

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MINDAUGAS VASILJEVAS

**FIZIOLOGINĖS KOMPIUTERIJOS SISTEMŲ ŽMOGŲ  
TAUSOJANČIOS SĄSAJOS MODELIS**

Daktaro disertacijos santrauka  
Technologijos mokslai, informatikos inžinerija (T 007)

2019, Kaunas

Disertacija rengta 2013–2018 metais Kauno technologijos universiteto Informatikos fakulteto Programų inžinerijos katedroje.

**Mokslinis vadovas:**

Prof. dr. Robertas DAMAŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija, T 007)

**Redagavo:** Inga Nanartonytė (leidykla „Technologija“)

**Informatikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:**

Prof. habil. dr. Rimvydas SIMUTIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija, T 007) – **pirmininkas**.

Doc. dr. Nikolaj GORANIN (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija, T 007);

Habil. dr. Edyta HETMANIOK (Silezijos technologijos universitetas, Lenkija, gamtos mokslai, informatika, N 009);

Prof. dr. Olga KURASOVA (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija, T 007);

Prof. dr. Vaidotas MAROZAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija, T 001).

Disertacija bus ginama viešame informatikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2019 m. rugpjūčio 28 d. 14 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. +370 37 300 042; faks. +370 37 324 144; el. pastas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2019 m. liepos 19 d.

Su disertacija galima susipažinti Kauno technologijos universiteto

(K. Donelaičio g. 20, Kaunas), Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, Vilnius) bibliotekose bei internete (<http://ktu.edu>).

## ĮVADAS

### Darbo aktualumas

Fiziologinės kompiuterijos sistemos (FKS, angl. *physiological computing systems, PCS*) šiandien tampa labai svarbia tyrimų sritimi. Šios sistemos suteikia galimybę netradiciniais būdais valdyti skaitmeninius įrenginius, žmogaus fiziologines savybes paversdamos sąsajos valdymo signalais. Žmogaus fiziologinės savybės šioje srityje suprantamos kaip bet kokie fiziologinės kilmės duomenys, gaunami iš žmogaus jam atliekant tam tikrus veiksmus arba patiriant tam tikras būsenas. Fiziologinės kompiuterijos sistemų sąvoka apima tokius gerai žinomus konceptus kaip smegenų ir kompiuterio sąsaja, neuroninė kompiuterio sąsaja, žvilgsnio sekimo sistemos ir kt.

Iš pradžių šios sistemos buvo daugiausia taikomos neįgaliesiems, nes esant tam tikroms neįgalumo būklėms žmonės neturi galimybės valdyti kompiuterio tradiciniais būdais. Šiuo metu vis dažniau fiziologinės sistemos taikomos sveikiems žmonėms. Atlikti tyrimai rodo, kad smegenų ir kompiuterio sąsaja grįstų žaidimų ir laisvalaikio programų rinka turi didelį potencialą, turint omenyje ne tik neįgalius žmones [Ahn ir kt., 2014]. Žvilgsnio sekimo technologijos mokslo pasaulyje buvo žinomos kaip naudingas tyrimų įrankis, tačiau naujos studijos rodo, jog šios technologijos gali būti taikomos kompiuteriniuose žaidimuose, kad sukurtų labiau žaidėją įtraukiantį efektą [Antunes ir Santana, 2018]. Elektromiogramos (EMG) pagrindu veikiančios vartotojo sąsajos daugiausia buvo taikomos protezams valdyti [Castellini ir van der Smagt, 2009; Cipriani ir kt., 2008], tačiau šiomis dienomis galima rasti plačiau vartotojų auditorijai skirtų sistemų, kurios leidžia valdyti išmaniuosius telefonus [Lee ir kt., 2015] arba žaisti edukacinius žaidimus [Ghassemi ir kt., 2019].

Viena iš priežasčių, kodėl fiziologinės kompiuterijos sistemos buvo imtos vis dažniau taikyti laisvalaikio ir kasdienio naudojimo įrenginių srityse, yra tai, kad vis daugėja nebrangių įrenginių, skirtų nuskaityti fiziologiniams signalams. Ilgą laiką panašūs įrenginiai buvo gremėzdiški, brangūs ir dažniausiai skirti naudoti laboratorijose. Dabar rinkoje galima rasti ne vieną nebrangių įrenginį, leidžiantį patogiai nuskaityti žmogaus fiziologinius signalus (pvz., „Emotiv EPOC+“ įrenginiai, skirti smegenų ir kompiuterio sąsajai, „MYO“ įrenginiai, skirti EMG pagrindu veikiančioms sąsajoms). Žvilgsnio sekimo įrenginiai tapo gerokai pigesni, lengviau integruojami ir patogesni vartotojui (pvz., „Tobii“ žvilgsnio sekimo įrenginiai). Tačiau reikia pabrėžti, kad mažesnė šių įrenginių kaina lėmė sumažėjusį nuskaitymo tikslumą [Maskeliunas ir kt., 2016].

Vis dėlto fiziologinės kompiuterijos sistemų naudojimas kasdienybėje nėra įprastas reiškinys. Fiziologinė kompiuterija grįstų sąsajų valdymas yra gana nemažą vartotojo pastangų reikalaujanti užduotis. Vartotojui dažnai tenka atlikti neįprastus ir nenatūralius veiksmus, dėl to atsiranda nemaža fizinė ir protinė

apkrova. Šių sąsajų valdymo našumas svyruoja priklausomai nuo treniruotumo lygio (treniruočių), atsirandančio nuovargio ar žmogaus mentalinių būsenų pasikeitimų. Protinis ir fizinis nuovargis turi neigiamą įtaką našumui, o aukštesnis treniruotumo lygis teigiamai veikia valdymo našumą.

