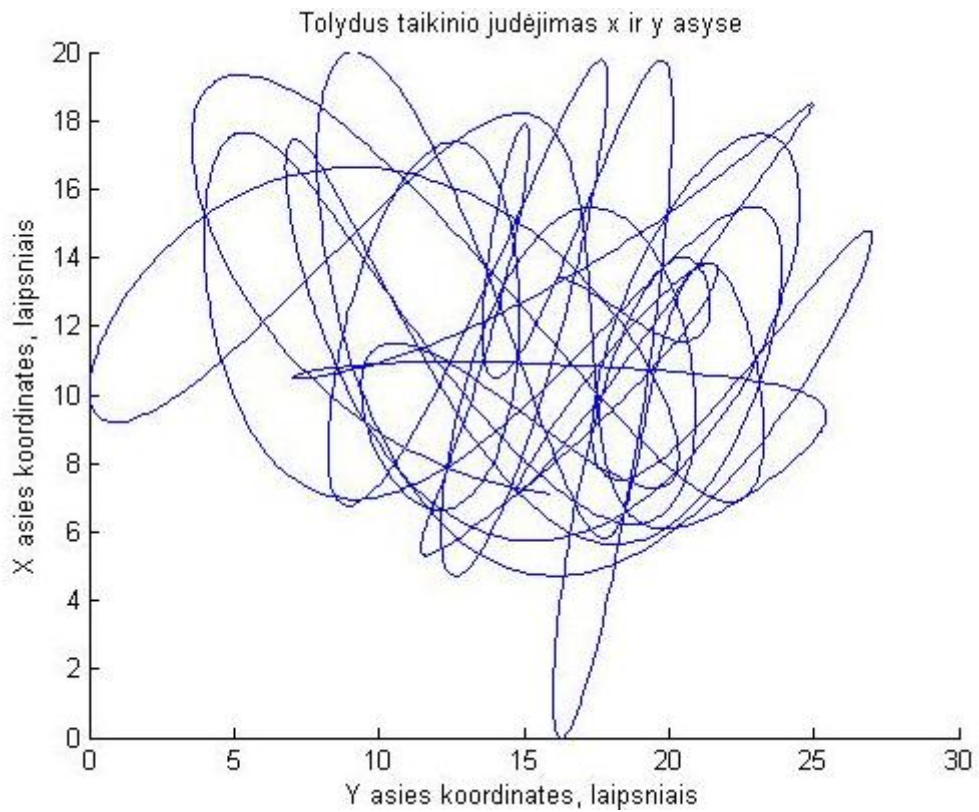
- b) Akies orientacija gali būti nustatyta atlikus šių dviejų taškų matavimus.
- c) Šių dviejų taškų vieta gali būti nustatyta remiantis akių vaizdu, gautu iš kameros
- d) Ragenos sferos centras gali būti nustatytas pagal ragenos atspindžio vietą.
- e) Vyzdžio centras gali būti apskaičiuotas pagal matomo vyzdžio vaizdo kraštus

Sistemos tikslumui pagerinti vaizdo apdorojimo algoritmai specialiai pritaikyti atsižvelgiant į dažniausiai pasitaikančias klaidas. Dėl a) kameros ašies pasukimo kompiuterio monitoriaus atžvilgiu, b) kineskopinių monitorių išlenktumo, c) ragenos paviršiaus išlyginimo prie kraštų yra panaudotos netiesinės vyzdžio sekimo lygtys. Klaidoms, atsirandančioms dėl galvos judesių, minimizuoti yra naudojamas patentuotas asimetrinės apertūros metodas. Akių sekimo sistema dėl kintančio vyzdžio centro atsirandančioms žvilgsnio taško skaičiavimo klaidoms sumažinti naudoja ragenos refrakcijos kompensavimo logiką [11].

## **3.2 Tolydus akių ir rankų sekamųjų judesių tyrimas**

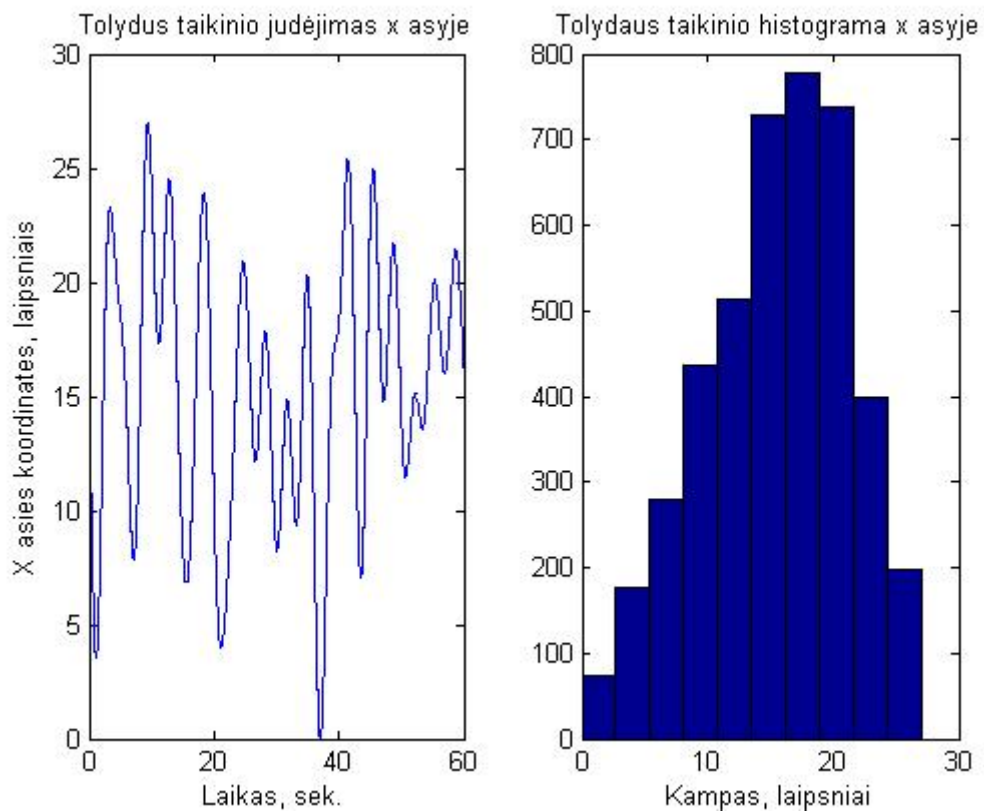
### *3.2.1 Eksperimento aprašymas*

Galutiniai duomenys buvo gauti iš keturių tiriamųjų ir vidutiniškai apskaičiuoti. Taikinio judesys buvo pateiktas kompiuterio ekrane, o tiriamiesiems buvo nurodyta kuo tiksliau sekti taikinį. Akių judesiai visuose bandymuose buvo registruojami, naudojant LC Technologies, Ltd sukurta akių judesių sekimo sistema EyeGaze System. Sekimui ranka buvo panaudota kompiuterio pelė, kurios kursoriumi subjektas turėjo gaudyti taikinį. Tolydiniais akių ir rankų judesiams buvo naudojami taikinio greičiai 15, 30 ir 60 laipsn/sek. Taikinio trajektorija buvo atsitiktinė. Taikinyje judėjo diapazone 27 laipsnių horizontalia kryptimi ir 21 vertikalio kryptimi. Jo trajektorija pavaizduota 12 paveiksle. Taip pat buvo pateikiamas taikinyje tikslai pagal x ir tikslai pagal y ašį.

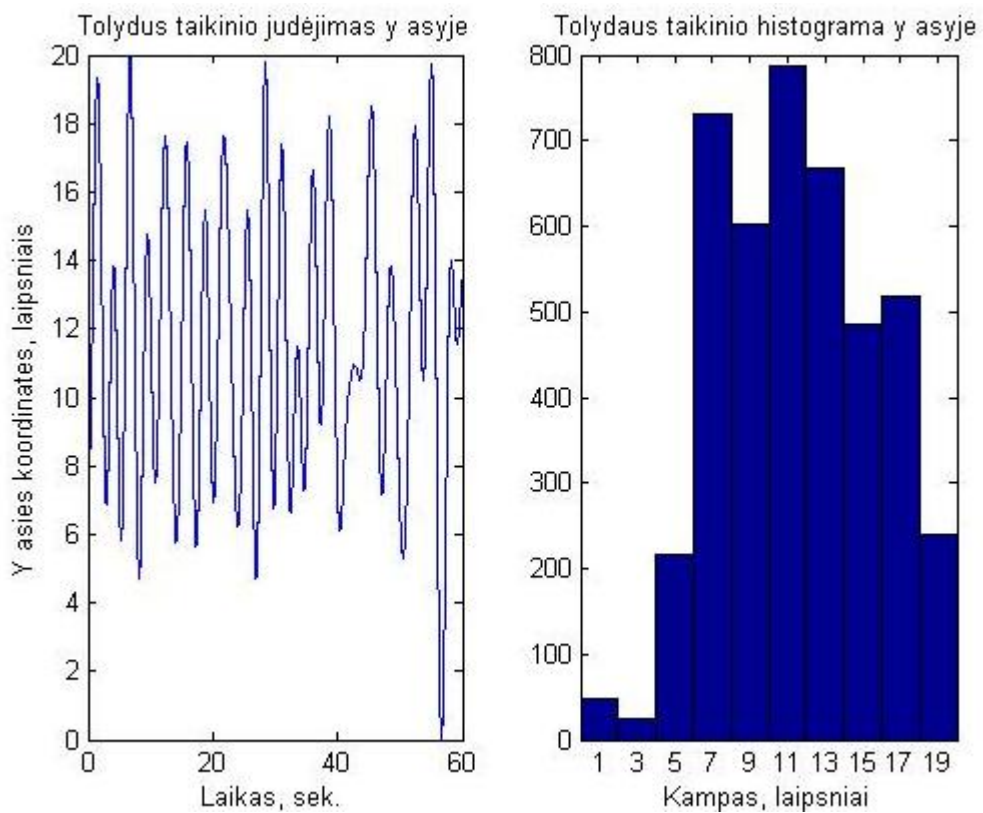


**12 pav.** Tolydinio taikinio atsitiktinė trajektorija pagal abi ašis

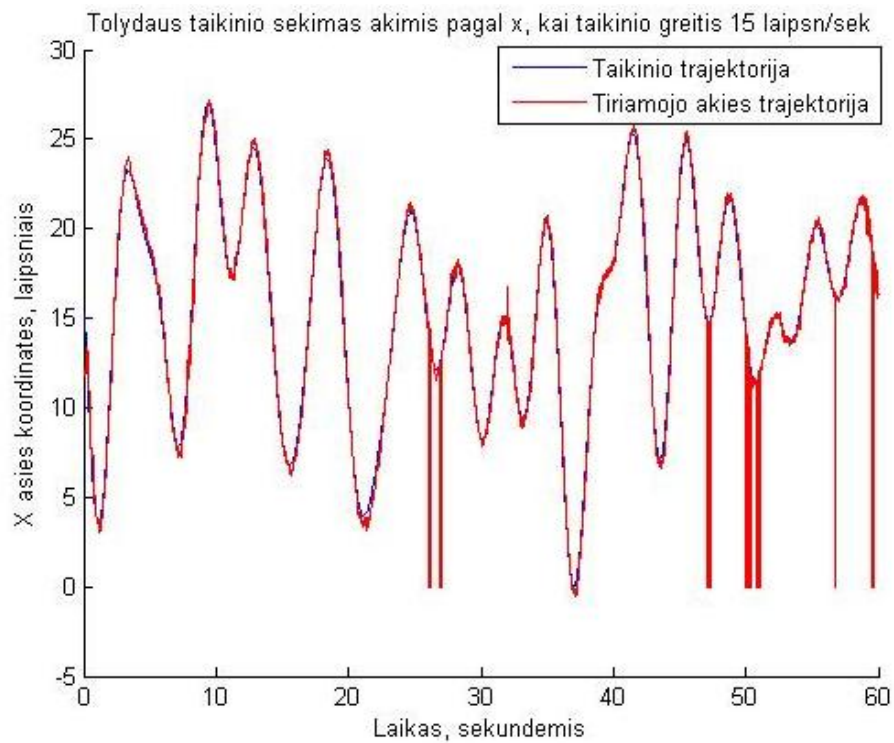
13 ir 14 paveiksluose pateiktas taikinio judėjimas horizontalioje ir vertikalioje koordinatėse atskirai ir atitinkamos jų histogramos. Sekančiuose (15-26) paveiksluose pavaizduota kaip subjektas sekė tolydų taikinį akimis ir ranka pagal  $x$  ir pagal  $y$  koordinates prie taikinio greičių 15, 30 ir 60 laipsn/sek.



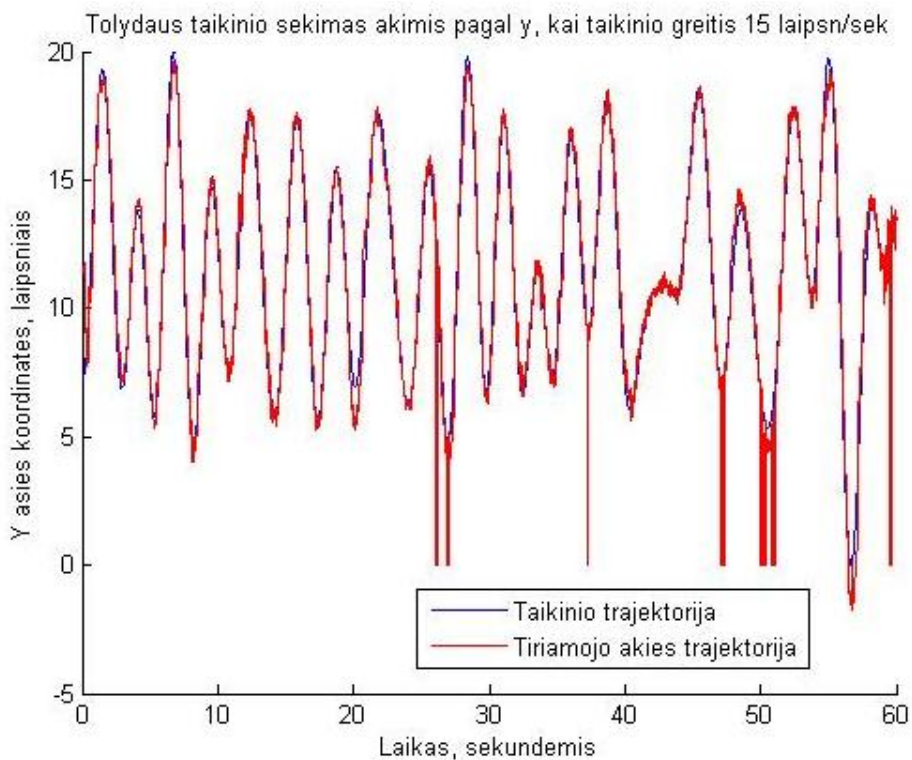
**13 pav.** Taikinio trajektorija pagal x ašį (kairėje) ir jo histograma (dešinėje)



**14 pav.** Taikinio trajektorija pagal y ašį (kairėje) ir jo histograma (dešinėje)

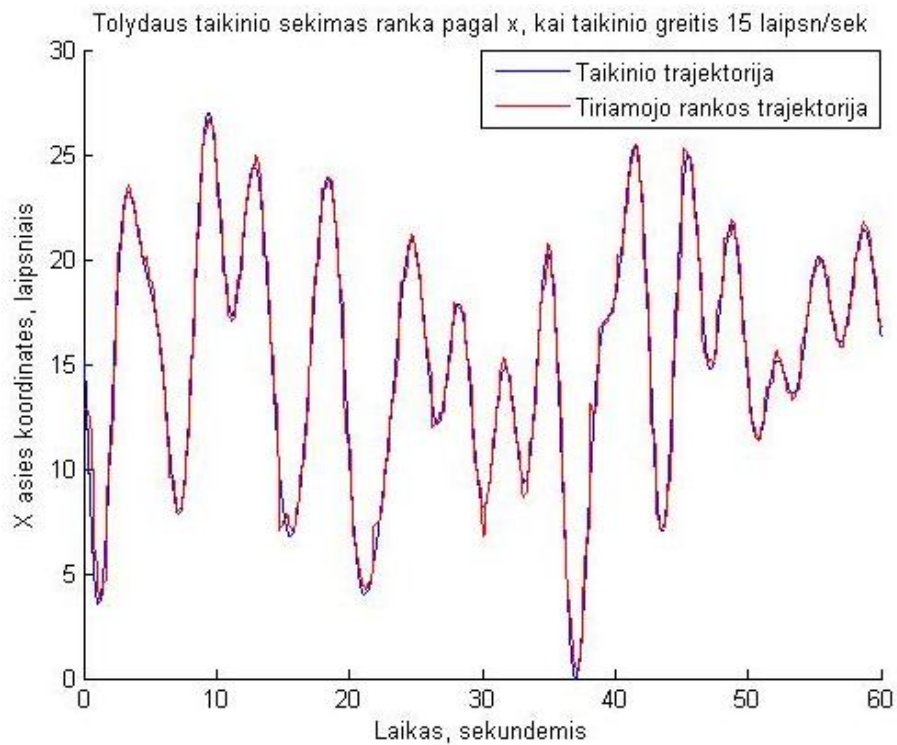


**15 pav.** Tolydus taikinio sekimas akimis pagal  $x$  koordinate, kai taikinio greitis 15 laipsn/sec.

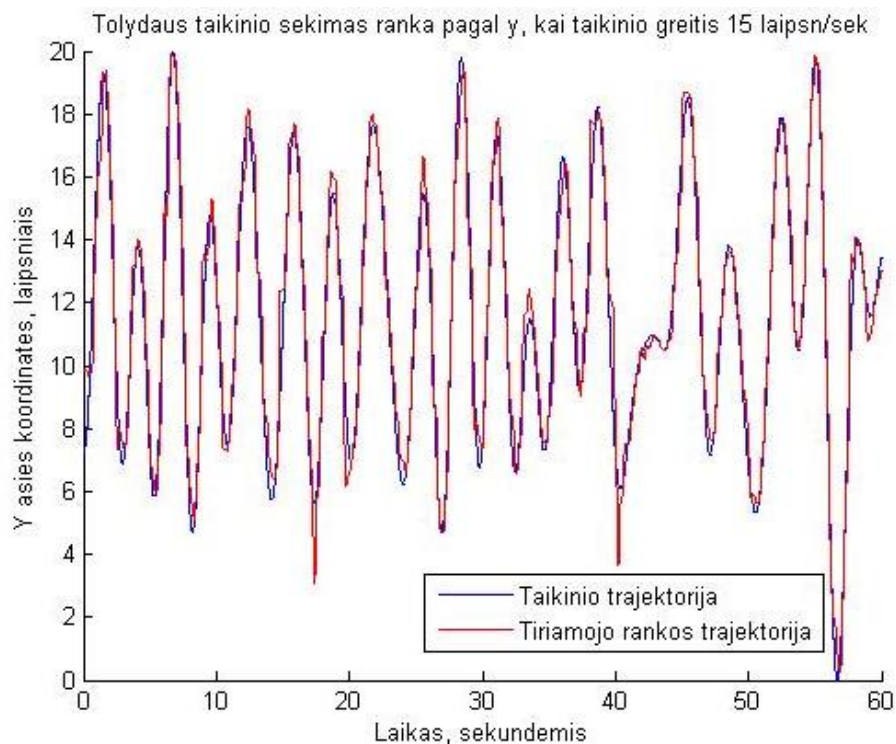


**16 pav.** Tolydus taikinio sekimas akimis pagal  $y$  koordinate, kai taikinio greitis 15 laipsn/sec.

Subjektas akimis seka tolydžiai judantį taikinį pagal  $x$  ir pagal  $y$  koordinates, kai taikinio greitis 15 laipsnių per sekundę. Keliuose vietose gauname akių nukrypimus, (15 ir 16 paveiksluose) raudonos ilgos linijos. Tai reiškia, kad subjektas trumpam buvo nukreipęs žvilgsnį. Taikinio sekimas vyksta be didesnių paklaidų nei pagal  $x$ , nei pagal  $y$  koordinates.