Žmogaus nuovargis yra apibrėžiamas kaip fizinių galimybių ar motyvacijos sumažėjimas, sukeltas fizinio išsekimo ar ligos [Pageaux ir Lepers, 2016]. Didesniu ar mažesniu mastu jis būdingas beveik kiekvienai žmogaus fizinei veiklai. Kai žmogus valdo kompiuterį tradiciniu būdu, nuovargis pajuntamas po santykinai ilgo laiko tarpo. O valdant sistemą, grįstą fiziologine kompiuterija, nuovargis paprastai pasireiškia gerokai greičiau. Nuovargio efektai EMG pagrindu veikiančiose sistemose siejami su konkrečių valdymui naudojamų raumenų įtempimu. Žvilgsnio sekimo sistemose atsirandantis nuovargis siejamas su aki gaubiančių raumenų įtempimu ar nuolatinio žiūrėjimu į ekraną. Valdydamas smegenų ir kompiuterio sąsają žmogus patiria protinį nuovargį, nes tokio tipo sąsajos valdymas reikalauja didelės koncentracijos. Bet kokio tipo nuovargis mažina sistemos valdymo našumą, todėl vartotojas gali pakankamai našiai valdyti sistemą tik santykinai trumpą laiko tarpą (paprastai matuojamą minutėmis, kartais – valandomis). Kad būtų galima ilgesnį laiką sėkmingai valdyti fiziologine kompiuterija grįstą sąsają, kuriamos adaptyvios arba multimodalinės sąsajos.

Treniruotės, skirtos geriau įsisavinti konkrečios sąsajos valdymo specifikai, turi priešingą poveikį nei nuovargis. Treniruojantis valdyti konkrečią sąsają, galima prailginti sėkmingą fiziologine kompiuterija grįstos sąsajos valdymą. Nuovargio ir treniruotumo konceptai yra gerai žinomi žmogaus fiziologijos mokslo srityje. Analitiniai sportininkų našumo modeliai, pagal kuriuos kiekybiškai išreiškiami nuovargio ir treniruočių efektai, buvo pasiūlyti Banisterio ir kitų mokslininkų [Banister ir kt., 1975; Busso ir kt., 2002; Calvert ir kt. 1976; Morton ir kt., 1990] dvidešimtojo amžiaus aštuntajame dešimtmetyje ir vystomi vėliau. Šiandien šie našumo modeliai nėra praradę savo aktualumo fiziologijos ir treniravimo sistemų srityse. Be to, šiuos modelius būtų galima taikyti ir fiziologine kompiuterija grįstose sistemose kaip priemonę, leidžiančią užtikrinti sistemos adaptyvumą.

## **Darbo objektas**

Šio darbo objektas yra adaptyvios valdymo našumą įvertinančios žmogaus ir kompiuterio sąsajos modelis.

## Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – pasiūlyti adaptyvios žmogų tausojančios žmogaus ir kompiuterio sąsajos modelį, skirtą stebėti, analizuoti ir padidinti valdymo našumui.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti iškelti šie uždaviniai:

1. Atlikti esamų su fiziologine kompiuterija susijusių žmogaus ir kompiuterio sąsajos modelių analizę.
2. Išanalizuoti esamus žmogaus našumo modelius fiziologijos srityje.
3. Išplėtoti patobulintą esamų našumo modelių versiją, skirtą adaptyviai valdymo našumą vertinančiai žmogaus ir kompiuterio sąsajai.
4. Pritaikyti siūlomą modelį kuriant adaptyvias EMG pagrindu ir žvilgsnio sekimo pagrindu veikiančias vartotojo sąsajas.

## Mokslinis naujumas

Šiame darbe pristatomi šie jo naujumą liudijantys rezultatai:

1. Buvo pasiūlytas biokibernetinio ciklo (angl. *biocybernetic loop*) koncepcijos plėtinys, pavadintas žmogų tausojančios sąsajos modeliu. Pasiūlyti du šio modelio variantai: vienakanalis žmogų tausojančios sąsajos modelis (VŽTSM, angl. *human-assistive single channel model, HASCM*) ir multimodalinis žmogų tausojančios sąsajos modelis (MŽTSM, angl. *human-assistive multimodal model, HAMM*). VŽTSM taikomas sistemoms, kur vartotojas gali valdyti tik vieną įvesties tipą. MŽTSM taikomas sistemoms, kur vartotojas gali valdyti daugiau nei vieną įvesties tipą. Žmogų tausojančios sąsajos naujumas apibrėžiamas dviem aspektais: 1) šis modelis sukurtas remiantis biokibernetinio ciklo koncepcija, tačiau yra detalesnis, nes teikia praktinį vartotojo sąsajos projektavimo karkasą; 2) pasiūlytas modelis į žmogaus ir kompiuterio komunikacijos procesą įtraukia vartotojo našumo vertinimą.
2. Banisterio ir kt. [1975] pasiūlytas analitinis atleto našumo modelis buvo pritaikytas fiziologinės kompiuterijos sistemų tyrimų sričiai. Remiantis šiuo analitiniu modeliu ir eksperimentiniais duomenimis, buvo išvestas akių nuovargio modelis, kuris gali būti pritaikytas žmogų tausojančios sąsajos sistemai, veikiančiai žvilgsnio sekimo pagrindu.
3. Slopstančių harmoninių svyravimų (angl. *damped harmonic oscillation, DHO*) modelis, taikomas sportininkų našumui įvertinti, buvo pritaikytas treniravimosi ir nuovargio efektams vertinti žaidžiant žvilgsniu valdomą

kompiuterinį žaidimą. Atlikti tyrimai rodo, kad šis modelis leidžia gerai aprašyti ilgalaikį nuovargio ir treniravimosi poveikį bei trumpalaikį našumo lygio atkūrimą.

4. Našumo duomenims, surinktiems žvilgsniu valdomame žaidime, glotninti buvo pasiūlytas „BoostEMD“ signalo dekompozicijos metodas [Damasevicius ir kt., 2015]. „BoostEMD“ yra gerai žinomo empirinių modų dekompozicijos (EMD) metodo, kuris taikomas sudėtiniam signalui skaidyti į jį sudarančius komponentus, plėtinys. „BoostEMD“ metodu sudėtiniai signalai skaidomi į dar smulkesnius darinius, taikant EMD principus ir papildomas signalo transformacijas [Damasevicius ir kt., 2015].

### **Praktinė darbo reikšmė**

Žmogų tausojančios sąsajos modelis suteikia žmogaus ir mašinos sąsajos, grįstos fiziologine kompiuterija, architektūros projektavimo karkasą. Anksčiau minėtas modelis suteikia galimybę projektuoti adaptyvias, į valdymo našumo pokyčius reaguojančias fiziologines vartotojo sąsajas. Šiuo modeliu siekiama prailginti efektyvaus fiziologinės sąsajos valdymo laiką.