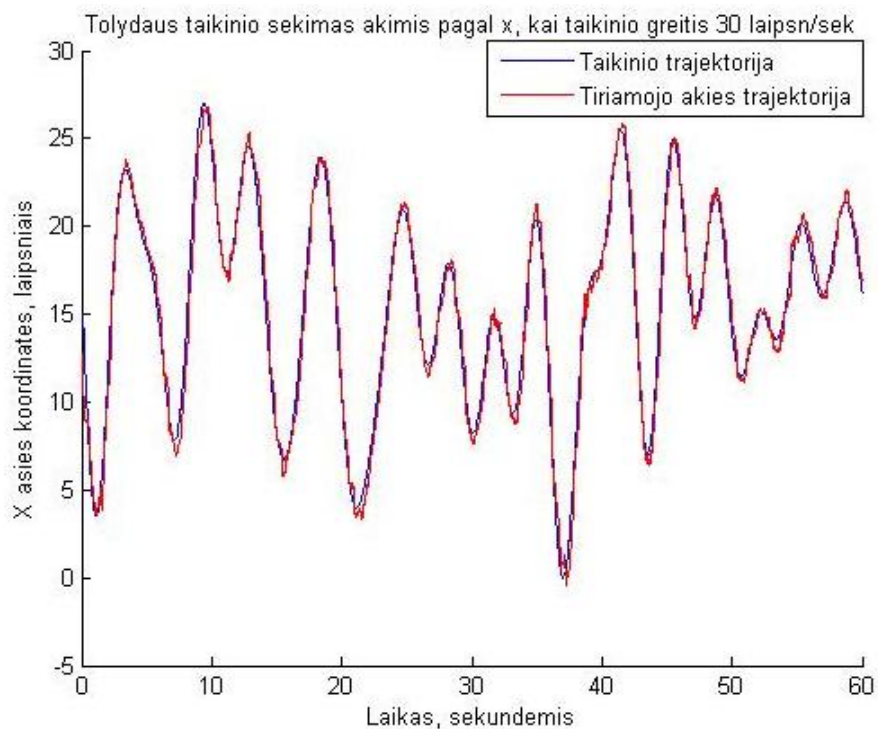
**17 pav.** Tolydus taikinio sekimas ranka pagal  $x$  koordinatę, kai taikinio greitis 15 laipsn/sec



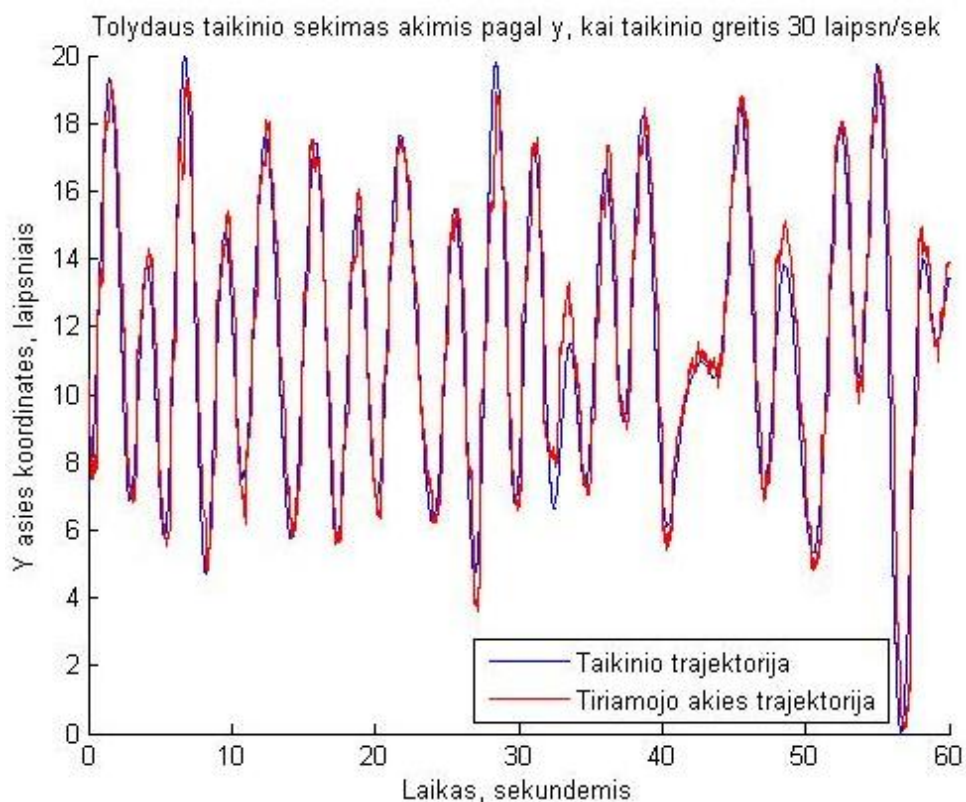
**18 pav.** Tolydus taikinio sekimas ranka pagal  $y$  koordinatę, kai taikinio greitis 15 laipsn/sec

Subjektas ranka seka tolydžiai judantį taikinį pagal  $x$  ir pagal  $y$  koordinates, kai taikinio greitis 15 laipsnių per sekundę. Taikinio sekimas vyksta be didesnių paklaidų nei pagal  $x$ , nei pagal  $y$  koordinates. Šiek tiek rankos sekimas atsilieka nuo taikinio pagal  $y$  koordinatę. Tai nežymi paklaida, tačiau matome, kad daroma paklaida.



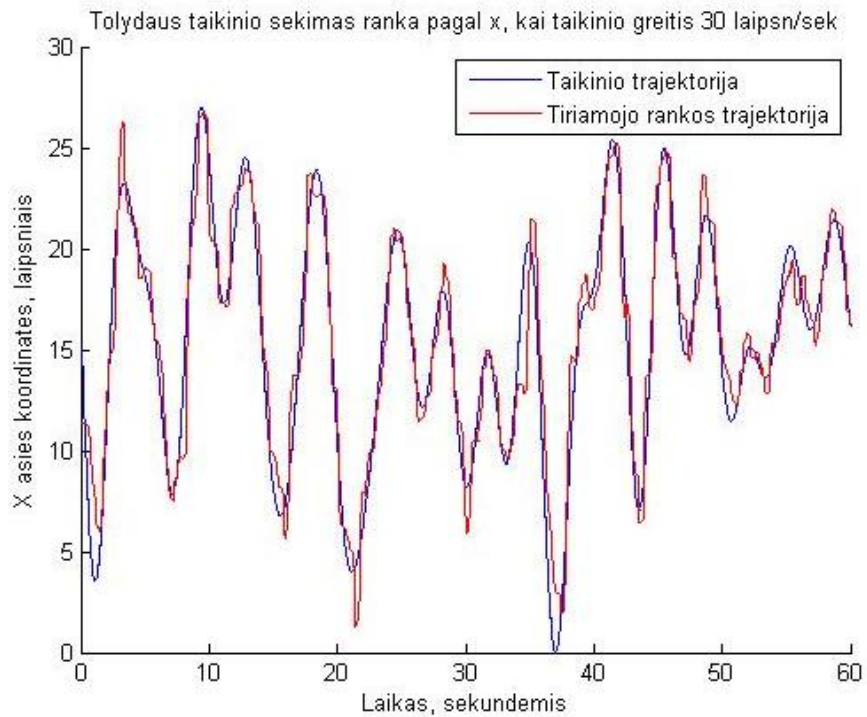


**19 pav.** Tolydus taikinio sekimas akimis pagal x koordinate, kai taikinio greitis 30 laipsn/sec.

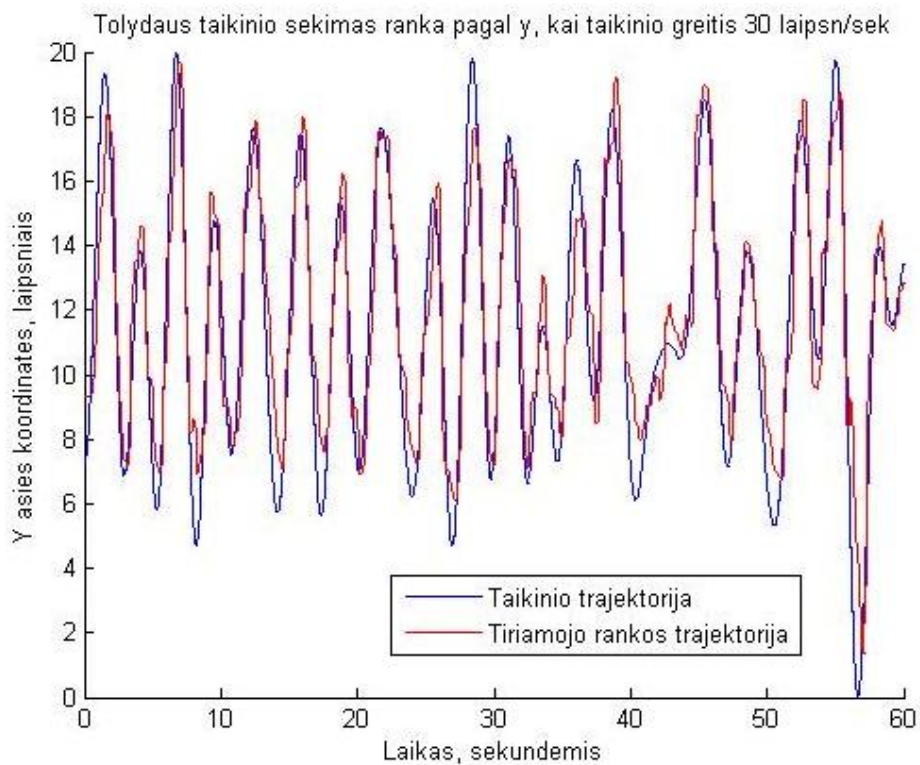


**20 pav.** Tolydus taikinio sekimas akimis pagal y koordinate, kai taikinio greitis 30 laipsn/sec.

Čia pateiktas sekimas akimis, kai taikinio greitis 30 laipsnių per sekundę. Pagal x koordinatę dar akis gerai seka taikinį, tačiau pagal y koordinatę jau akims pradeda matytis didesnis atsilikimas nuo taikinio.

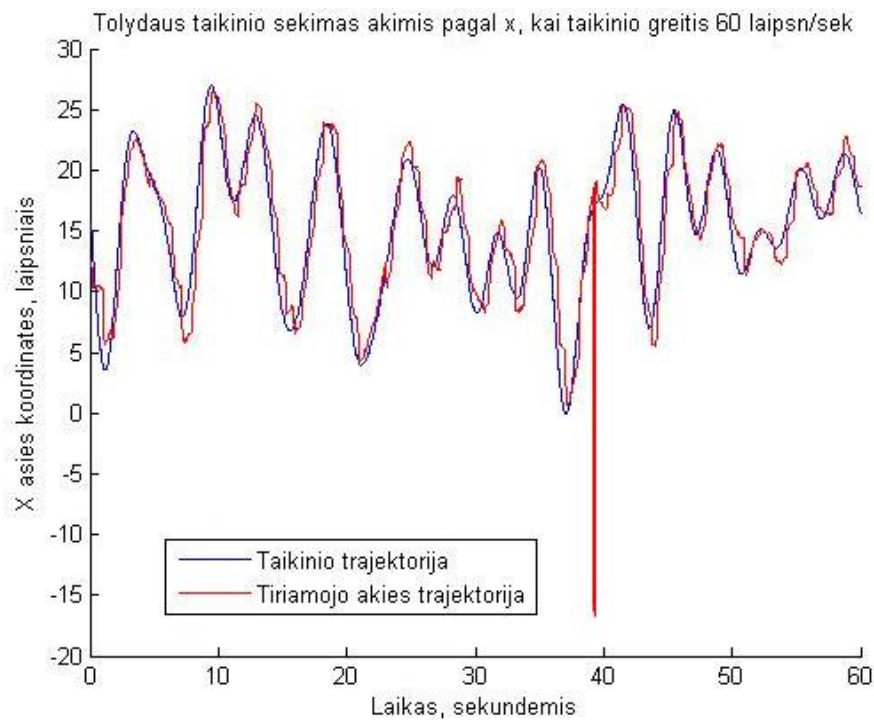


**21 pav.** Tolydus taikinio sekimas ranka pagal x koordinatę, kai taikinio greitis 30 laipsn/sec

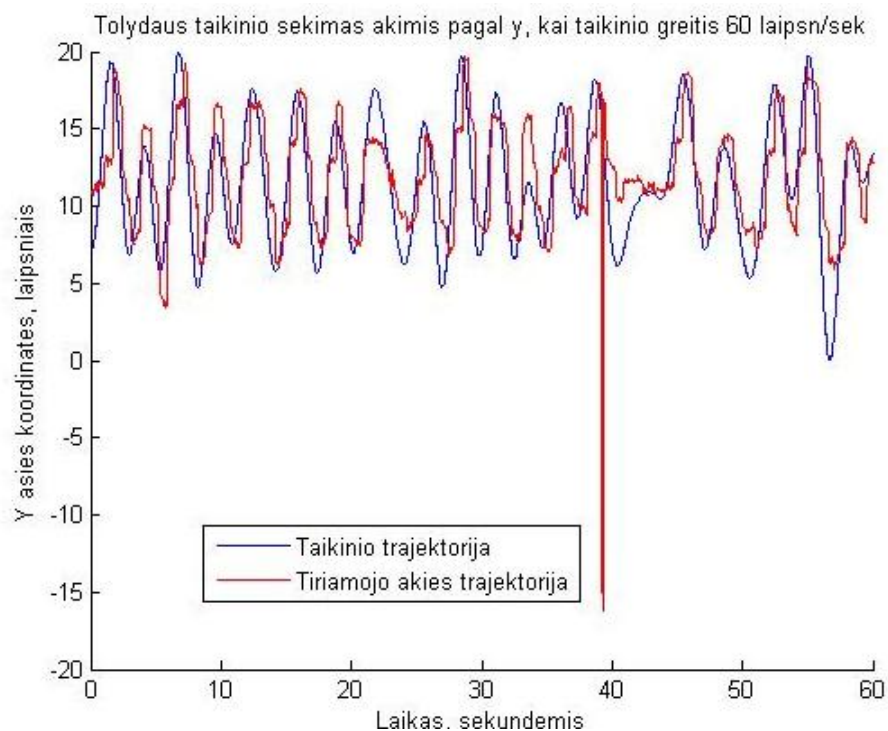


**22 pav.** Tolydus taikinio sekimas ranka pagal y koordinatę, kai taikinio greitis 30 laipsn/sec

Subjektas ranka seka tolydžiai judantį taikinį pagal x ir pagal y koordinates, kai taikinio greitis 30 laipsnių per sekundę. Jau matome, kad ranka prie 30 laipsnių per sekundę daro paklaidas ir pagal x ir pagal y koordinates. Pagal y koordinatę paklaidos kaip ir prie kitų sekimų yra didesnės nei pagal x koordinatę.



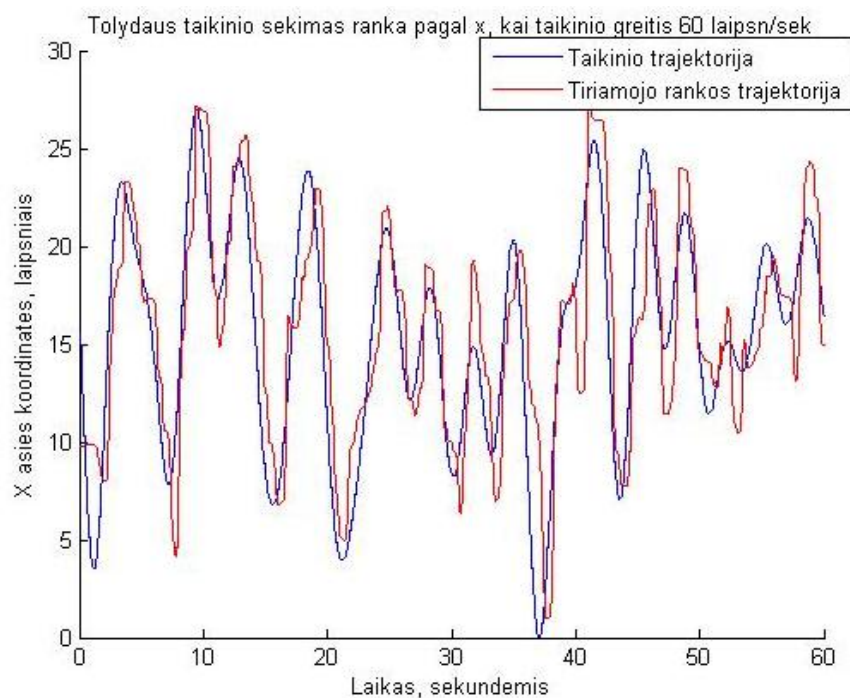
**23 pav.** Tolydaus taikinio sekimas akimis pagal x koordinatę, kai taikinio greitis 60 laipsn/sec.



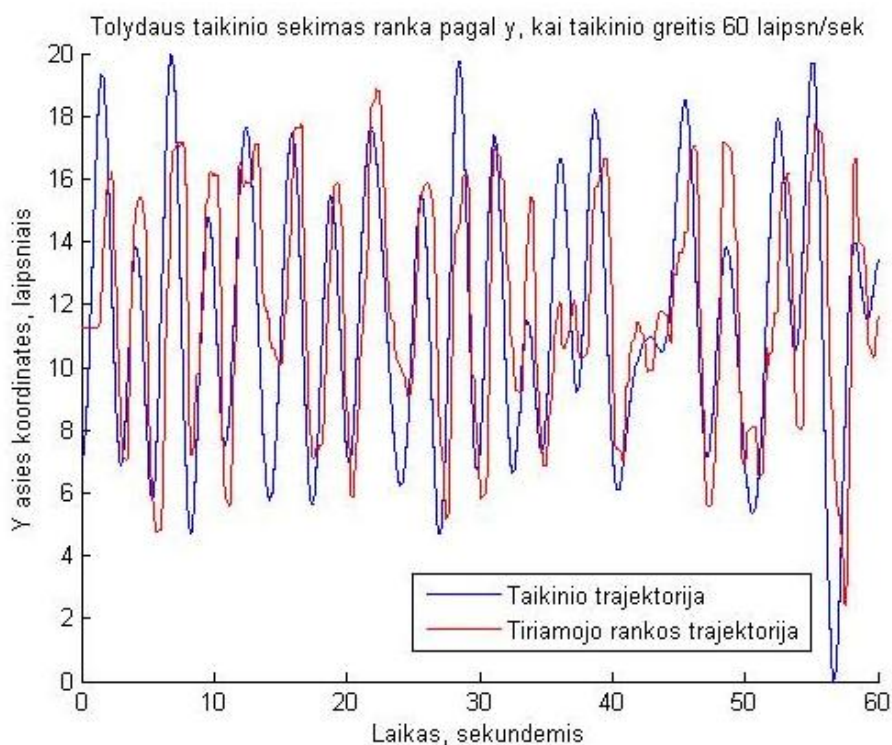
**24 pav.** Tolydaus taikinio sekimas akimis pagal y koordinatę, kai taikinio greitis 60 laipsn/sec.