Paprastai viena iš didžiausių fiziologinių vartotojo sąsajų taikymo sričių yra neįgaliesiems skirtos sistemos. Apskritai tokio tipo sąsajos gali būti taikomos daugelyje mūsų kasdienio gyvenimo sričių (tiek darbe, tiek namie), kad pakeltume gyvenimo kokybę, išlaikytume didelį darbo produktyvumą ar turiningai leistume laisvalaikį. Fiziologinėms vartotojo sąsajoms būdingas gana greitai pasireiškiantis vartotojo nuovargis, dėl kurio krinta ir valdymo našumas. Valdymo našumas stipriai priklauso nuo individualių vartotojo savybių. Pasiūlytas žmogų tausojančios sąsajos modelis leidžia projektuoti sistemą taip, kad ji gebėtų prisitaikyti prie individualių vartotojo savybių bei poreikių ir tokiu būdu prailgintų konkrečios sistemos efektyvaus valdymo laiką. Be to, šiame darbe našumo vertinimo metodai iš fiziologijos srities buvo pritaikyti vartotojo sąsajoms, grįstoms EMG ir žvilgsnio sekimu.

### **Darbo ginamieji teiginiai**

1. Siūlomas žmogų tausojančios sąsajos modelis gali būti pritaikytas kurti žmogaus ir mašinos sąsajoms, grįstoms fiziologinių signalų įvestimi.
2. Empiriškai nustatytas analitinis Banisterio našumo modelis leidžia gerai aprašyti našumo duomenis, surinktus naudojantis žvilgsniu valdoma virtualiosios klaviatūros sistema.
3. Empiriškai nustatytas analitinis slopstančio harmoninio svyravimo našumo modelis leidžia gerai aprašyti našumo duomenis, surinktus žaidžiant žvilgsniu valdomą kompiuterinį žaidimą.

4. Pasiūlytas klasikinio EMD metodo plėtinys „BoostEMD“ glotnina neapdorotus žvilgsniu valdomo žaidimo našumo duomenis geriau nei kiti analizuoti glotninimo metodai (judančio vidurkio filtras, medianos filtras, Savitzky'io ir Golay'aus filtras).

## Darbo rezultatų aprobavimas

Eksperimentų rezultatai buvo pristatyti ir aptarti keturiose tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

1. XV International Conference on Human Computer Interaction, Interacción 2014, Tenerife, Spain.
2. 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2014, Warsaw, Poland.
3. The 19<sup>nd</sup> International Conference ELECTRONICS 2015, Palanga, Lithuania.
4. 12th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, ICCP 2016, Cluj-Napoca, Romania.

Publikacijų disertacijos tematika sąrašas:

Straipsniai, referuojami „Web of Science“ žurnaluose:

1. Maskeliūnas, Rytis; Damaševičius, Robertas; Martišius, Ignas; **Vasiljevas, Mindaugas**. Consumer grade EEG devices: are they usable for control tasks? // PeerJ. London: PeerJ Inc. ISSN 2167-8359. 2016, vol. 4, article e1746, p. 1–27. DOI: 10.7717/peerj.1746.
2. Damaševičius, Robertas; **Vasiljevas, Mindaugas**; Martišius, Ignas; Jusas, Vacius; Birvinskas, Darius; Wozniak, Marcin. BoostEMD: an extension of EMD method and its application for denoising of EMG signals // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and electrical engineering. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. eISSN 2029-5731. 2015, vol. 21, iss. 6, p. 57–61. DOI: 10.5755/j01.eie.21.6.13763.
3. Damaševičius, Robertas; **Vasiljevas, Mindaugas**; Šumskas, Tomas. Development of a concept-based EMG-based speller // DYNA. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. ISSN 0012-7353. 2015, vol. 82(193), p. 170–179. DOI: 10.15446/dyna.v82n193.53493.

Straipsniai, referuojami kitose tarptautinėse duomenų bazėse:

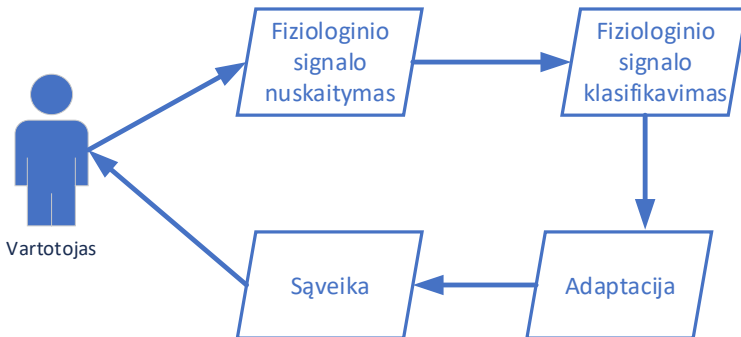
1. **Vasiljevas, Mindaugas**; Gedminas, Tadas; Ševčenko, Artūras; Jančiukas, Mindaugas; Blažauskas, Tomas; Damaševičius, Robertas. Modelling eye fatigue in gaze spelling task // 2016 IEEE 12th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP): Cluj-Napoca, Romania, September 8–10, 2016: proceedings / edited by Rodica Potolea Radu Razvan Slavescu. New

- York, NY: IEEE, 2016. ISBN 9781509038992. eISBN 9781509038992. p. 95–102. DOI: 10.1109/ICCP.2016.7737129.
2. **Vasiljevas, Mindaugas**; Šalkevičius, Justas; Gedminas, Tadas; Damaševičius, Robertas. A prototype gaze-controlled speller for text entry // CEUR workshop proceedings: System 2015: Symposium for young scientists in technology, engineering and mathematics: proceedings of the international symposium for young scientists in technology, engineering and mathematics, Catania, Italy, September 27–29, 2015 / edited by: R. Damaševičius, C. Napoli, E. Tramontana, M. Woźniak. Aachen: CEUR-WS. ISSN 1613-0073. 2015, vol. 1543, p. 79–83.
  3. **Vasiljevas, Mindaugas**; Turčinai, Rūtenis; Damaševičius, Robertas. Development of EMG-based speller // Interaction 2014: 15th international conference on human computer interaction, Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain, 10-12 September, 2014. [S.l.]: AIPO, 2014. ISBN 9788469710722. p. 45–48.
  4. **Vasiljevas, Mindaugas**; Turčinai, Rūtenis; Damaševičius, Robertas. EMG speller with adaptive stimulus rate and dictionary support // Proceedings of the 2014 federated conference on computer science and information systems, September 7–10, 2014, Warsaw, Poland [elektroninis išteklius] / Maria Ganzha, Leszek Maciaszek, Marcin Paprzycki. Los Alamitos, CA: IEEE, 2014. ISBN 9788360810583. p. 227–234. DOI: 10.15439/2014F338.
  5. Martišius, Ignas; **Vasiljevas, Mindaugas**; Šidlauskas, Kęstutis; Turčinai, Rūtenis; Plauska, Ignas; Damaševičius, Robertas. Design of a neural interface-based system for control of robotic devices // Information and software technologies: 18th international conference, ICIST 2012, Kaunas, Lithuania, September 13–14, 2012: proceedings / [edited by] Tomas Skersys, Rimantas Butleris, Rita Butkiene. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. ISBN 9783642333071. p. 297–311. DOI: 10.1007/978-3-642-33308-8.
  6. **Vasiljevas, Mindaugas**; Martišius, Ignas; Šumskas, Tomas. Evaluation of user fatigue in neural computer interface system // Informacinės technologijos: 19-oji tarpuniversitetinė magistrantų ir doktorantų konferencija "Informacinė visuomenė ir universitetinės studijos" (IVUS 2014): konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas, Vytauto Didžiojo universitetas, Vilniaus universiteto Kauno humanitarinis fakultetas.
  7. **Vasiljevas, Mindaugas**; Damaševičius, Robertas; Połap, Dawid; Woźniak, Marcin. Gamification of eye exercises for evaluating eye fatigue // Proceedings of The 18th International Conference on Artificial



## 1. NUOVARGIO, ATsirANDANČIO VALDANT SISTEMAS, PROBLEMATIKA

FKS pagrindu veikiančiose vartotojo sąsajose aktyviai ir pasyviai sugeneruoti fiziologiniai signalai (pvz., elektroencefalograma (EEG), elektrookulograma (EOG), elektromiograma (EMG), odos laidumo signalai (angl. *EDA*) ir kt.) yra taikomi kaip sąsajos valdymo metodas. FKS srityje dažnai vartojamas terminas „biokibernetinis ciklas“ (angl. *biocybernetic loop*). Biokibernetinis ciklas – tai fiziologinės kompiuterijos paradigma, kuri aprašo, kaip fiziologiniai duomenys yra nuskaitomi, analizuojami ir paverčiami į kompiuterio valdymo komandas (žr. 1 pav.) [Serbedzija ir Fairclough, 2009]. Ši paradigma siekia užtikrinti adaptyvią komunikaciją tarp vartotojo ir valdomos sistemos. Vartotojas paprastai suprantamas kaip sistemos dalis. Vis dėlto vartotojas biokibernetiniame cikle apibrėžiamas kaip nestabilus sistemos narys, kurį veikia daugybė vidinių ir išorinių veiksnių [Serbedzija ir Fairclough, 2009]. Didelė šių veiksnių įvairovė lemia tai, kad pasitelkus biokibernetinį ciklą adaptyvią komunikaciją galima aprašyti gana abstrakčiai.



1 pav. Biokibernetinis ciklas [Karran, 2014]

Nors biokibernetinio ciklo paradigma abstrakčiai aprašo adaptyvią vartotojo ir sistemos komunikaciją, vis dėlto ji turi ir trūkumų, susijusių su fiziologinių jutiklių integracija, signalų apdorojimu ir pačios fiziologinės sistemos komunikacija su taikymo sritimi [Muñoz ir kt., 2017]. Be to, biokibernetinis ciklas stokoja praktinių sistemų projektavimo karkasų, kurie palengvintų biokibernetinio ciklo integraciją į konkrečią taikymo sritį. Pati taikymo sritis daro įtaką vartotojo nestabilumui, nes būtent nuo jos priklauso, kokie fiziologiniai signalai bus skaitomi ir kokios vartotojo būsenos bus užfiksuotos.

Kita vertus, impulso ir atsako (treniruotumo ir nuovargio) modeliai leidžia matematiškai aprašyti žmogaus fizinį našumą kaip treniruotumo ir nuovargio efektų sumą. Patį bendriausią impulso ir atsako modelį galima apibrėžti taip:

$$P = F_{fitness} + F_{fatigue} ; \tag{1}$$

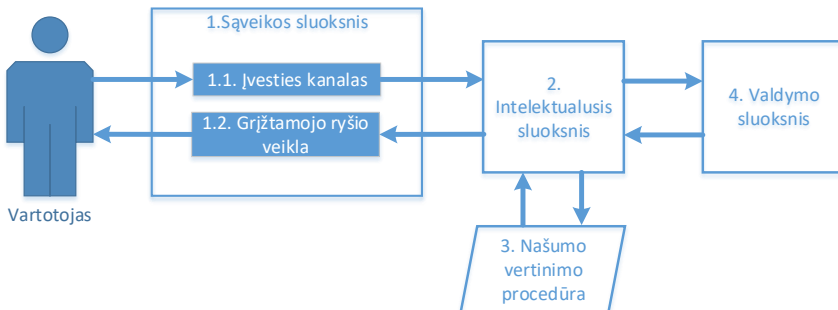
čia  $P$  – našumas,  $F_{fitness}$  – treniruotumas ir  $F_{fatigue}$  – nuovargis.

Šis modelis buvo tobulinamas ir validuojamas įvairiose mokslinėse studijose [Banister ir kt., 1975; Busso ir kt., 2002; Calvert ir kt., 1976; Morton ir kt., 1990]. Viena esminių šio tipo modelių savybių yra ta, kad jie leidžia aproksimuoti vartotojo našumą iki dviejų komponentų (treniruotumo ir nuovargio). Ši savybė yra svarbi biokibernetinio ciklo paradigmai, kurioje vartotojas suprantamas kaip nestabilus, daug būsenų galintis turėti sistemos narys.

Sujungus impulso ir atsako modelį su biokibernetiniu ciklu, būtų galima laikyti, kad vartotojui įtaką daro tik nuovargis ir treniruotumo lygis. Toks biokibernetinio ciklo plėtinys būtų apibendrintas, tačiau tuo pat metu gerokai detalesnis dėl mažesnio vartotojo būsenų skaičiaus. Be to, papildomai įtraukus ir našumo vertinimą būtų galima pasiekti didesnę adaptyvumą. Vis dėlto impulso ir atsako modeliai niekada nebuvo taikomi žmogaus ir kompiuterio sąveikos (angl. *human-computer interaction, HCI*) srityje, todėl joje šių modelių validumo tyrimai yra labai aktualūs.