Subjektas akimis seka tolydžiai judantį taikinį pagal x ir pagal y koordinates, kai taikinio greitis 60 laipsnių per sekundę. Tai didžiausias greitis, atliktas per eksperimentus. Matome vieną didelį nukrypimą, reiškias subjektas buvo trumpam nukreipias žvilgsnį arba užmerkė akis. Paklaidos daromos didelės ir pagal x koordinatę ir pagal y koordinatę. Tačiau išlieka ta pati tendencija, kad pagal y koordinatę daromos didesnės paklaidos, nei pagal x koordinatę.





**25 pav.** Tolydus taikinio sekimas ranka pagal  $x$  koordinatę, kai taikinio greitis 60 laipsn/sec.



**26 pav.** Tolydus taikinio sekimas ranka pagal  $y$  koordinatę, kai taikinio greitis 60 laipsn/sec.

Subjektas ranka seka tolydžiai judantį taikinį pagal  $x$  ir pagal  $y$  koordinates, kai taikinio greitis 60 laipsnių per sekundę. Tai didžiausias greitis, atliktas per eksperimentus. Matome labai dideles paklaidas tiek pagal  $x$ , tiek pagal  $y$  koordinatę. Be to, sekant ranka judantį tolydų taikinį, daromos didesnės paklaidos, nei sekant akimis tolydų taikinį prie tokio pat taikinio judėjimo greičio.

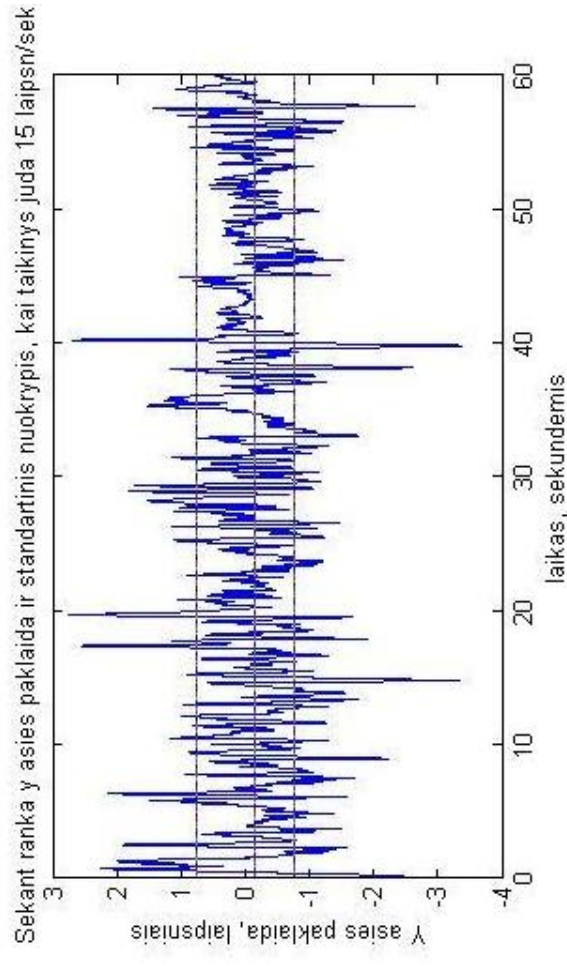
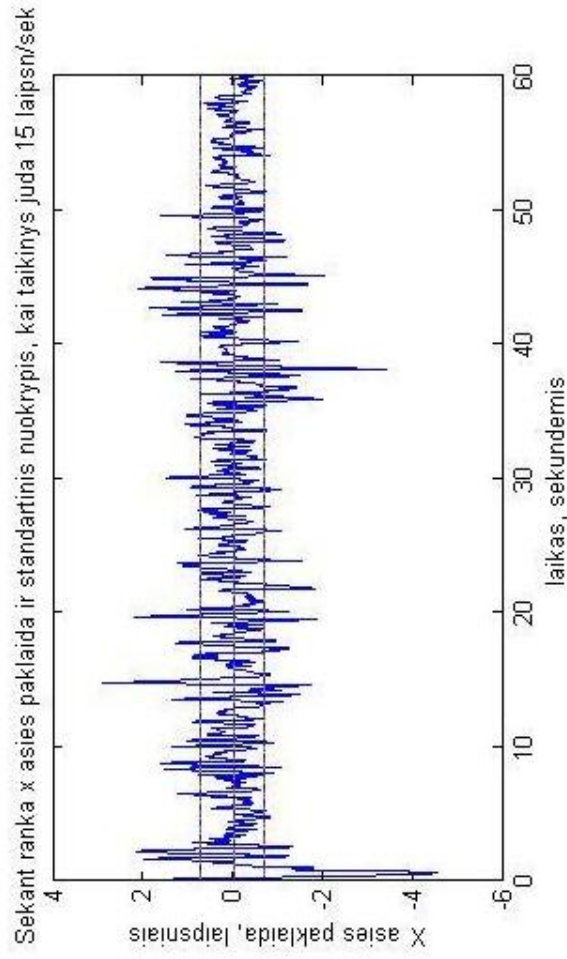
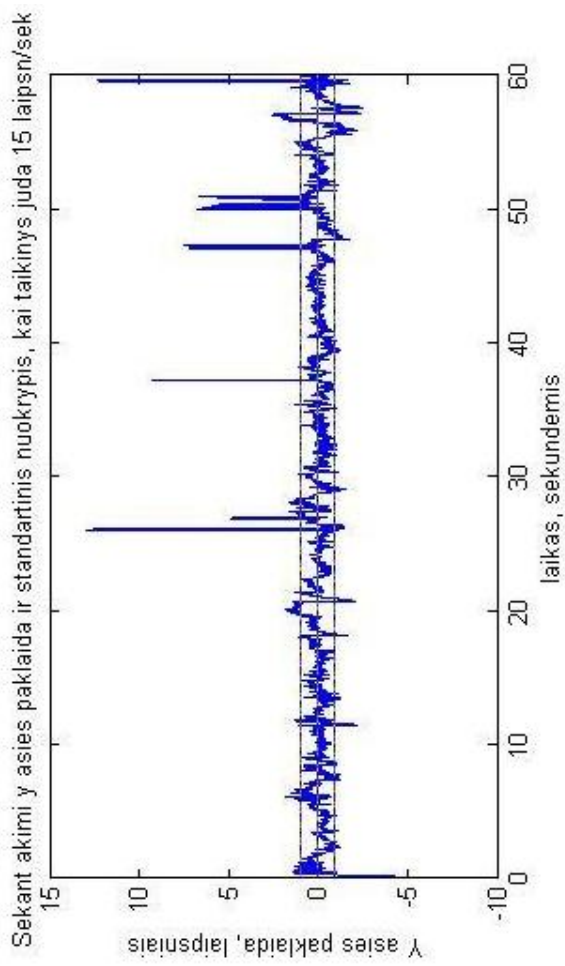
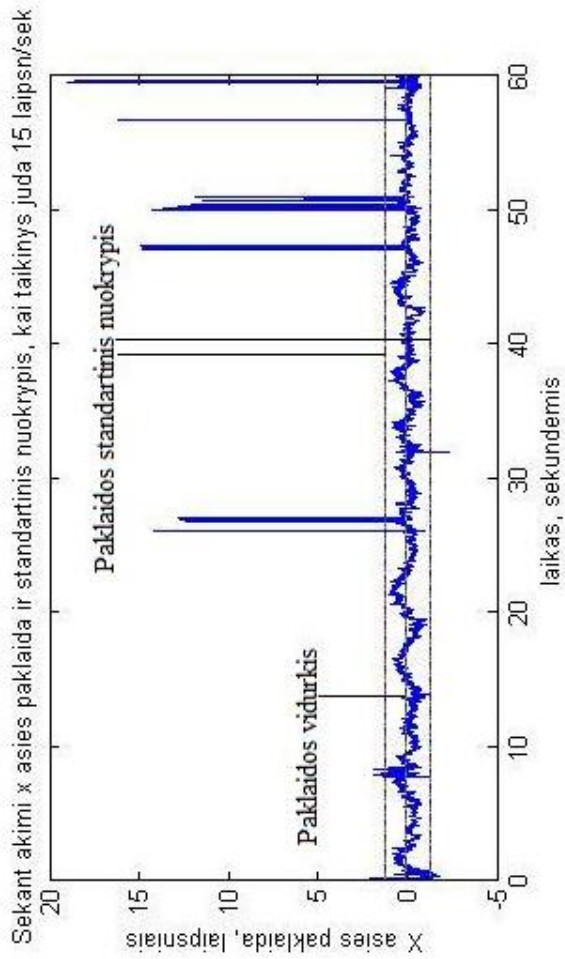
### 3.2.2 Rezultatai

Atlikus eksperimentus galima pamatyti, kad sekant akimis atsitiktine trajektorija judantį taikinį, ypač prie didesnių greičių, kai sekimo paklaidos išauga, gaunamas horizontalus sekimas su mažesnėmis paklaidomis, nei sekimas vertikalia kryptimi. Šitie eksperimentai patvirtina, kad atliekant horizontalų akies judesį, akį judina viena pora raumenų, o atliekant vertikalų judesį, akį judina visos trys poros raumenų. Horizontalūs ir vertikalūs akių judesiai skiriasi, horizontalūs akies judesiai yra tikslesni.

Esant taikinio greičiui 60 laipsn/sek, sekimo paklaidos labai išauga, žmogaus akis ir ranka nebesugeba tiksliai sekti judančio taikinio.

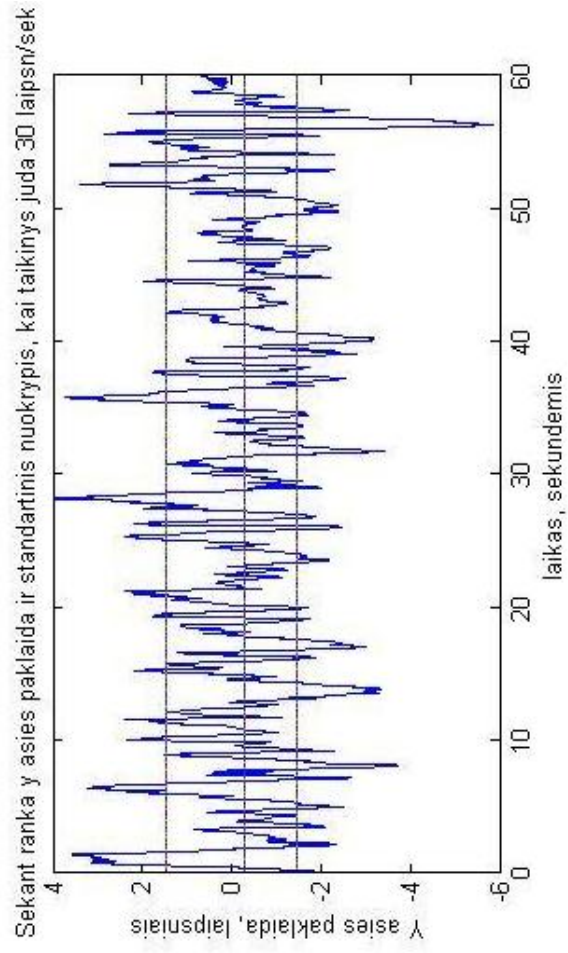
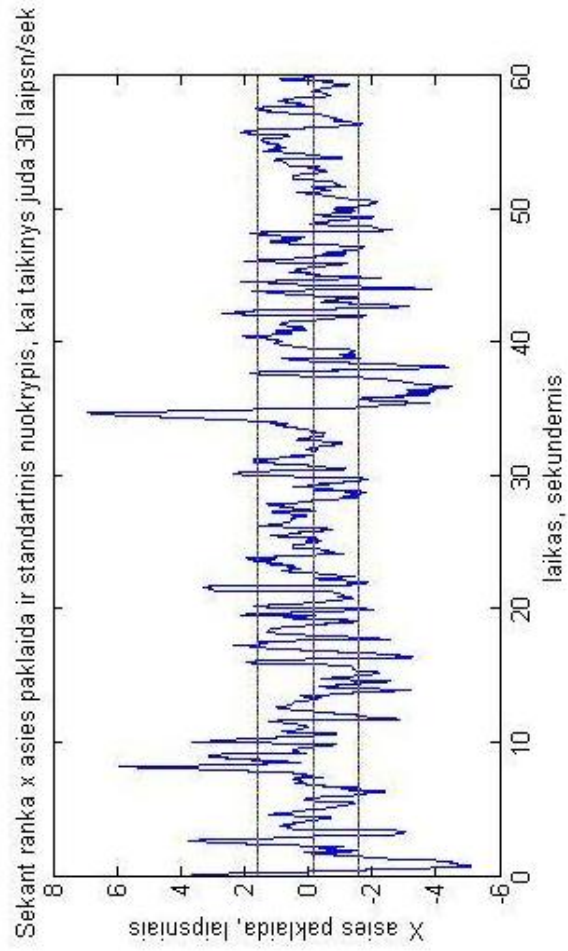
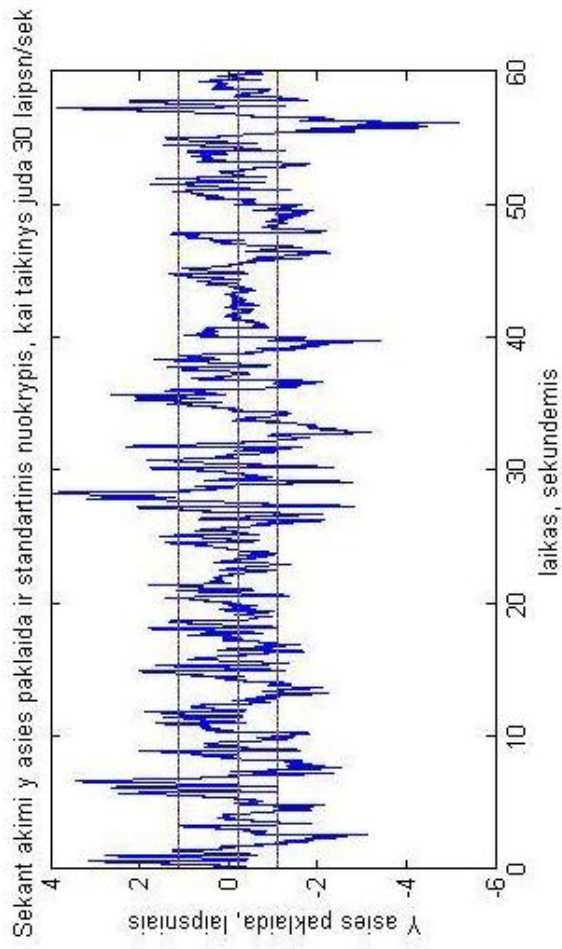
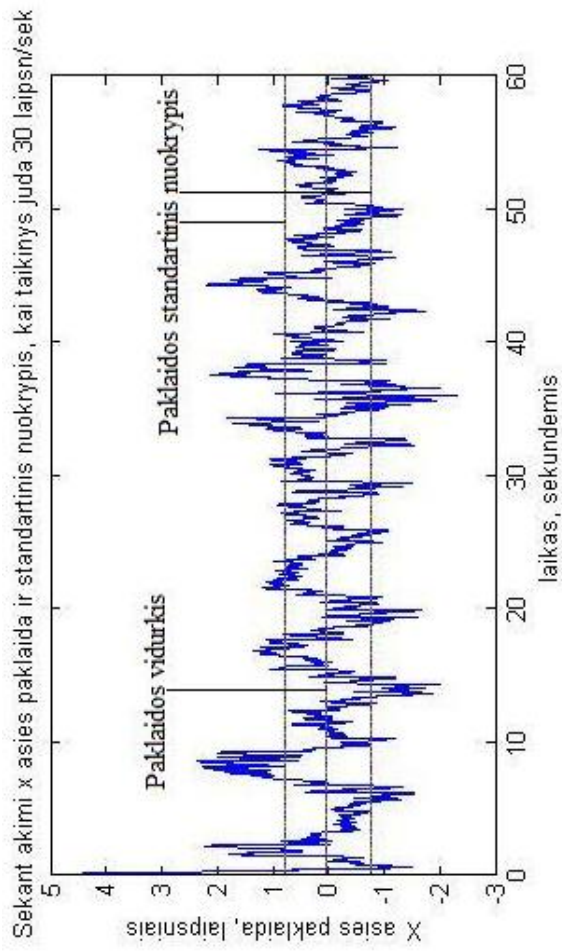
Sekant atsitiktine trajektorija judantį taikinį sekimas akimis yra tikslesnis, nei sekimas ranka. Iš čia galime teigti, kad akies sensomotorinio kanalo informacijos praleidžiamoji geba yra didesnė nei rankų sensomotorinio kanalo informacijos praleidžiamoji geba, t.y. akis sugeba tiksliau nei ranka sekti atsitiktine trajektorija judantį taikinį ir daro mažesnes paklaidas.

Toliau pateiktuose paveiksluose (27 – 29 pav.) parodytos daromos paklaidos ir paklaidų standartiniai nuokrypiai sekant taikinį akimis ir ranka prie įvairių taikinio judėjimo greičių.

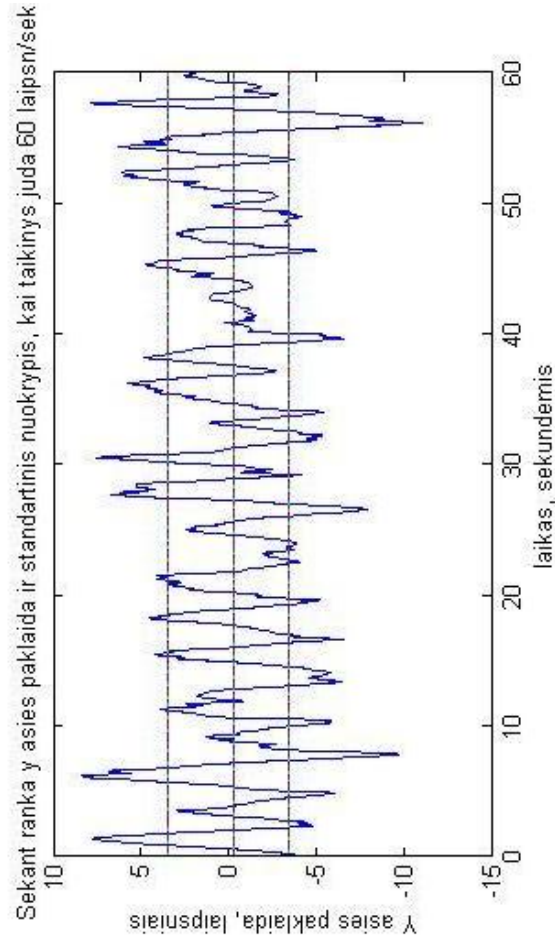
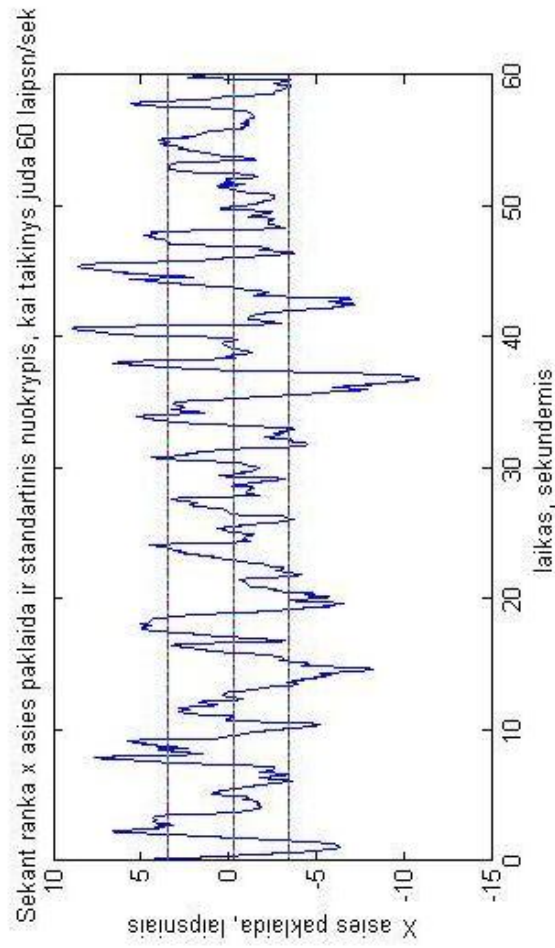
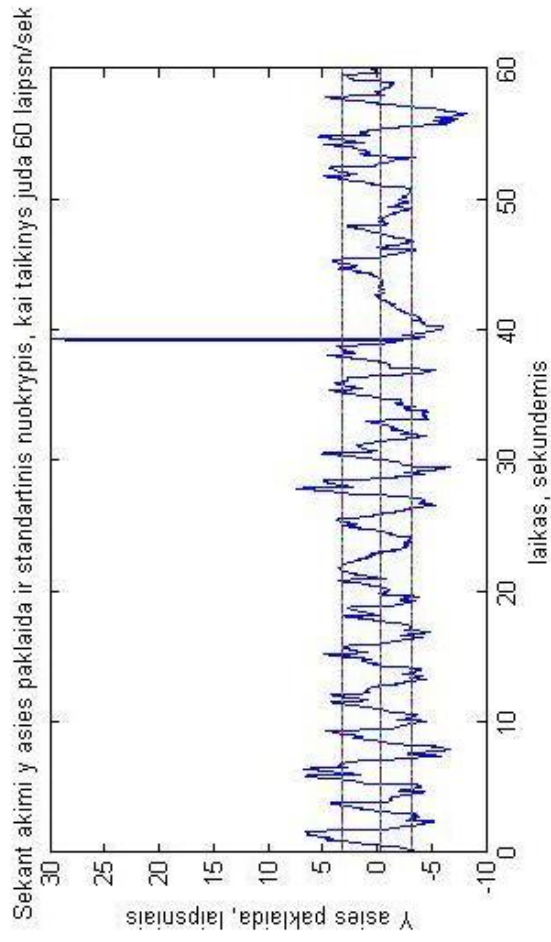
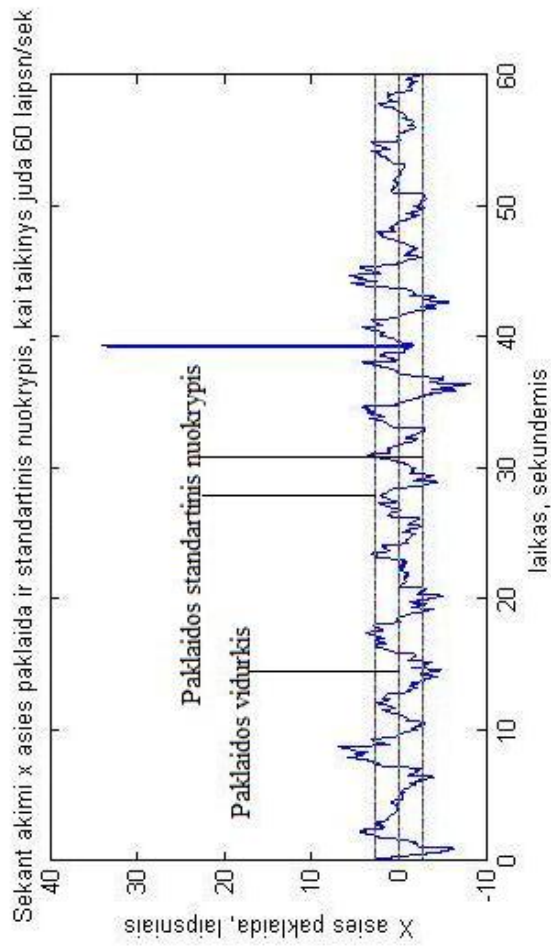


**27 pav.** Paklaidos ir standartinis nuokrypis sekant akimi ir ranka pagal dvimatę koordinatinę sistemą, kai taikinio greitis 15 laipn/sek.





**28 pav.** Paklaidos ir standartinis nuokrypis sekant akimi ir ranka pagal dvimatę koordinatinę sistemą, kai taikinio greitis 30 laipsn/sek.



**29 pav.** Paklaidos ir standartinis nuokrypis sekant akimi ir ranka pagal dvimatę koordinatinę sistemą, kai taikinio greitis 60 laipn/sek.

Pirmoje lentelėje pateikiami tiriamųjų paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais sekant dvikoordinatine trajektorija. 2-je ir 3-je lentelėse pateikiami paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais vienmatėje koordinatinėje sistemoje horizontaliose ir vertikaliose kryptyse atitinkamai.

1 lentelė. Paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais, sekant dvimatę koordinatinę sistemą

Taikinio greitis, laipsn/sek		15		30		60	
		$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$
AS	Akis	0,95	1,20	0,99	1,48	2,43	2,88
	Ranka	0,99	0,93	1,26	1,25	2,97	3,51
JS	Akis	0,35	0,56	0,74	1,09	2,24	2,85
	Ranka	0,64	0,73	1,48	1,41	3,25	3,23
MU	Akis	0,38	0,53	0,77	1,21	2,38	2,81
	Ranka	0,71	0,80	1,19	1,45	2,97	2,83
OB	Akis	0,35	0,54	0,79	1,07	2,41	2,89
	Ranka	1,16	1,11	1,27	1,68	3,16	3,35
Vidurkis	Akis	0,51	0,71	0,82	1,21	2,37	2,85
	Ranka	0,87	0,89	1,30	1,45	3,09	3,23

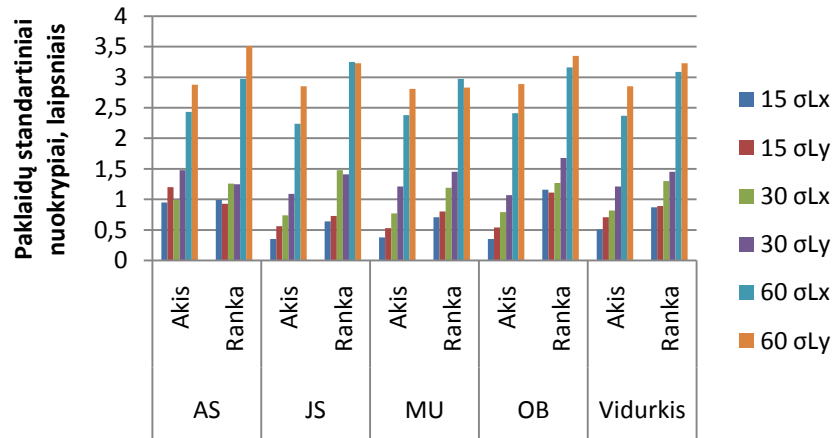
2 lentelė. Paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais, sekant vienmatę koordinatinę sistemą horizontaliai

Taikinio greitis, laipsn/sek		15		30		60	
		$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$
AS	Akis	0,93	0,31	0,91	0,33	2,32	0,29
	Ranka	0,64	0,12	1,29	0,18	3,03	0,22
JS	Akis	0,35	0,20	1,11	0,24	2,23	0,23
	Ranka	0,65	0,07	1,25	0,10	3,10	0,27
MU	Akis	0,36	0,33	0,75	0,23	2,02	0,23
	Ranka	0,60	0,14	1,17	0,13	3,63	0,33
OB	Akis	0,47	0,41	0,74	0,26	2,42	0,94
	Ranka	0,66	0,08	3,30	1,41	2,91	0,29
Vidurkis	Akis	0,53	0,31	0,88	0,26	2,25	0,42
	Ranka	0,63	0,10	1,75	0,46	3,17	0,28

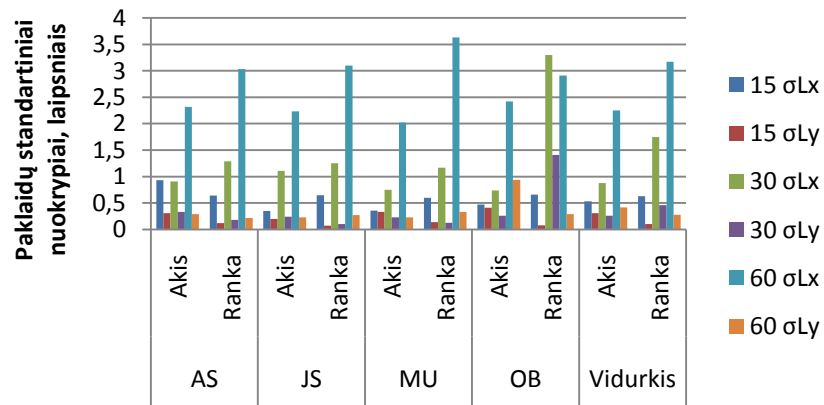
3 lentelė. Paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais, sekant vienmatę koordinatinę sistemą vertikaliai

Taikinio greitis, laipsn/sek		15		30		60	
		$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$
AS	Akis	0,45	1,10	0,25	1,85	0,24	3,29
	Ranka	0,13	0,79	0,30	1,49	0,26	3,65
JS	Akis	0,26	0,95	0,24	1,43	0,28	3,12
	Ranka	0,12	0,84	0,17	1,70	0,25	4,13
MU	Akis	0,49	0,93	0,16	1,24	0,16	3,07
	Ranka	0,14	1,03	0,21	2,03	0,24	3,10
OB	Akis	0,19	0,97	0,25	1,90	0,22	2,97
	Ranka	0,24	1,06	0,17	1,88	0,44	3,45
Vidurkis	Akis	0,35	0,99	0,22	1,61	0,23	3,11
	Ranka	0,16	0,93	0,21	1,78	0,30	3,58

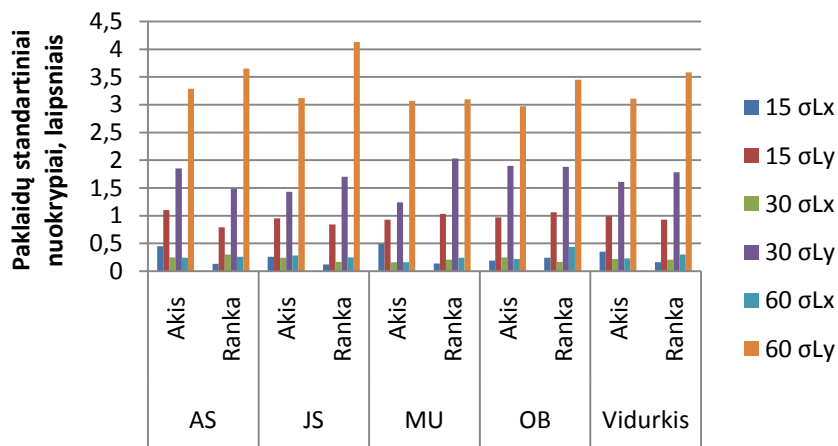
Kiekvienos lentelės duomenys pateikti stupelinėse diagramose. Čia analizuojant 30 paveikslą gerai matosi, jog akies daromos paklaidos yra mažesnės nei rankos, sekant tolydžiai judančio taikinio trajektoriją prie įvairių greičių. O tai reiškia, kad ir paklaidų standartiniai nuokrypiai akiai yra mažesni nei rankai. Be to tiek akei tiek rankai prie įvairių greičių standartiniai nuokrypiai yra mažesni pagal x koordinatę, nei pagal y koordinatę.



30 pav. Paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais, sekant dvimatę koordinatinę sistemą



31 pav. Paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais, sekant vienmatę koordinatinę sistemą horizontaliai



32 pav. Paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais, sekant vienmatę koordinatinę sistemą vertikaliai

$$\text{Pasinaudojant formule } C_{p2} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} [F_x t \log \left( 1 + \frac{\sigma_{Tx}^2}{\sigma_{Lx}^2} \right) + F_y t \log \left( 1 + \frac{\sigma_{Ty}^2}{\sigma_{Ly}^2} \right)]$$

(2.21) yra apskaičiuojama akių ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamosios gebos. Jos surašytos sekančiose lentelėse.

4 lentelė. Akių ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamosios gebos, bitai/sekundę. Sekant taikinį, judantį dvimate koordinatine sistema

Taikinio greitis, laipsn/sek		15			30			60		
		C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>	C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>	C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>
AS	Akis	1,95	1,83	3,79	3,82	3,11	6,93	4,05	3,20	7,25
	Ranka	1,91	2,18	4,09	3,31	3,55	6,86	3,34	2,48	5,82
JS	Akis	3,03	2,88	5,90	4,43	3,91	8,35	4,35	3,24	7,59
	Ranka	2,38	2,51	4,89	2,99	3,24	6,24	3,04	2,77	5,81
MU	Akis	2,95	2,97	5,92	4,36	3,65	8,00	4,12	3,29	7,42
	Ranka	2,26	2,39	4,65	3,44	3,17	6,61	3,34	3,27	6,60
OB	Akis	3,02	2,94	5,96	4,30	3,97	8,27	4,08	3,19	7,27
	Ranka	1,75	1,94	3,68	3,30	2,80	6,11	3,13	2,64	5,77
Vidurkis	Akis	2,74	2,65	5,39	4,23	3,66	7,89	4,15	3,23	7,38
	Ranka	2,07	2,25	4,33	3,26	3,19	6,46	3,26	3,19	6,46

5 lentelė. Akių ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamosios gebos, bitai/sekundę. Sekant taikinį, judantį vienmate koordinatine sistema horizontaliai

Taikinio greitis, laipsn/sek		15			30			60		
		C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>	C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>	C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>
AS	Akis	1,97	0,41	2,38	4,00	0,43	4,43	4,23	0,40	4,63
	Ranka	2,38	0,19	2,56	3,27	0,29	3,56	3,27	0,33	3,60
JS	Akis	3,03	0,31	3,34	3,58	0,35	3,93	4,37	0,35	4,71
	Ranka	2,36	0,04	2,41	3,33	0,13	3,46	3,20	0,39	3,59
MU	Akis	2,98	0,44	3,41	4,40	0,34	4,74	4,74	0,34	5,09
	Ranka	2,45	0,21	2,65	3,47	0,21	3,67	2,69	0,43	3,12
OB	Akis	2,71	0,49	3,19	4,44	0,37	4,81	4,06	0,69	4,76
	Ranka	2,35	0,09	2,44	1,50	0,80	2,29	3,41	0,40	3,81
Vidurkis	Akis	2,67	0,41	3,08	4,11	0,37	4,48	4,35	0,45	4,80
	Ranka	2,38	0,13	2,52	2,89	0,35	3,25	3,14	0,39	3,53

6 lentelė. Akių ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamosios gebos, bitai/sekundę. Sekant taikinį, judantį vienmate koordinatine sistema vertikaliai

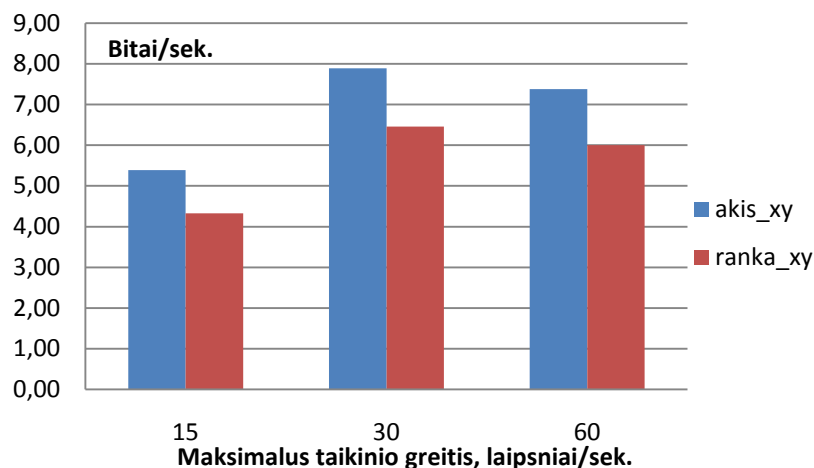
Taikinio greitis, laipsn/sek		15			30			60		
		C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>	C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>	C <sub>X</sub>	C <sub>Y</sub>	C <sub>Z</sub>
AS	Akis	0,51	1,95	2,46	0,37	2,56	2,92	0,36	2,71	3,06
	Ranka	0,19	2,40	2,59	0,41	3,09	3,50	0,37	2,35	2,72
JS	Akis	0,37	2,14	2,51	0,35	3,20	3,56	0,39	2,90	3,29
	Ranka	0,19	2,32	2,51	0,27	2,77	3,04	0,36	1,98	2,34



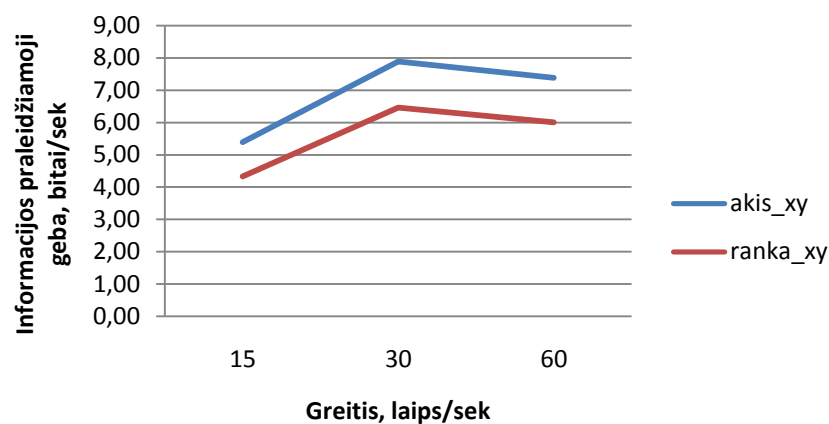
MU	Akis	0,53	2,17	2,70	0,25	3,57	3,82	0,25	2,95	3,20
	Ranka	0,22	2,04	2,26	0,32	2,35	2,67	0,35	2,92	3,27
OB	Akis	0,30	2,12	2,42	0,36	2,50	2,86	0,33	3,08	3,41
	Ranka	0,35	2,00	2,35	0,26	2,52	2,79	0,50	2,54	3,04
Vidurkis	Akis	0,43	2,10	2,52	0,33	2,96	3,29	0,33	2,91	3,24
	Ranka	0,24	2,19	2,43	0,31	2,68	3,00	0,40	2,45	2,84

Sekant dvimate koordinatine sistema tolygiai judantį atsitiktine trajektorija taikinį, akies ir rankos sensomotorinių kanalų suvidurkinta informacijos praleidžiamoji geba prie skirtingų taikinio greičių pateikta 33 paveiklėse.