## 2. SIŪLOMAS ŽMOGŲ TAUSOJANČIOS SĄSAJOS MODELIS

### 2.1. Vienakanalis žmogų tausojančios sąsajos modelis



2 pav. Vienakanalis žmogų tausojančios sąsajos modelis

Žmogų tausojančios sąsajos modelį sudaro keli sluoksniai:

- Sąveikos sluoksnis. Šis sluoksnis rūpinasi sistemos komunikacijai ir valdymui reikalingais įrankiais. Jis suskirstytas į du

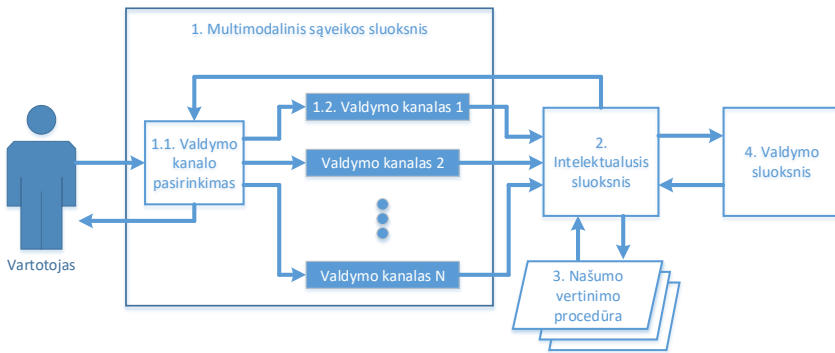
blokus: įvesties kanalą ir grįžtamojo ryšio veiklą. Įvesties kanalas yra atsakingas už įvairaus tipo įvesties nuskaitymą. Grįžtamojo ryšio veikla yra specifinis sistemos atsakas, kurį aktyvuoja intelektualusis sluoksnis, kai fiksuojamas sistemos valdymo našumo kritimas. Šios veiklos tikslas yra padėti naudotojui pailsėti ir atsigausti po psichinio ir (ar) fizinio nuovargio. Grįžtamojo ryšio tipas gali būti regos, klausos, lytėjimo ir somatosensoris.

- Intelektualusis sluoksnis. Šis sluoksnis yra atsakingas už sprendimų priėmimo procesą. Kiekvieną kartą, kai vartotojas siunčia įvesties signalą į sistemą, reikia nuspręsti, ar signalas turi būti konvertuojamas į valdymo komandą, ar naudotojui turėtų būti teikiamas grįžtamasis ryšys, skirtas poilsiui. Signalų savybės, kurios indikuoja nuovargį, priklauso nuo įvesties modalumo tipo. Šie požymiai išgaunami būtent intelektualiajame sluoksnyje. Išgautos savybės yra siunčiamos našumo vertinimo procedūrai, o po jos gaunamas vartotojo našumo kiekybinis įvertis. Tada priimamas sprendimas, ar vartotojas turėtų toliau tęsti sistemos valdymą, ar našumo lygis per mažas ir grįžtamojo ryšio veikla turi būti aktyvuota. Be to, signalo klasifikavimas siekiant nustatyti konkrečią valdymo komandą taip pat atliekamas intelektualiajame sluoksnyje.

- Našumo vertinimo procedūra. Procedūra taikoma kaip priemonė nuovargio ir treniruotumo (apsimokymo) lygiui įvertinti. Našumo vertinimas priklauso nuo iš anksto nustatyto specifinio įvesties modalumo modelio, kuris padeda kiekybiškai įvertinti našumą. Šios procedūros rezultatas yra reikšmingo našumo lygio pokyčio įvertinimas. Pradinį našumo modelį galima iš anksto nustatyti ir prireikus pakeisti tiesiogiai. Našumo įvertinimo procedūra gali būti apibūdinama kaip treniravimosi ir nuovargio modelis, empirinė slenksčio funkcija, šablono atpažinimo technika ar visų jų derinys.

- Valdymo sluoksnis. Valdymo sluoksnis nustato konkrečius programos valdymo veiksmus. Taikymo sritis yra plati, teoriškai ji apima beveik bet kokius skaitmeninius įrenginius, kurie gali priimti bent vieną įvesties modalumą bet kuria žmogui tinkama forma ir gali užtikrinti bent vieną išvesties modalumą bet kuria žmogui tinkama forma.

## 2.2. Multimodalinis žmogų tausojančios sąsajos modelis



3 pav. Multimodalinis žmogų tausojančios sąsajos modelis

Multimodalinį žmogų tausojančios sąsajos modelį sudaro šie sluoksniai:

- Multimodalinis sąveikos sluoksnis. Šis sluoksnis yra atsakingas už kiekvieno tipo įvesties signalo nuskaitymą. Sluoksnį sudaro daug valdymo kanalų. Kiekvienas valdymo kanalas reiškia konkretų įvesties būdą. Įvesties modalumų ir valdymo kanalų skaičius priklauso nuo vartotojo. Kai kurie įvesties būdai gali būti taikomi valdyti vienu metu (bet ne visi kartu), kiti – kaip alternatyvus valdymo kanalas. Bent vienas įvesties kanalas turi likti nenaudojamas. Jei reikia, kiekviename valdymo kanale atliekami kai kurie žemo lygio išankstinio apdorojimo veiksmai. Įvesties kanalo parinkiklis yra viena iš sudedamųjų multimodalinės sąveikos sluoksnio dalių. Jis yra atsakingas už konkretaus įvesties kanalo ar kanalų grupės parinkimą atsižvelgiant į duomenis, gautus iš intelektualiojo sluoksnio. Be to, jis yra atsakingas už grįžtamąjį ryšį vartotojui. Įvesties kanalo parinkiklis siunčia vartotojui informaciją apie tuo metu valdymui naudojamą kanalą bet kuria tinkama forma. Įvesties kanalo parinkiklis neleidžia visiems valdymo kanalams būti panaudotiems vienu metu.