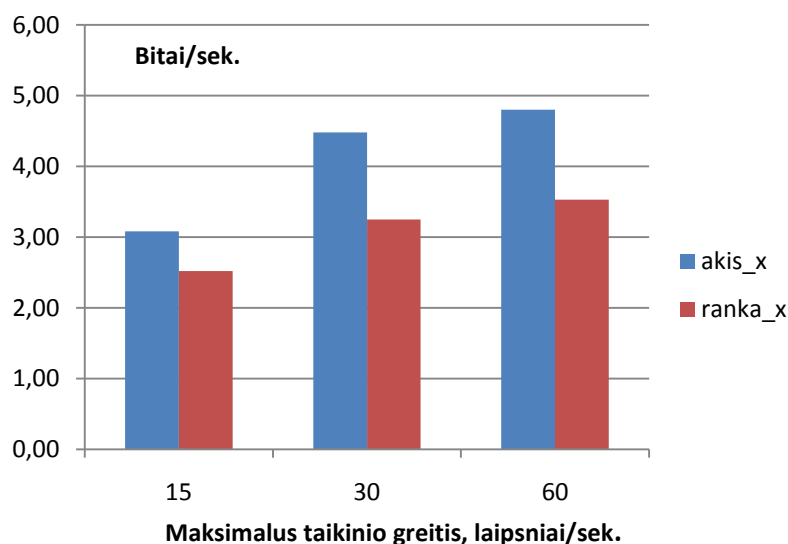
Matome, kad kai taikinio greitis didėja, didėja ir perduotas informacijos kiekis, tačiau pasiekus tam tikrą ribą, informacijos kiekis pradeda mažėti, taip pat vyksta ir pagal horizontalią ašį sekant (35 paveikslas) ir pagal vertikalią ašį sekant (36 paveikslas). Vadinasi žmogaus sensomotorinė sistema turi ribinę informacijos praleidžiamąją gebą ir matome, kad žmogaus okulomotorinė sistema turi didesnę informacijos praleidžiamąją gebą nei rankos sensomotorinė sistema.



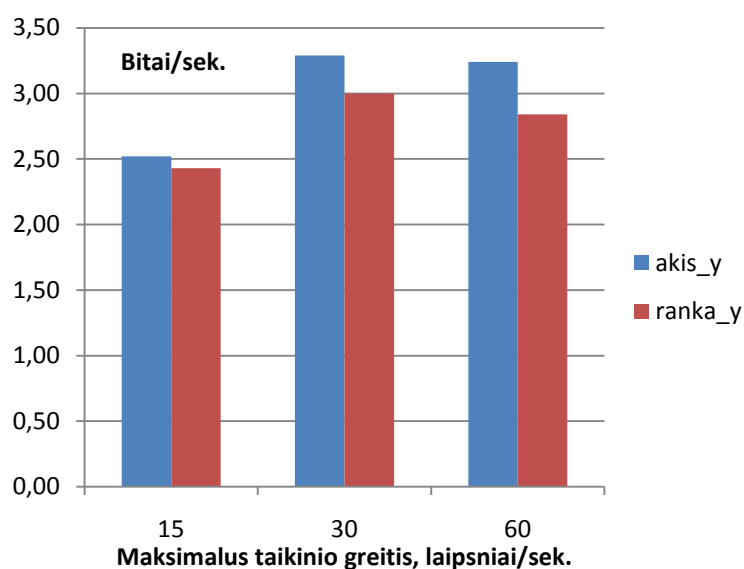
**33 pav.** Tiriamųjų suvidurkinti rezultatai. Sekant tolydų taikinį pagal abi koordinates (x ir y) praleidžiamoji geba



**34 pav.** Dvimatėje koordinatinėje sistemoje akies ir rankos sensomotorinių kanalų suvidurkinta informacijos praleidžiamoji geba

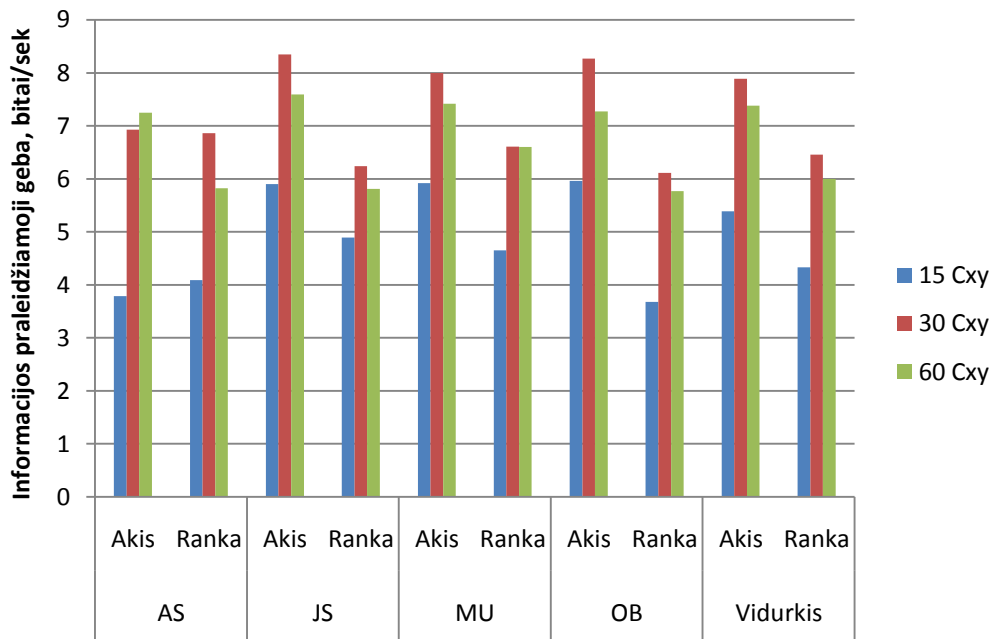


**35 pav.** Tiriamųjų suvidurkinti rezultatai. Sekant tolydų taikinį horizontaliai informacijos praleidžiamoji geba



**36 pav.** Tiriamųjų suvidurkinti rezultatai. Sekant tolydų taikinį vertikaliai informacijos praleidžiamoji geba

37 paveikslėlyje parodyta kiekvieno subjekto akies ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamoji geba sekant tolydžiai judančio taikinio trajektorija dvimatėje koordinacinių sistemoje prie įvairių taikinio greičių. Akies bei rankos sensomotorinio kanalo informacijos praleidžiamoji geba pati mažiausia kai taikinio greitis yra 15 laipsnių per sekundę ir rankos ir akies sensomotorinio kanalo. Didžiausia, kai taikinio greitis yra 30 laipsnių per sekundę.



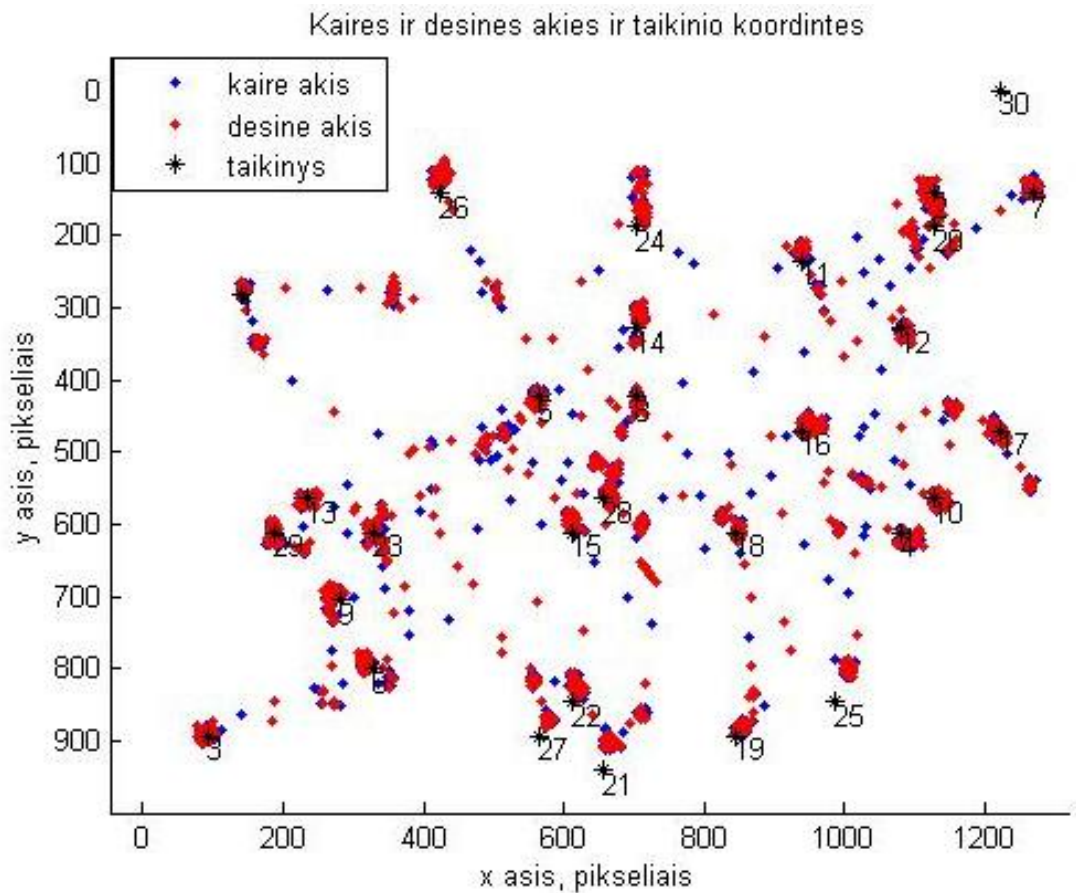
**37 pav.** Kiekvieno subjekto akies ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamoji geba, sekant taikinį prie įvairių greičių

### 3.3 Diskretus akių ir rankų sekamųjų judesių tyrimas

#### 3.3.1 Eksperimento aprašymas

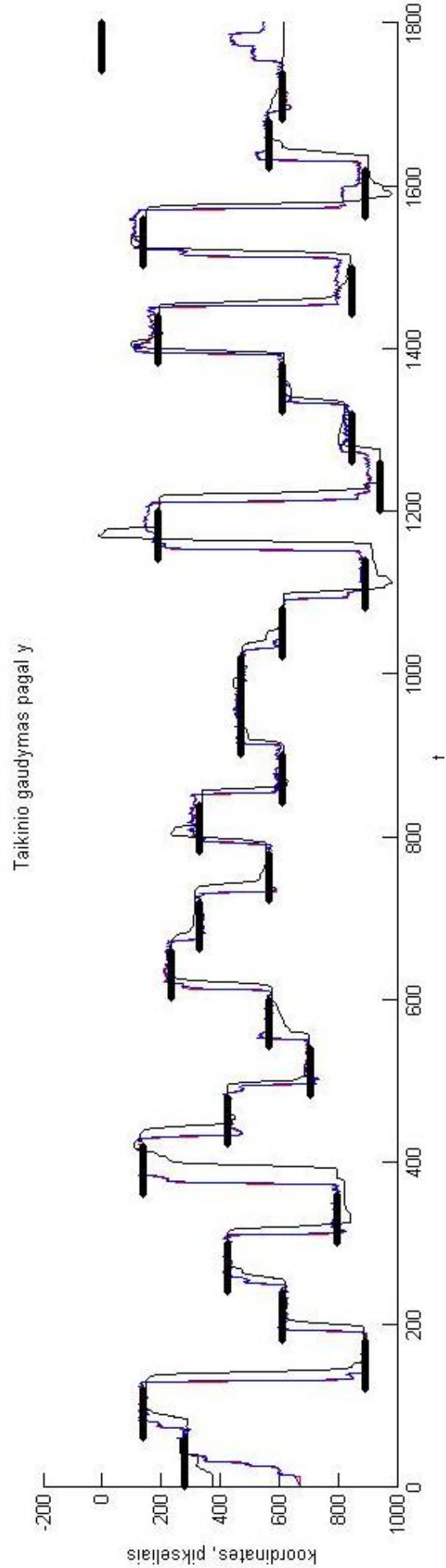
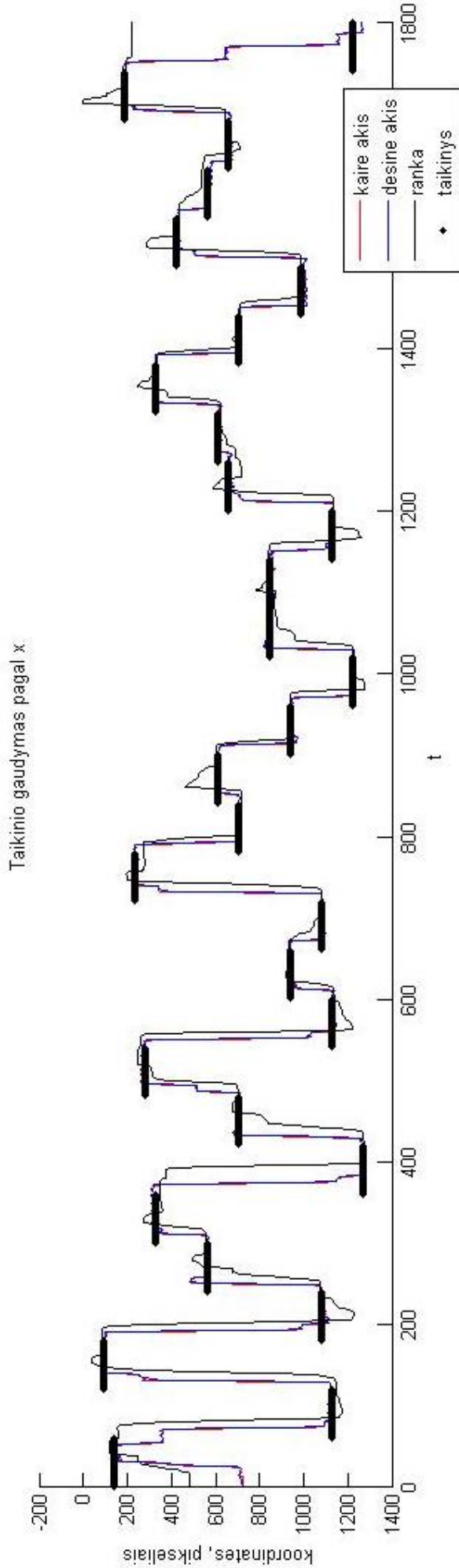
Akių ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamosios gebos eksperimentiniam tyrimui ir skaičiavimui per dvidimensinį sekimą buvo panaudoti diskretiniai taikinio šuoliai. Taikiniai yra talpinami 1 laipsnio atstume vienas tarp kito. Taikinių amplitudžių diapazonas yra: 41 horizontalia kryptimi ir 31 vertikalia kryptimi. Taikinių atsiradimo padėtis yra išrenkama atsitiktiniu būdu, su tarpsakadiniu intervalu  $D$ . Per eksperimentinę sesiją tarpsakadinis intervalas buvo suderintas kiek galima mažesnis kol atsakymai (sugaudymai) į visus atsiradusius taikinius yra tiksliai įvykdomi. Sakadų tikslumas buvo išmatuotas nustatant standartinę paklaidų nuokrypį  $\sigma_x$  ir  $\sigma_y$ , t.y. skirtumų tarp taikinio padėties ir akių padėties atskirai horizontaliomis ir vertikaliomis kryptimis tuštuoju po kiekvieno šuolio.

Diskretinio taikinio judėjimo trajektorijos pavyzdys pateiktas 38 paveiksle. Čia matome kaip taikiny sokinėjo iš vienos vietos į kitą. Taip pat šiame paveiksle yra pavaizduoti kairios ir dešinės akies šuoliukai, kai akimis subjektas gaudė taikinį.

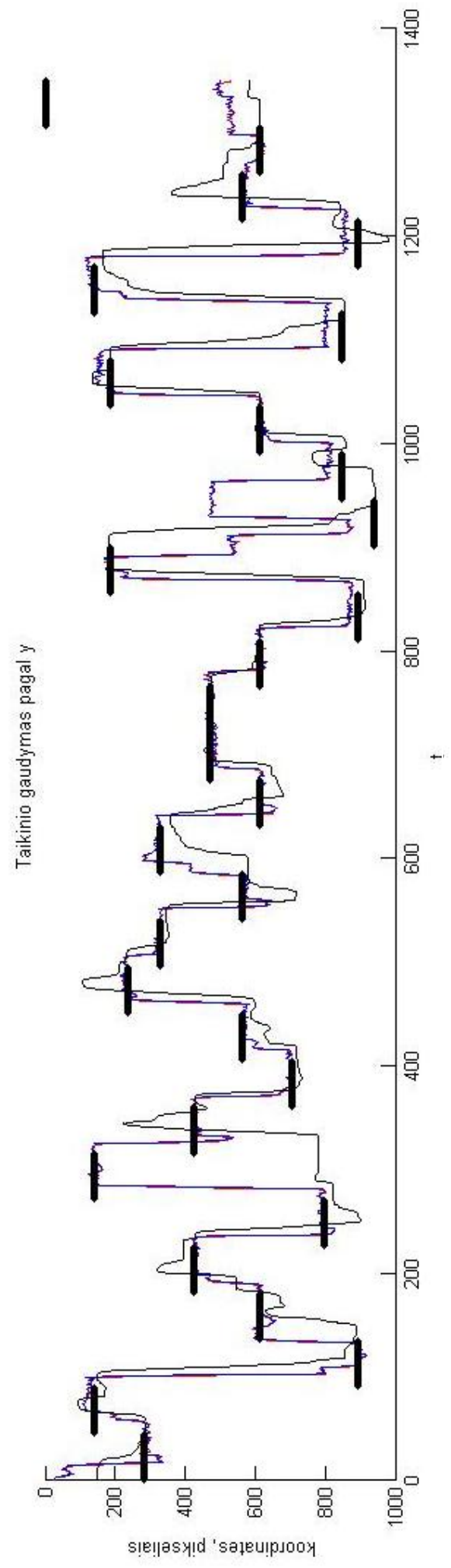
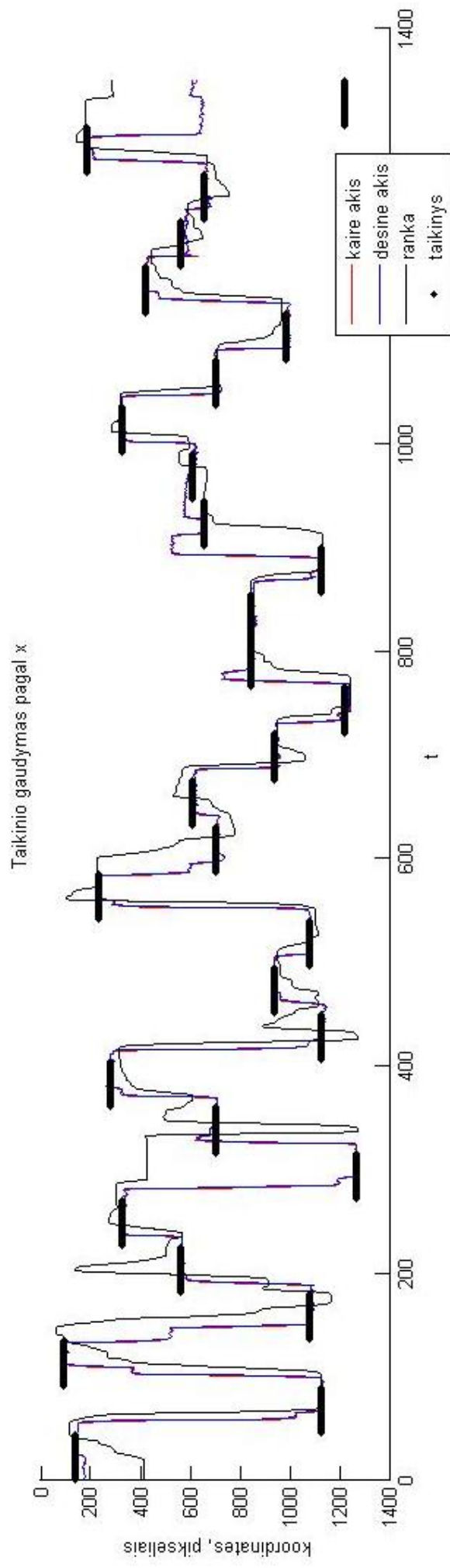


**38 pav.** Taikinio (juodos žvaigždutės) ir akių (kairios – mėlyni taškai, dešinės – raudoni taškai) judėjimai pikseliais atliekant eksperimentą

Sekančiuose (39-48) paveiksluose pavaizduota kaip subjektas sekė diskretų taikinį akimis ir ranka pagal  $x$  ir pagal  $y$  koordinates, esant tarpsakadiniams intervalams 1, 0.75, 0.5, 0.4, 0.3, 0.25, 0.2, 0.15 ir 0.1 sekundės.



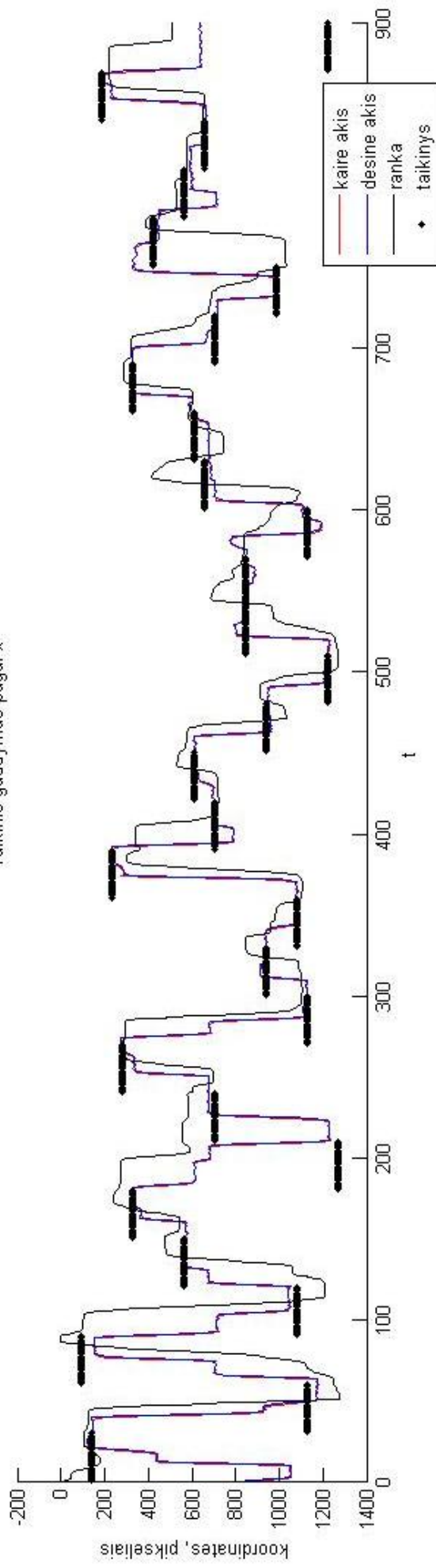
**39 pav.** Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadimis intervalas 1 sek.



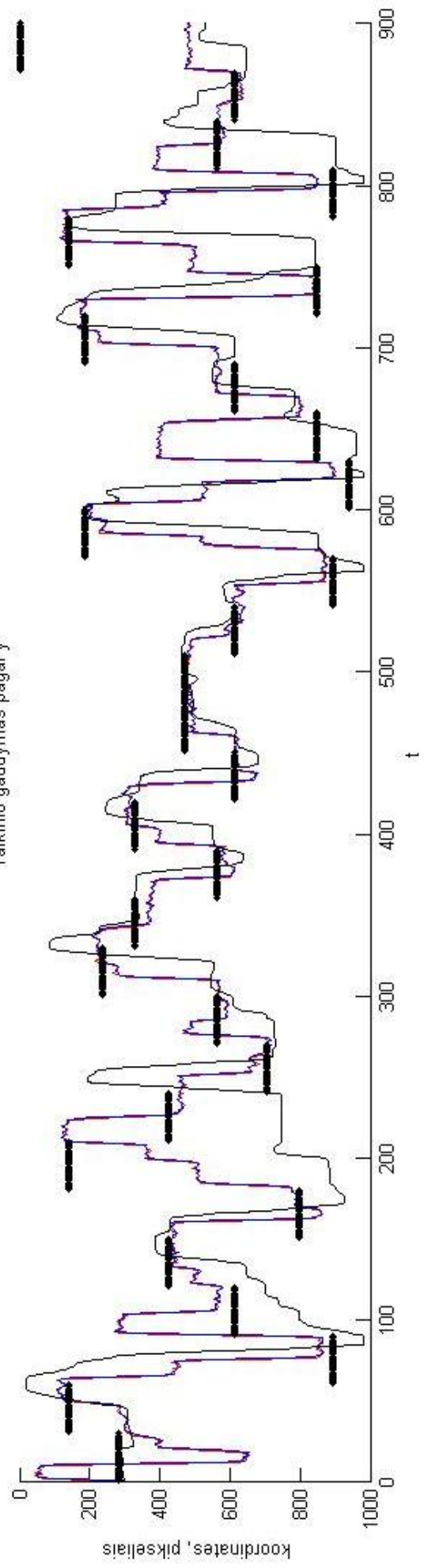
40 pav. Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadinis intervalas 0,75 sek.



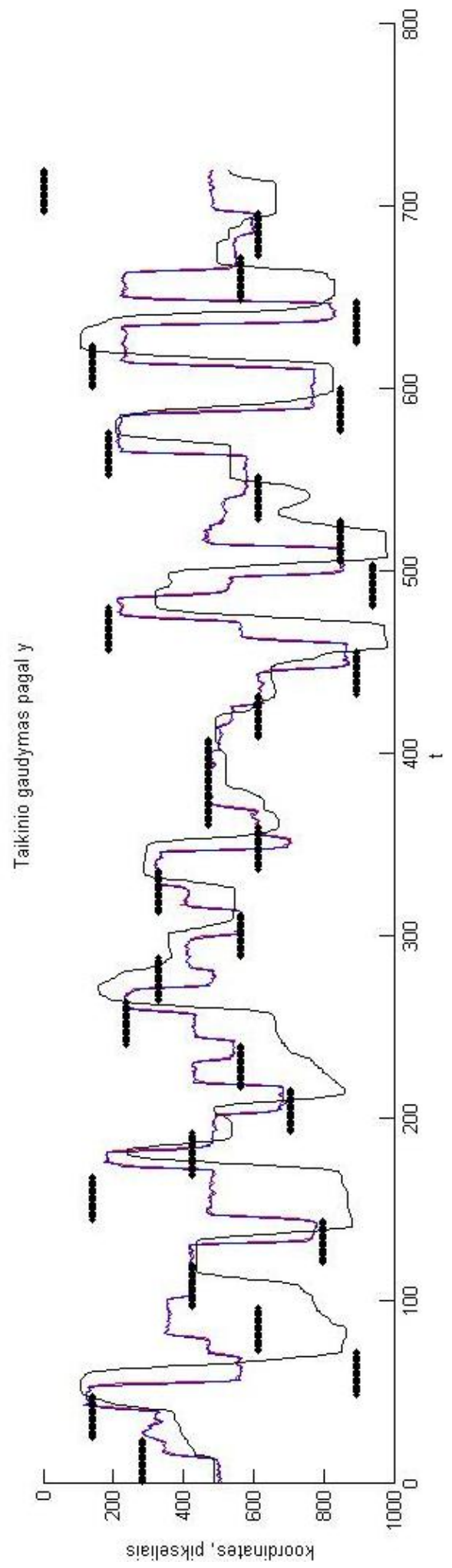
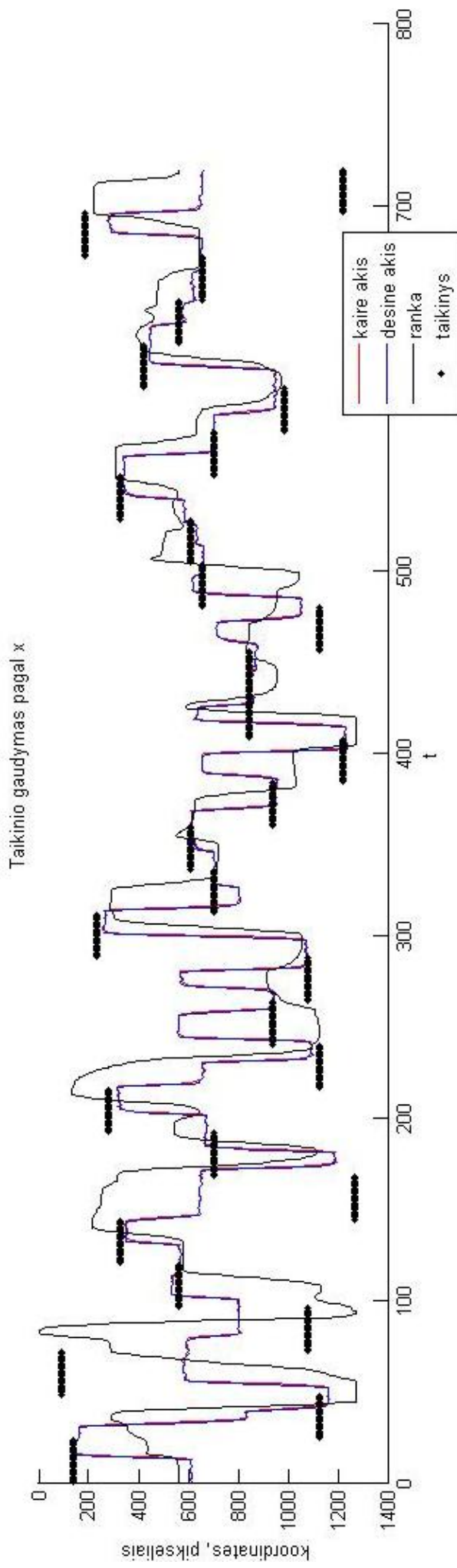
Taikinio gaudymas pagal x



Taikinio gaudymas pagal y

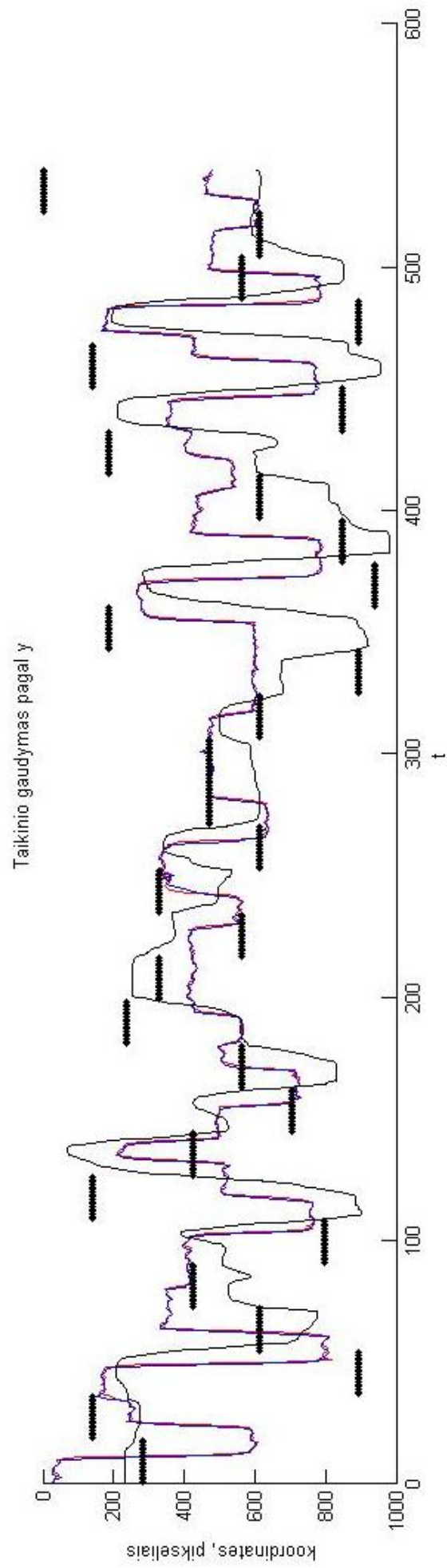
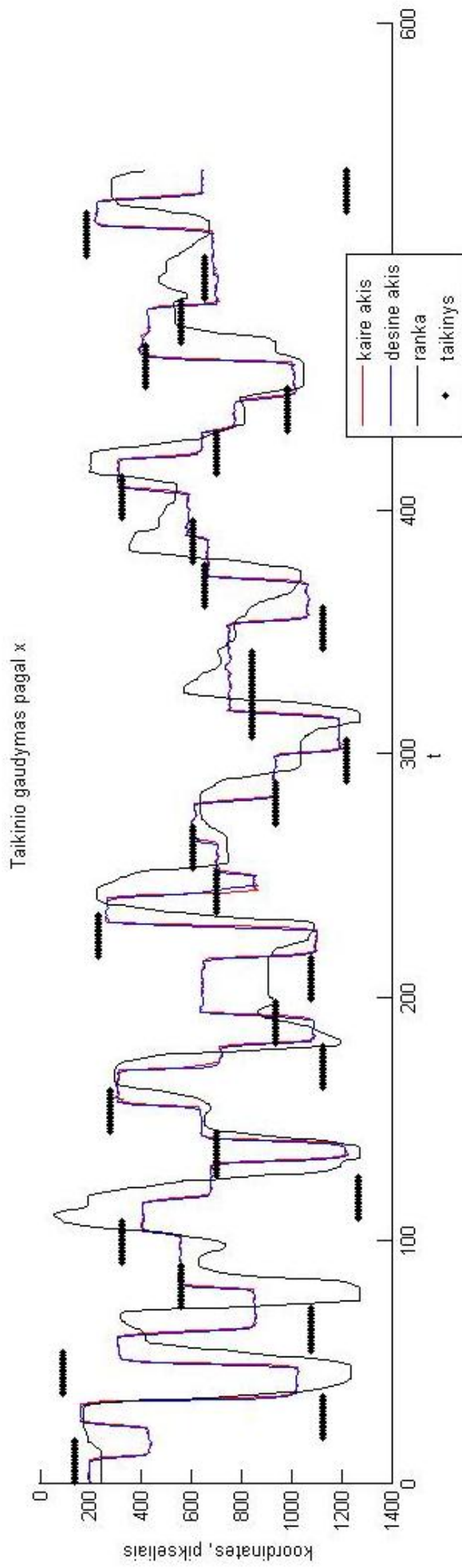


41 pav. Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadimis intervalas 0,5 sek.



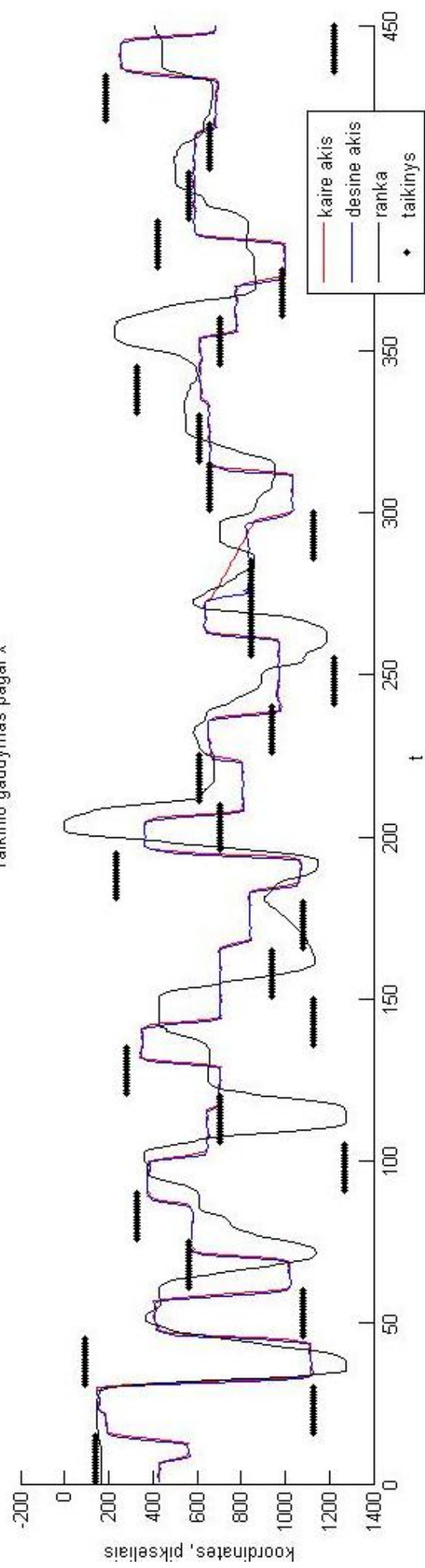
42 pav. Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadimis intervalas 0,4 sek.



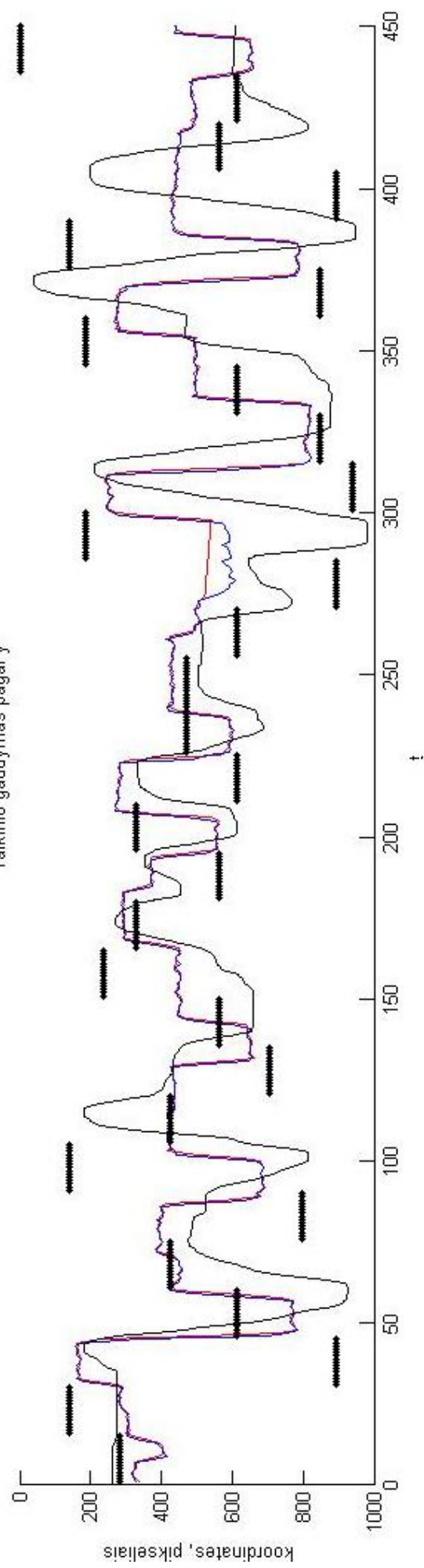


43 pav. Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadinis intervalas 0,3 sek.