- Intelektualusis sluoksnis. Šis komponentas yra atsakingas už priimamus sprendimus ir signalų klasifikavimą į valdymo komandas. Kadangi šiuo atveju yra daugiau nei vienas įvesties būdas, sistema turi nuspręsti, kuris iš įvesties būdų ar kuri jų grupė turėtų perimti valdymą. Galimi sprendimai: 1) palikti už valdymą atsakingą tą patį įvesties modalumą arba jų grupę, 2) pereiti prie kito įvesties modalumo arba jų grupės. Šis sprendimas priimamas remiantis dabartinio įvesties modalumo nuovargio įvertinimu. Skirtingiems įvesties signalams,

nuskaitytiems iš konkretaus įvesties modalumo, gali prirėkti skirtingų nuovargio vertinimo funkcijų, todėl gali reikėti taikyti skirtingus metodus nuovargio požymiams išskirti. Išskirtieji nuovargio požymiai yra siunčiami nuovargio vertinimo procedūrai, kuria nustatomas konkretus nuovargio įvertis. Galiausiai intelektualusis sluoksnis turi nuspręsti, koks valdymo kanalas (ar valdymo kanalų grupė) bus atsakingas už valdymą. Sprendimas siunčiamas į valdymo kanalo parinkiklį. Šie veiksmai kartojami kiekvieną kartą, kai vartotojas inicijuoja valdymo komandą.

- Našumo vertinimo procedūra. Ši procedūra gali turėti vieną ar daugiau iš anksto numatytų našumo modelių. Skirtingi našumo modeliai gali būti taikomi konkretiems valdymo kanalams. Vienas našumo modelis paprastai taikomas, kai našumas nustatomas remiantis iš valdymo sluoksnio gaunamais duomenimis, pagal kuriuos nusakoma valdymo kokybė. Šios procedūros rezultatas yra vartotojo valdymo našumo įvertis konkrečiais laiko momentais.

- Valdymo sluoksnis. Valdymo sluoksnis apibrėžia konkrečią programą, kurią naudoja vartotojas. Taikymo sritis apima beveik bet kokius skaitmeninius įrenginius, kurie gali priimti du (ar daugiau) bet kurios žmogui tinkamos formos įvesties būdus ir gali suteikti bent vieną išvesties modalumą bet kuria žmogui tinkama forma.

### **3. ANALITINIAI TRENIRAVIMOSI IR NUOVARGIO MODELIAI, SKIRTI ŽMOGŲ TAUSOJANČIOS SĄSAJOS MODELIO**

#### **3.1. Akių nuovargio modeliavimas atliekant rašymo žvilgsniu užduotį**

##### **3.1.1. Siūlomas treniruočių ir nuovargio modelis**

Raide  $X$  žymima laiko eilutė, susidedanti iš žvilgsnio pozicijos duomenų  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , išmatuotų laiko momentais  $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ , kai atliekama žvilgsnio fiksavimo užduotis. Siekiant paprastumo, šiame darbe nagrinėjama tik viena dimensija (horizontali), nors modelis gali būti taikomas ir vertikaloje dimensijoje. Laikantis prielaidos, kad  $X$  reikšmės yra pasiskirsčiusios pagal normalinį skirstinį, galima apibrėžti  $X$  tikimybinio tankio pasiskirstymo funkciją ( $pdf(X)$ ).

Laiko eilutės buvo segmentuojamos naudojant slenkantį langą, kur lokalus slenkantis langas yra  $w$  ir žingsnis tarp dviejų slenkančių langų yra  $s$ . Ši transformacija paverčia  $X$  į vektorių seką  $\bar{X} = (\{x_1, \dots, x_w\}, \{x_{s+1}, \dots, x_{s+w}\}, \dots, \{x_{ks+1}, \dots, x_{ks+w}\})$ ; čia  $k = \lfloor (n - w) / s \rfloor$ .

Raide  $M$  žymima laiko eilutė, sudaryta iš maksimalių funkcijos  $pdf(X)$  reikšmių. Ši funkcija nurodo didžiausių laiko eilutės reikšmių tikimybės skirstinį. PDF yra skaičiuojama kiekvienam sekos  $\bar{X}$  nariui (vektoriui). Gaunama seka  $M = (m_1, m_2, \dots, m_i)$ , kur  $m_i$  – maksimali  $i$ -tojo  $\bar{X}$  elemento PDF reikšmė,  $i = [1; k]$ .

$M$  reikšmė gali būti naudojama subjekto veikimui apibūdinti: kuo didesnė vertė, tuo tikslesnis objektas, ir atvirkesčiai.

Tikimybės skirstinys priklauso nuo daugybės veiksnių, tokių kaip žvilgsniu valdomos sąsajos įgūdžiai ir žvilgsnio sekimo užduoties sudėtingumas. Todėl  $M$  turi būti normalizuojama eliminuojant nepastovumą, atsirandantį dėl subjektų individualių skirtumų ir skirtingo užduoties sudėtingumo.  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_p\}$  yra subjektų aibė.  $M_S$  yra matrica, sudaryta iš  $M$  kiekvienam subjektui  $S$ . Normalizuojama kiekvieną matricos  $\overline{M_S}$  elementą dalijant iš vidutinės kiekvieno subjekto reikšmės ir visų subjektų vidutinės reikšmės konkrečiu laiko momentu sandaugos kvadratinės šaknies. Normalizuota matrica  $\overline{M_{S,t}}$  yra apibrėžiama taip:

$$\overline{M_{s,t}} = \frac{M_{s,t}}{\sqrt{E(M_{\forall s,t}) \cdot E(M_{s,\forall t})}}; \quad (2)$$

čia  $E(\cdot)$  yra vidurkio operatorius.

$\overline{M_{S,t}}$  vidurkis yra  $\overline{M} = E(\overline{M_{S,t}})$ .  $\overline{M}$  reikšmės yra interpoliuojamos šiam Banisterio modelio variantui:

$$P(t) = k_1 \cdot e^{-t/\tau_1} - k_2 \cdot e^{-t/\tau_2}; \quad (3)$$

čia  $P(t)$  – valdymo efektyvumas (angl. *performance*),  $k_1$  ir  $k_2$  – treniravimosi ir nuovargio parametrai,  $t$  – laikas,  $\tau_1$  ir  $\tau_2$  – treniravimosi ir nuovargio parametrų slopinimo koeficientai.