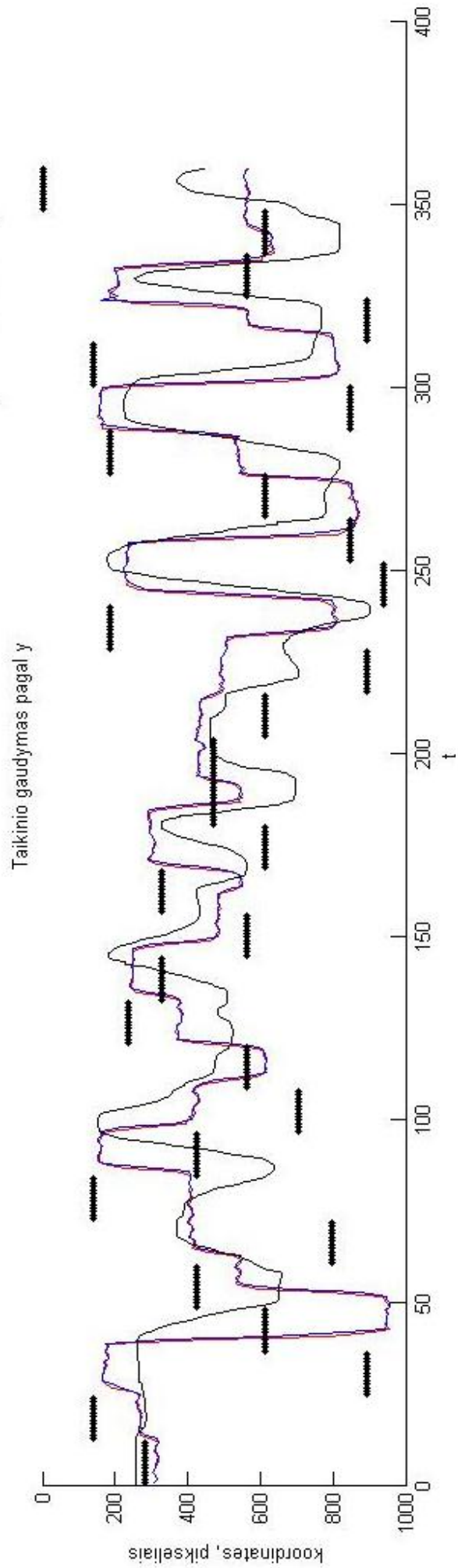
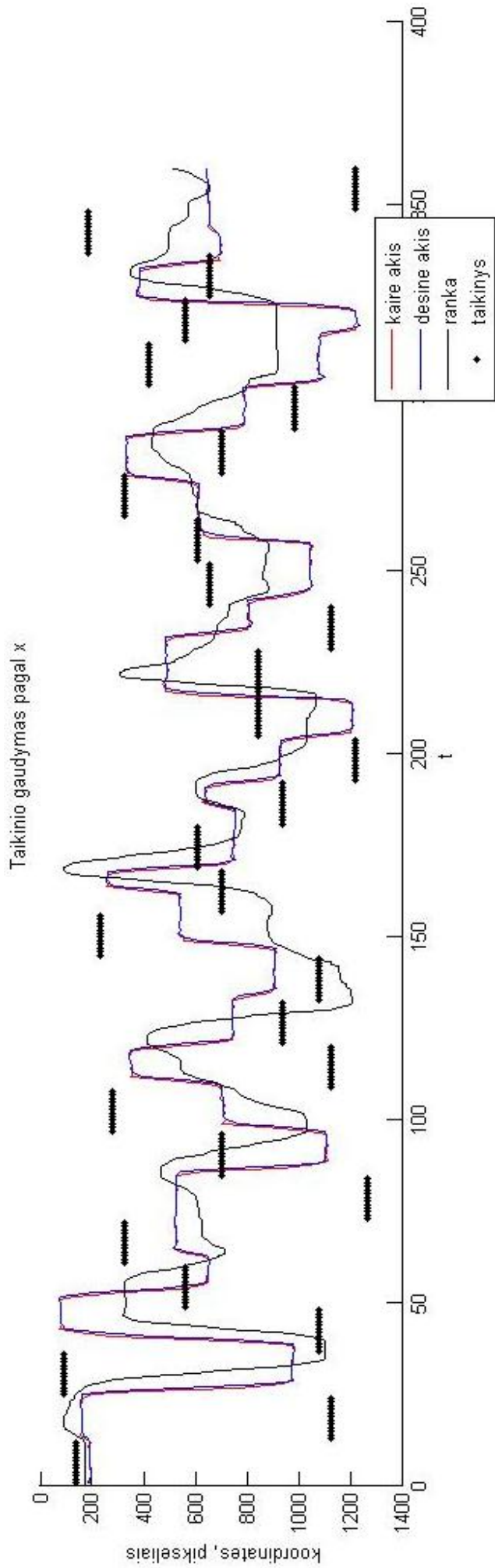
Taikinio gaudymas pagal x



Taikinio gaudymas pagal y

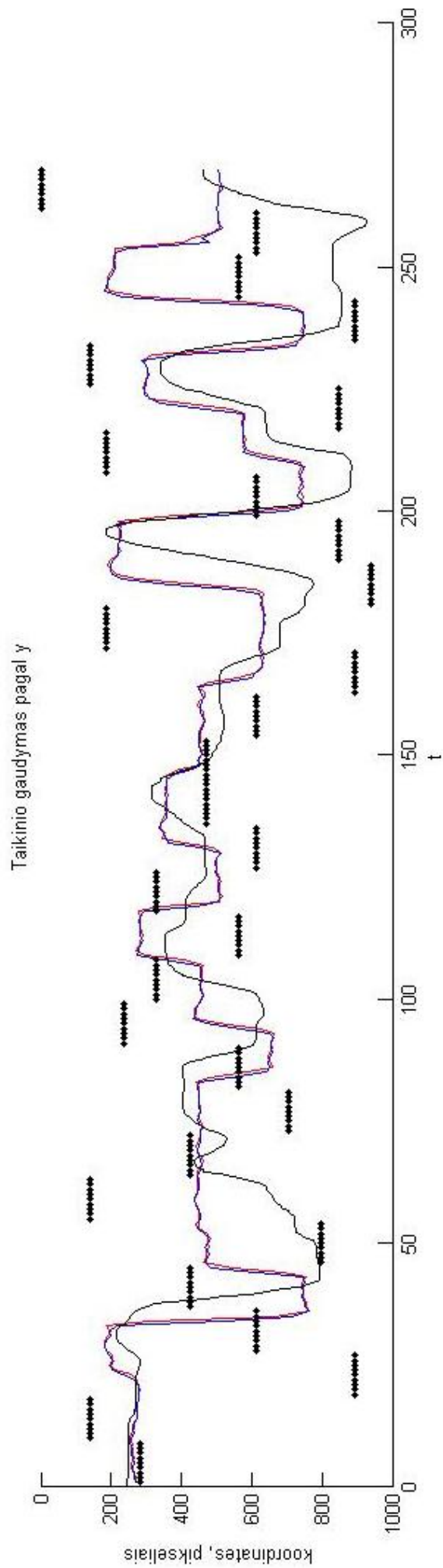
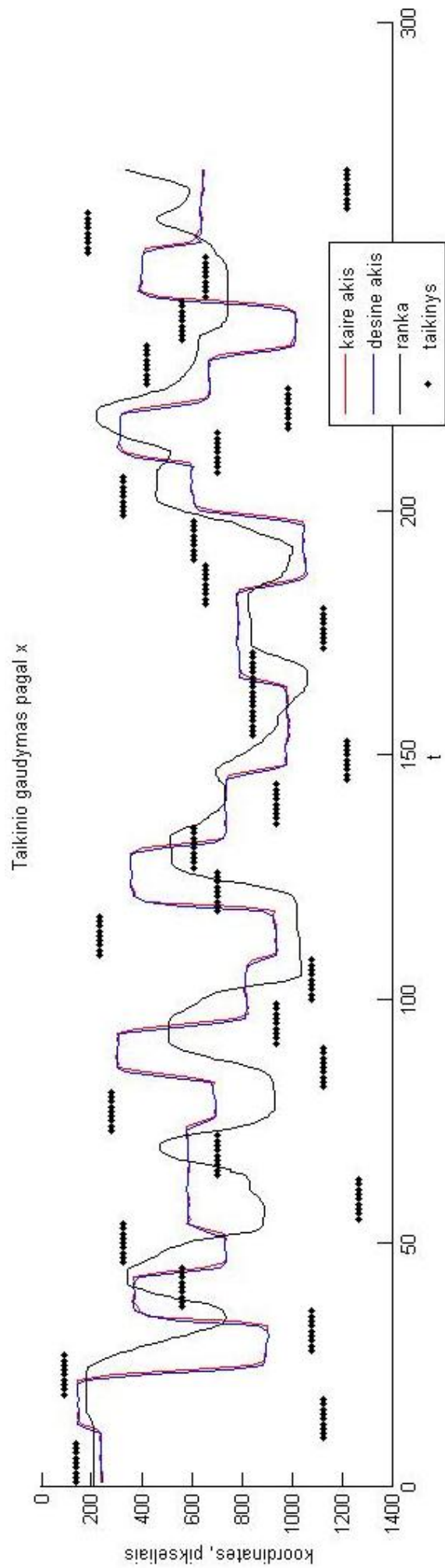


44 pav. Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadinis intervalas 0,25 sek.



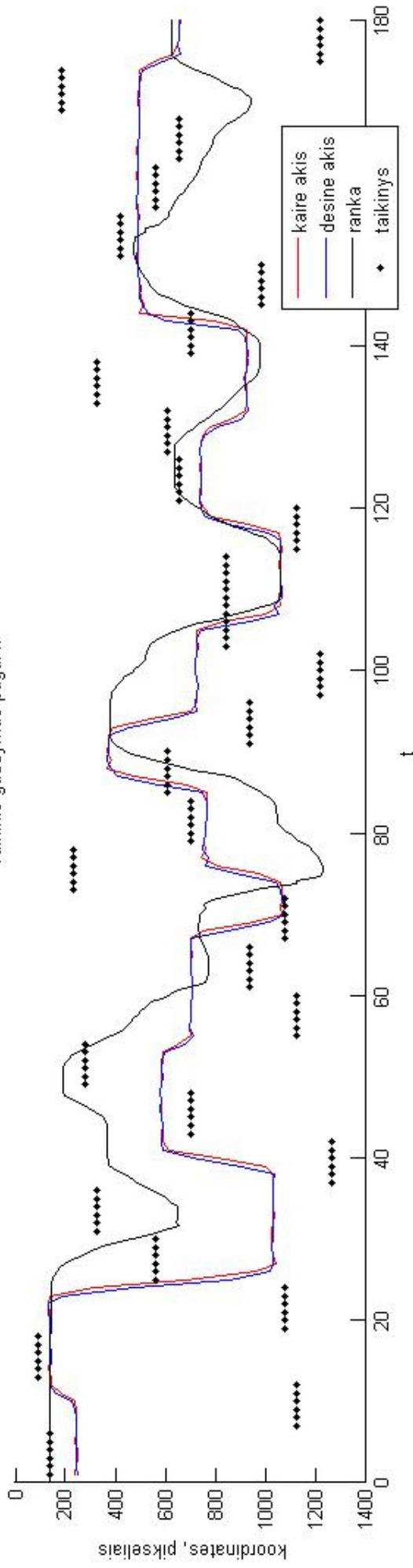
45 pav. Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadinis intervalas 0,2 sek.



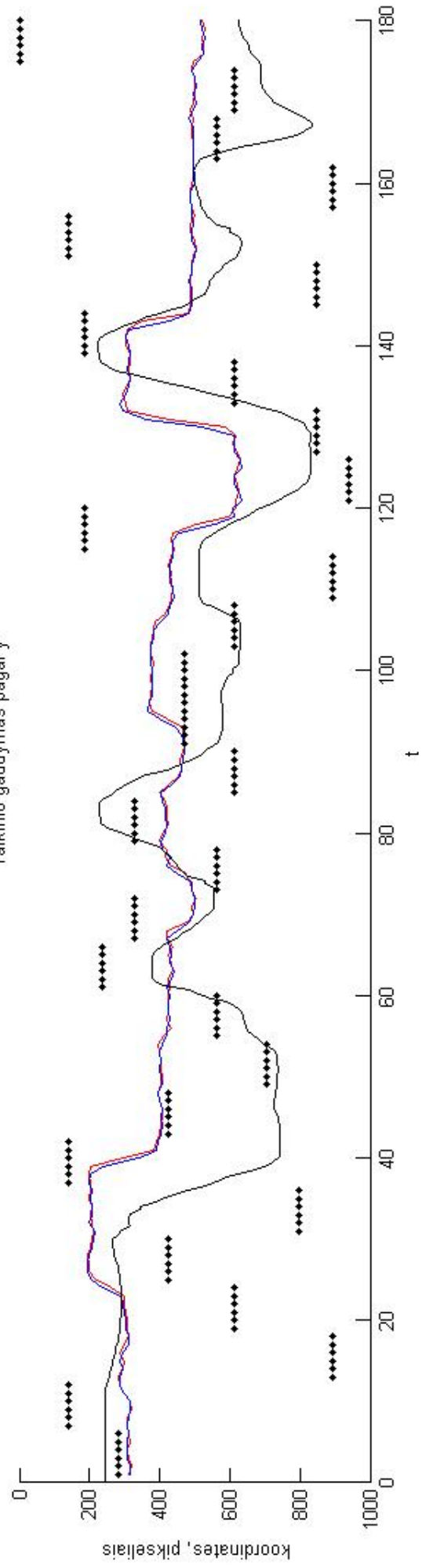


**46 pav.** Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadimis intervalas 0,15 sek.

Taikinio gaudymas pagal x



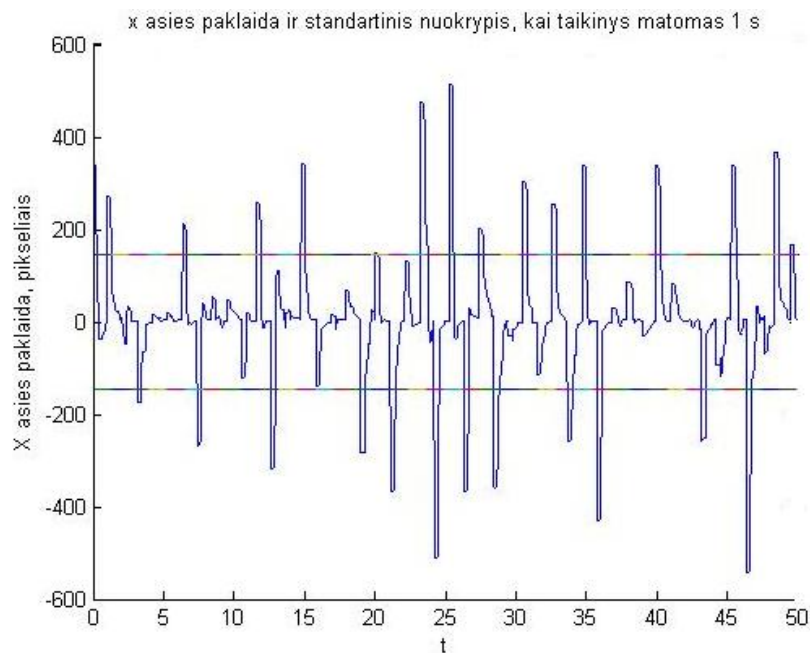
Taikinio gaudymas pagal y



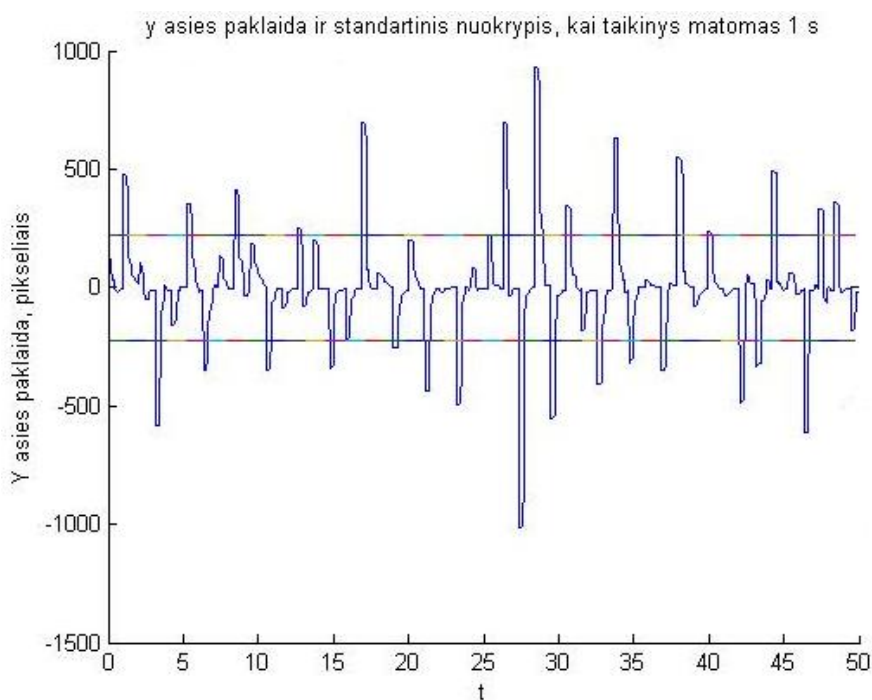
47 pav. Diskretus taikinio sekimas akimis ir ranka, kai taikinio tarpakadinis intervalas 0,1 sek.

### 3.3.2 Rezultatai

Atlikus diskretaus taikinio sekimo akimis ir ranka eksperimentus, galima teigti, kad tarpsakadinis intervalas, per kurį dar žmogus tiek akimis, tiek ranka sugaudo šokinėjantį taikinį, yra nuo 1 iki 0,5 sekundės. Po to mažinant taikinio tarpsakadinį intervalą, subjektas nebegali sugaudyti tinkamai visų taikinių, todėl labai išauga paklaidos. Sekant akimis paklaidos yra mažesnės, nei sekant rankomis. Paklaidos daromos sekant ranka, kai tarpsakadinis intervalas yra 1 sekundė pateikta 48 – 49 paveiksluose.



**48 pav.** Sekant ranka x ašies paklaida, kai tarpsakadinis intervalas yra 1 sekundė



**49 pav.** Sekant ranka y ašies paklaida, kai tarpsakadinis intervalas yra 1 sekundė

Toliau pateikiami prie visų tarpsakadinių intervalų daromų paklaidų standartiniai nuokrypiai, išreikšti laipsniais (7 lentelė).