Pagal Banisterio modelį darytina prielaida, kad treniruočių metu valdymo efektyvumas pirmiausia krinta, po laiko  $t_n$  sugrįžta į pradinį lygį ir praėjus laikui  $t_g$  pasiekia piką [Fitz-Clarke ir kt., 1991]. Todėl skaičiuojami papildomi parametrai  $t_n$  ir  $t_g$  tam, kad būtų įvertintas subjekto poilsio laikas, reikalingas atsigausti po intensyvios veiklos.  $t_n$  ir  $t_g$  parametrai skaičiuojami taip:

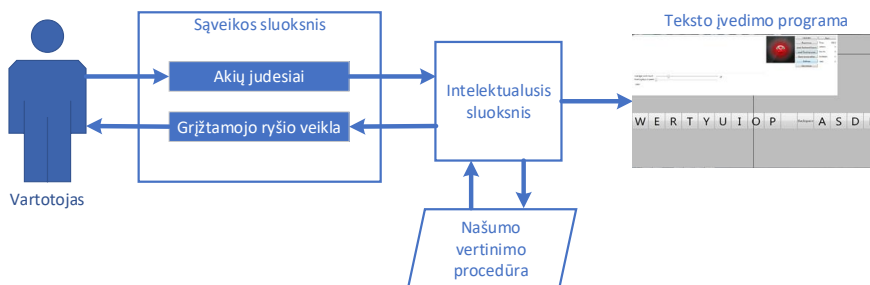
$$t_n = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \left( \frac{k_2}{k_1} \right), \quad (4)$$

$$t_g = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \left( \frac{\tau_1 k_2}{\tau_2 k_1} \right). \quad (5)$$

### 3.1.2. Vienakanalio žmogų tausojančios sąsajos modelio taikymas projektuojant sistemą

Žvilgsniu valdoma teksto rašymo programa yra grindžiama vienakanaliniu žmogų tausojančios sąsajos modeliu, kur įvesties kanalas yra akių judesiai. Adaptyvus žvilgsnio išlaikymo laiko (angl. *dwell time*) nustatymas atstoja modelyje aprašomą grįžtamąjį ryšį. Žvilgsnio išlaikymo laikas yra pritaikomas

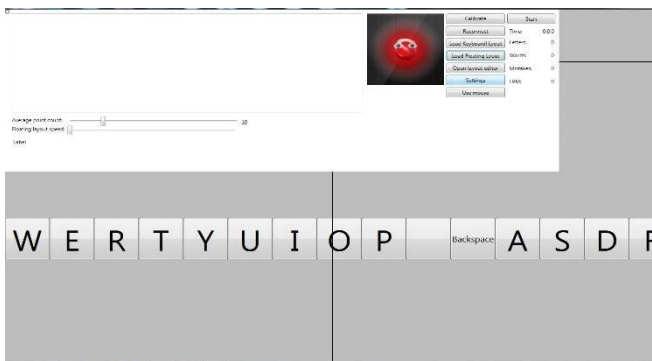
pagal spausdinimo klaidų, aptiktų intelektualiajame sistemos sluoksnyje, skaičių. Šiame darbe taip pat tiriamas sudėtingesnis treniravimosi ir nuovargio modelis, aprašytas ankstesniame skyrelyje. Šio modelio pagrindu taip pat galima realizuoti grįžtamąjį ryšį. Intelektualusis šios programos sluoksnis yra atsakingas už žvilgsnio atvaizdavimą kompiuterio ekrane, spausdinimo klaidų aptikimą ir grįžtamojo ryšio vartotojui inicijavimą. Klaidų kiekio slenksstinė funkcija realizuoja nuovargio vertinimo procedūrą. Klaidų slenkstis rodo, kiek klaidų galima padaryti, iki kol inicijuojamas grįžtamasis ryšys, t. y. keičiamas žvilgsnio išlaikymo laikas. Konkrečią ribinę vertę nustato vartotojas. Bendrąja prasme sistemos valdymo eiga yra tokia: vartotojas žvilgsniu įveda tekstą, sistema stebi, kiek nepageidaujamų pasirinkimų (klaidų) vartotojas padarė, ir kai pasiekiamas klaidų slenkstis, koreguojamas žvilgsnio išlaikymo laikas (žvilgsnio išlaikymo laikas prailginamas nustatytu dydžiu). Priešingas procesas (žvilgsnio išlaikymo laiko trumpinimas) vyksta, kai vartotojas pasiekia tam tikrą tikslinių pasirinkimų skaičių.



**4 pav.** Žvilgsniu valdomos teksto rašymo programos vienakanalis žmogų tausojančios sąsajos modelis

### 3.1.3. Grafinė vartotojo sąsaja

Sukurta sistemos sąsaja yra grindžiama „slankiosios klaviatūros“ (angl. *scrollable keyboard*) koncepcija [Špakov ir Majoranta, 2009].



**5 pav.** Žvilgsniu valdomos teksto rašymo programos grafinė vartotojo sąsaja

Sistemos sąsaja naudoja du slankiosios klaviatūros išdėstymo tipus: 1) standartinį *QWERTY* išdėstymą, atvaizduojamą viena slankiąja raidžių eilute, 2) optimizuotą simbolių išdėstymą, paremtą raidžių bigramomis. Grįžtamąjį ryšį užtikrina juoda linija, kuri visada išlieka ekrano centre, o vienos eilutės klaviatūra juda po linija, priklausomai nuo žvilgsnio horizontalios padėties. Raidės pasirenkamos užfiksuojant žvilgsnį ir išlaikant jį ant konkrečios raidės apibrėžtą žvilgsnio išlaikymo laiką. Papildomi meniu mygtukai yra skirti kalibravimui, prisijungti prie žvilgsnio sekimo įrenginio, alternatyviems klaviatūros išdėstymo būdams įkelti ir programos parinkims nustatyti. Buvo sukurtas išdėstymo redaktorius, skirtas kitiems klaviatūros išdėstymo tipams kurti.

### 3.1.4. Eksperimentai ir rezultatai

Žvilgsnio sekimo įrenginys „EyeTribe“ (žvilgsnio sekimo diapazonas 45–75 cm, sekimo plotas 40×30 cm 65 cm atstumu) buvo prijungtas prie „HP Ultrabook“ nešiojamojo kompiuterio, kurio techninės charakteristikos: „Microsoft 8 OS 64-bit“ su „Intel Core i5-4202Y 1.60 GHz CPU“ ir 4 GB RAM. Programa buvo rodoma 14 colių plokiąjame LCD ekrane su LED apšvietimu ir 1920×1080 pikselių ekrano raiška.