7 lentelė. Paklaidų standartiniai nuokrypiai laipsniais, diskretiniam sekimui

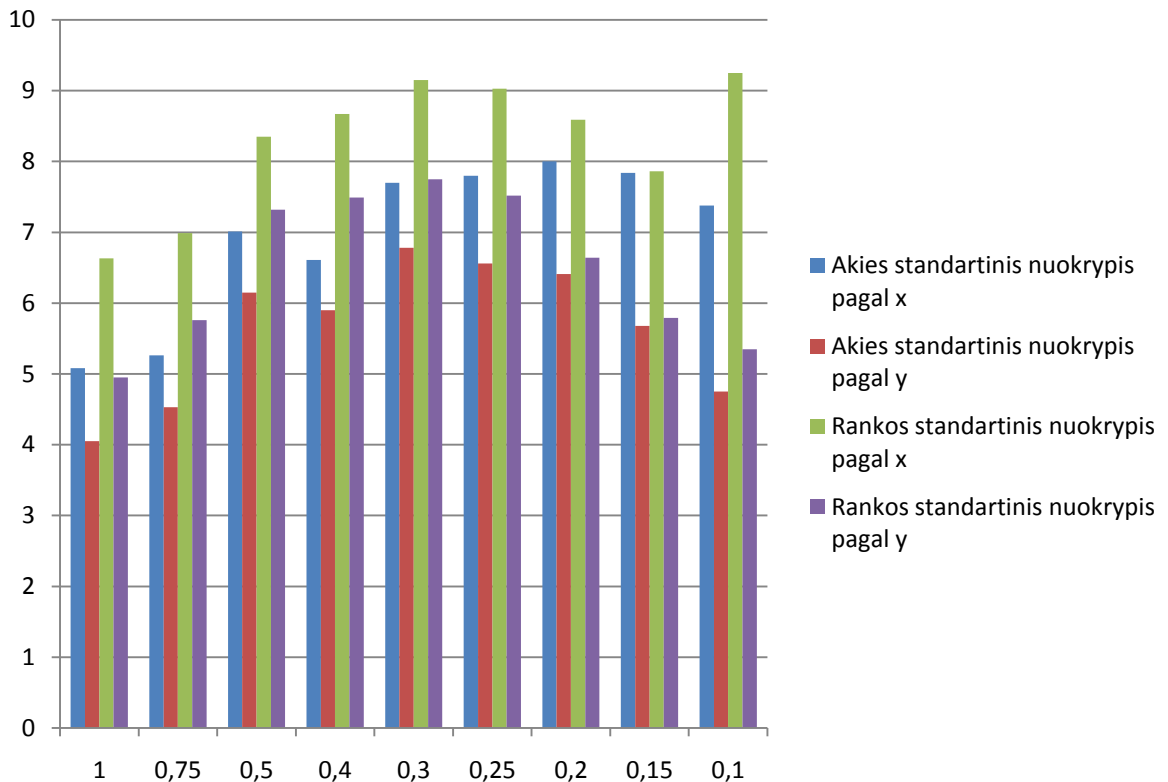
Tarpsakadinis intervalas, sek		1		0,75		0,5		0,4	
		$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$
Subjektas	AS	5,73	4,35	6,65	5,08	10,40	8,27	8,50	6,38
	Ranka	7,36	5,26	8,16	6,00	9,44	7,15	10,29	7,93
JS	Akis	5,27	4,34	5,77	4,76	6,74	5,30	7,31	5,77
	Ranka	7,69	5,60	8,38	6,21	9,28	7,27	10,04	7,77
MU	Akis	5,75	4,33	6,04	4,85	6,82	5,43	7,19	5,94
	Ranka	6,68	5,13	7,62	5,85	9,20	7,30	9,70	7,26
NXR	Akis	6,95	5,87	6,64	5,15	7,85	6,08	8,53	6,82
	Ranka	6,38	4,98	7,11	5,66	8,70	6,79	9,21	7,32
Vidurkis	Akis	5,93	4,72	6,28	4,96	7,95	6,27	7,88	6,22
	Ranka	7,03	5,24	7,82	5,93	9,16	7,13	9,81	7,55

Pratęsta 7 lentelė

Tarpsakadinis intervalas, sek		0,3		0,25		0,2		0,15		0,1	
		$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$	$\sigma_{Lx}$	$\sigma_{Ly}$
Subjektas	AS	9,40	7,06	9,91	7,42	9,69	7,28	8,83	6,52	8,28	6,42
	Ranka	10,16	7,60	10,01	7,58	9,35	6,86	8,68	6,31	9,36	6,38
JS	Akis	8,75	6,72	10,11	6,98	9,90	7,59	8,92	6,82	8,75	5,84
	Ranka	10,77	7,97	10,27	7,94	9,12	7,19	8,39	6,80	10,05	6,29
MU	Akis	8,51	6,91	9,37	7,25	9,51	7,07	8,90	6,54	8,91	5,64
	Ranka	10,88	8,31	10,20	8,12	9,41	7,15	8,44	6,88	8,66	6,01
NXR	Akis	8,96	7,04	9,70	7,17	9,02	6,52	8,09	5,81	8,33	5,69
	Ranka	10,52	7,90	10,30	7,28	9,55	6,73	8,84	6,40	10,25	6,87
Vidurkis	Akis	8,91	6,93	9,77	7,21	9,53	7,11	8,68	6,42	8,57	5,90
	Ranka	10,58	7,94	10,20	7,73	9,36	6,98	8,59	6,60	9,58	6,39

Toliau stulpelinėje diagramoje (50 pav.) pateikiami suvidurkinti standartiniai paklaidų nuokrypiai pagal x ir pagal y koordinates, sekant diskrečiai judantį taikinį akimis ir rankomis. Iš pateiktos diagramos matome, kad tiek sekant akimis, tiek sekant ranka, pagal y koordinatę yra mažesni standartiniai nuokrypiai prie visų tarpsakadinių intervalų, t.y. daromų paklaidų sklaida apie vidurkį pagal y koordinatę yra mažesnė nei pagal x koordinatę. Diskretiniuose sekimo eksperimentuose gauname priešingai nei tolydžiuose sekimo eksperimentuose.

Akies paklaidų standartiniai nuokrypiai yra mažesni nei rankos paklaidų standartiniai nuokrypiai prie visų tarpsakadinių intervalų. Čia gaunama taip pat kaip ir tolydžiam sekime.



50 pav. Akių ir rankos paklaidų standatiniai nuokrypiai atliekant diskrečius taikinio sekimus

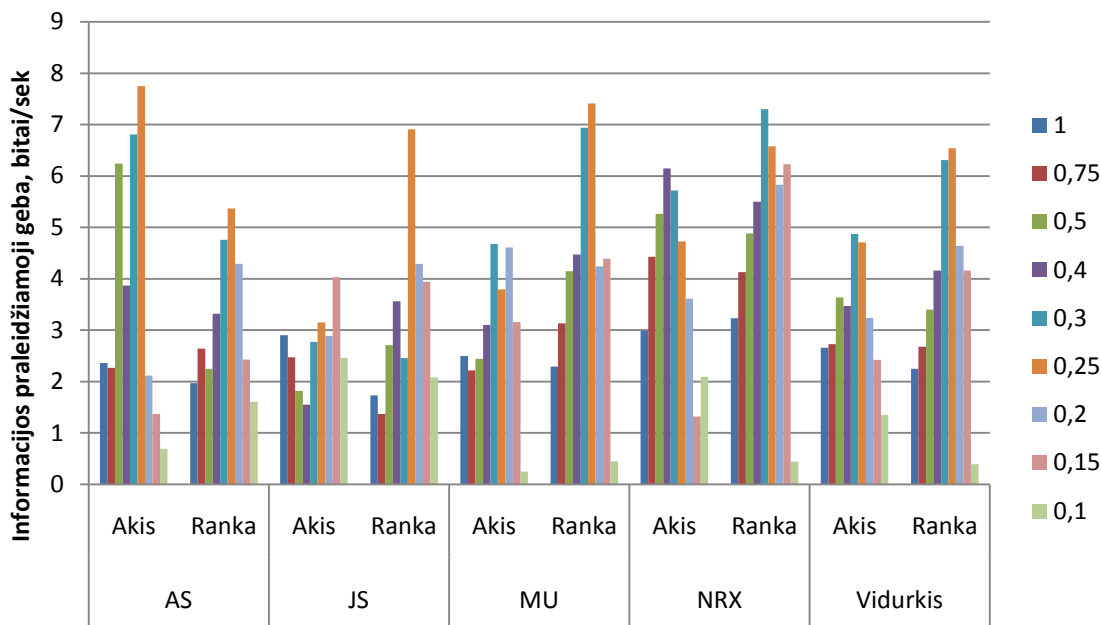
$$\text{Pasinaudojant formule } C_S = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left[ \frac{t}{D} I_S(T, L) \right] = \frac{1}{D} \left[ \log \frac{k}{0.41 \cdot \sigma_x} + \log \frac{l}{0.41 \cdot \sigma_y} \right]$$

(2.25) yra apskaičiuojama akių ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamosios gebos prie įvairių tarpsakadinių taikinio intervalų. Jos surašytos sekančioje lentelėje ir nubraižytos diagramos.

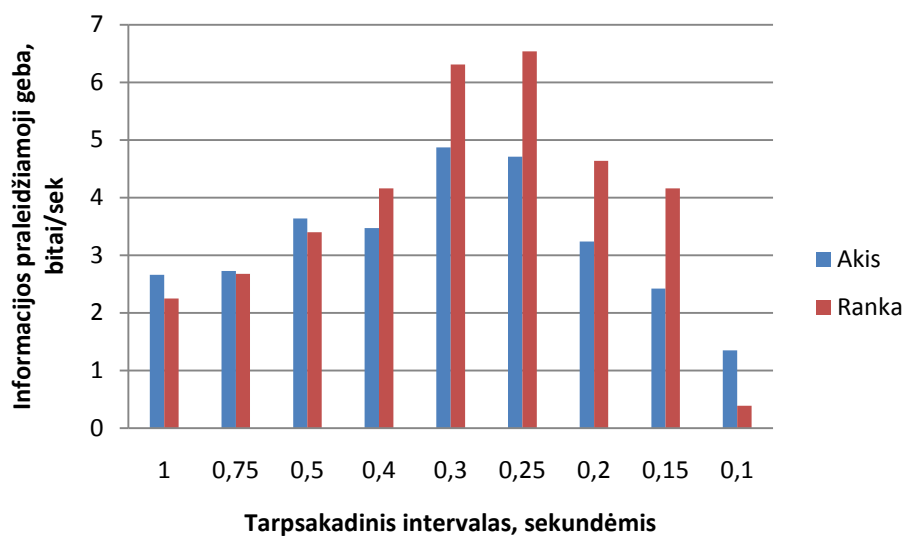
8 lentelė. Akių ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamosios gebos, bitai/sekundę. Sekant diskrečiai judantį taikinį

Tarpsakadinis intervalas, sek		Subjektas								
		1	0,75	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
AS	Akis	2,36	2,27	6,24	3,87	6,81	7,75	2,12	1,37	0,69
	Ranka	1,97	2,64	2,25	3,32	4,76	5,37	4,29	2,43	1,61
JS	Akis	2,90	2,47	1,82	1,55	2,77	3,15	2,89	4,03	2,46
	Ranka	1,73	1,37	2,71	3,56	2,46	6,91	4,29	3,94	2,08
MU	Akis	2,50	2,22	2,44	3,10	4,68	3,79	4,61	3,16	0,25
	Ranka	2,29	3,13	4,15	4,47	6,94	7,41	4,24	4,39	0,45
NRX	Akis	2,99	4,43	5,26	6,15	5,72	4,73	3,61	1,32	2,09
	Ranka	3,23	4,13	4,88	5,50	7,30	6,58	5,83	6,23	0,44
Vidurkis	Akis	2,66	2,73	3,64	3,47	4,87	4,71	3,24	2,42	1,35
	Ranka	2,25	2,68	3,40	4,16	6,31	6,54	4,64	4,16	0,39





51 pav. Kiekvieno subjekto akies ir rankos sensomotorinių kanalų informacijos praleidžiamoji geba, sekant taikinį prie įvairių tarpsakadinių intervalų



52 pav. Tiriamųjų suvidurkinti rezultatai. Sekant diskrečiai judantį taikinį prie įvairių tarpsakadinių intervalų informacijos praleidžiamoji geba

Matome, kad kai taikinio tarpsakadinis intervalas mažėja, didėja perduotas informacijos kiekis, tačiau pasiekus tam tikrą ribą, informacijos kiekis pradeda mažėti. Vadinasi žmogaus sensomotorinė sistema turi ribinę informacijos praleidžiamąją gebą. Didžiausia akies sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamoji geba yra, kai tarpsakadinis intervalas yra 0,3 sek. ir ji siekia 4,87 bitus per sekundę. Didžiausia rankos sensomotorinės sistemos

informacijos praleidžiamoji geba yra, kai tarpsakadinis intervalas yra 0,25 sek. ir ji siekia 6,54 bitus per sekundę.

Kai diskretaus taikinio tarpsakadinis intervalas yra 1, 0.75, 0.5 ir 0.1, sekant akimis, akių sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamoji geba yra didesnė už rankos sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamąją gebą, prie tų pačių tarpsakadinių intervalų.

Kai diskretaus taikinio tarpsakadinis intervalas yra 0.4, 0.3, 0.25, 0.2 ir 0.15, sekant ranka, rankos sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamoji geba yra didesnė už akių sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamąją gebą, prie tų pačių tarpsakadinių intervalų.

Gauti eksperimentiniai ir skaičiavimo rezultatai rodo, kad dvidimensinio akies sensomotorinio kanalo informacijos geba yra diapazone nuo 1,35 iki 4,87 bitų per sekundę, o dvidimensinio rankos sensomotorinio kanalo informacijos geba yra diapazone nuo 0,39 iki 6,54 bitai per sekundę.

Reikali atkreipti dėmesį, kad rezultatai pristatyti šiame tyrime, gauti su keliomis prielaidomis:

1. Taikinio trajektorijos horizontaliomis ir vertikalios kryptimis yra nepriklausomos ir jų tikimybiniai skirstiniai pasiskirstę pagal Gauso dėsnį.
2. Akies judesių paklaidos taip pat pasiskirsčiusios pagal Gauso dėsnį.
3. Skaičiuojant paklaidas, nebuvo įvertinti laiko vėlinimai.
4. Eksperimentinių sesijų trukmė nėra ilga, todėl tiriamųjų nuovargis per bandymus nėra įvertintas

## IŠVADOS

1. Paklaidos, išmatuotos per diskretinį sekimą, visada priklauso nuo taikinio šuolio amplitudės ir nuo tarpsakadinio intervalo. Atliekant eksperimentinį tyrimą akimis, taikiny sokinėdamas iš vienos padėties į kitą, sukelia sakadinius akių judesius. Atsiradusias dideles paklaidas akis jas sumažina atlikdama vieną ar kartais dvi korekcines sakadas. Apskaičiavus ir suvidurkinus paklaidų standartinius nuokrypius, gaunami tokie rezultatai: akims pagal x koordinatę nuo 5,93 iki 9,77 laipsnių, pagal y koordinatę nuo 4,72 iki 7,21 laipsnių, o rankai pagal x koordinatę nuo 7,03 iki 10,58 laipsnių ir pagal y koordinatę nuo 5,24 iki 7,94 laipsnių. Tiek akimis, tiek ranka sekant diskretų taikinį mažesni paklaidų standartiniai nuokrypiai pagal y koordinatę.

2. Paklaidos, išmatuotos per tolygų sekimą, visada priklauso nuo taikinio trajektorijos tipo ir taikinio judėjimo greičio. Apskaičiavus ir suvidurkinus paklaidų standartinius nuokrypius, gaunami tokie rezultatai: akims pagal x koordinatę nuo 0,51 iki 2,37 laipsnių, pagal y koordinatę nuo 0,71 iki 2,85 laipsnių, o rankai pagal x koordinatę nuo 0,87 iki 3,09 laipsnių ir pagal y koordinatę nuo 0,89 iki 3,23 laipsnių. Tiek akimis, tiek ranka sekant tolygų taikinį mažesni paklaidų standartiniai nuokrypiai yra pagal x koordinatę.

3. Atliekant diskretinio sekimo eksperimentus bei didinant taikinio šuolių dažnį, žmogaus sensomotorinė sistema nesugeba tinkamai sekti taikinio ir prarasta informacija prie tam tikro dažnio slenksčio žymiai padidėja. Tai reiškia, kad sekant diskrečiai judantį taikinį, žmogaus sensomotorinė sistema turi kanalo informacijos gebos ribą. Didžiausia akies sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamoji geba yra, kai tarpsakadinis intervalas yra 0,3 sek. ir ji siekia 4,87 bitus per sekundę. Didžiausia rankos sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamoji geba yra, kai tarpsakadinis intervalas yra 0,25 sek. ir ji siekia 6,54 bitus per sekundę.

4. Atliekant tolyginio sekimo eksperimentus bei didinant taikinio greitį ar padarant sudėtingesnę taikinio trajektoriją, patenkamas į sensomotorinį kanalą informacijos kiekis padidėja, žmogaus akių ar rankos judesių kontrolės sistema tampa nebegebanti sekti taikinį ir skirtumas tarp taikinio ir akių (ar rankos) padėties arba prarasta informacija tampa didesnė. Taigi žmogaus tolygaus sekimo sensomotorinė sistema turi kanalo informacijos gebos ribą. Didžiausia akies sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamoji geba yra, kai taikinio judėjimo greitis yra 30 laipsn/sek. ir ji siekia 7,89 bitus per sekundę. Didžiausia rankos sensomotorinės sistemos informacijos praleidžiamoji geba yra, kai taikinio judėjimo greitis yra 30 laipsn/sek. ir ji siekia 6,46 bitus per sekundę.

## LITERATŪRA

1. V. Laurutis, Channel Information Capacity of the Somatosensory System of the Eye. // Electronics and Electrical Engineering. –Kaunas: Technologija, –2008. –No.5(85). –P. 85–88.
2. V. Laurutis, Ribinis žmogaus sekamųjų judesių formavimo greitis, 2009
3. J. Konczak, Neural development and sensorimotor control // Konferencijos „Behavioral Neuroscience“ pranešimų medžiaga, –2004. –P.11-13.
4. Akies sandara //Prieiga per internetą: (žiūrėta 2009 05 07)  
<http://akis.lass.lt/>
5. Žmogaus akis //Prieiga per internetą: (žiūrėta 2009 05 07)  
[http://www.learner.org/jnorth/images/graphics/d-e/eagle\\_humaneye.GIF](http://www.learner.org/jnorth/images/graphics/d-e/eagle_humaneye.GIF)
6. B. Burgis, A. Kulikauskas, Kompiuterija. Kaunas 2000 P. 27 – 30.
7. V. Vekteris, A. Kasparaitis, S. Kaušinis, R. Kanapėnas, Matavimų teorija ir praktika. Vilnius 2000 P.148 – 153.
8. V. Laurutis, G. Daunys, R. Zemblys, Information characteristics of the smooth pursuit eye movements // Informatica. –Vilnius, –2005. Vol. 16, No. 4, P. 541–556.
9. V. Laurutis, R. Zemblys, Information characteristics of the double – step saccadic eye movements // Information Technology and Control, –2008.
10. R. Zemblys, V. Laurutis, Koordinuotų žmogaus judesių informacinis vertinimas // Tarptautinės konferencijos „Biomedicininė inžinerija“ pranešimų medžiaga, –2009. P. 271–275.
11. LC Technologies Development System Users Manual //Prieiga per internetą: (Žiūrėta 2009 05 11)  
<http://www.eyegaze.com/>