Eksperimente dalyvavo 8 savanoriai (25–32 metų amžiaus, 7 vyrai ir 1 moteris). Jie buvo Kauno technologijos universiteto studentai arba darbuotojai. Visi laisvai kalba angliškai ir neturi jokių regėjimo problemų. Prieš eksperimentą visi dalyviai pasirašė raštišką sutikimą jame dalyvauti. Atlikus eksperimentą, pradinis duomenų patikrinimas parodė, kad vieno subjekto duomenys nebuvo įrašyti dėl programinės įrangos trikdžių. Dėl šios priežasties tolesnei analizei buvo naudojami tik septynių subjektų duomenys.

Eksperimentui lengvai įsimenantai frazė buvo parinkta iš 500 frazių rinkinio, kurį sudarė MacKenzie’is ir Soukoreffas [2003]. Šis frazių rinkinys laikomas

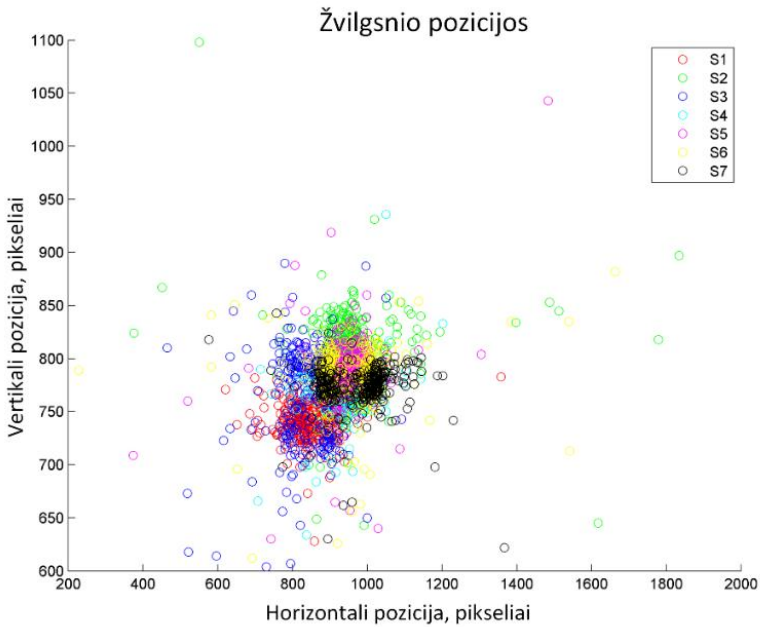


faktiniu standartu įvestam tekstui vertinti. Iš pasirinktos frazės buvo pašalinta skyryba ir įvedant frazes nereikėjo laikytis didžiųjų raidžių rašybos taisyklių.

Prieš rinkdamas duomenis, eksperimentuotojas paaiškino užduotį ir pademonstravo programinės įrangos veikimą. Jis buvo išmokytas įvesti nurodytas frazes kuo greičiau ir tiksliau, taisyti tik tuo atveju, jei esamame ar ankstesniame žodyje aptikta klaida. Tyrimo dalyviams buvo leista įvesti kelias bandomąsias frazes, kad susipažintų su žvilgsniu valdomo parinkimo ir taisymo metodais. Vėliau tyrimo subjektai buvo mokomi žvilgsniu suvesti tekstą kaip įmanoma greičiau ir tiksliau.

Paprastai žvilgsnio stebėjimo sąsajos būna skirtos imituoti standartinio išvesties įrenginio, pvz., pelės, veikimui. Žvilgsnio sekimo įrenginys, pritvirtintas arba prie vartotojo kaktos, arba priešais jį, seka žvilgsnį, paversdamas jį ekrano koordinatėmis. Įvedinėdamas tekstą žvilgsniu, pirmą kartą vartotojas virtualiojoje klaviatūroje pasirenka raidę, ties ja užfiksuoja savo žvilgsnį. Žvilgsnio sekimo įrenginys seka vartotojo žvilgsnio trajektoriją, o programinė įranga įrašo ir atlieka žvilgsnio analizę. Įvesties atveju vartotojas turi fiksuoti savo žvilgsnį į raidę ir išlaikyti jį numatytą žvilgsnio išlaikymo laiką. Kai žvilgsniui išlaikyti skirtas laikas pasibaigia, sistema parenka raidę ir vartotojas gali nukreipti žvilgsnį į kitą raidę. Grįžtamasis ryšys buvo pateikiamas tiek užfiksavimo, tiek pasirinkimo atvejais.

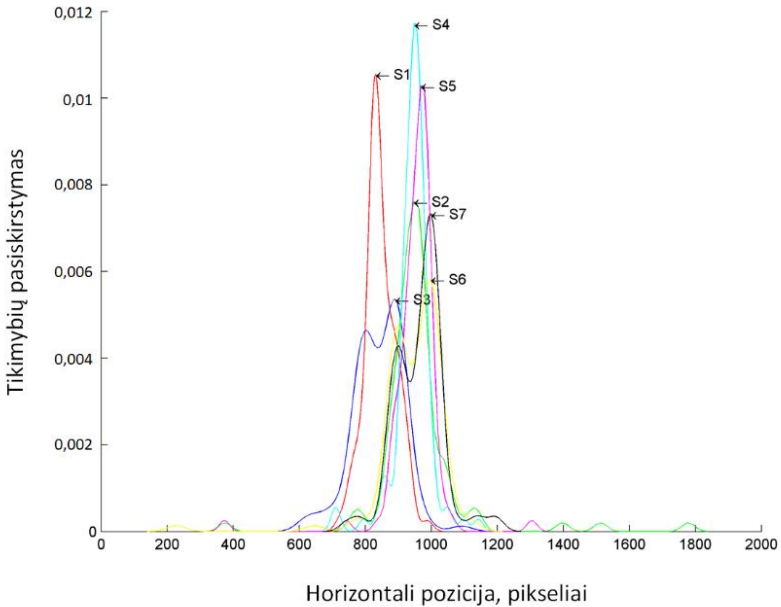
Sukaupti eksperimento duomenys (erdvinės žvilgsnio pozicijos žvilgsniu valdomos teksto rašymo programos centre) grafiškai atvaizduoti 6 pav.



**6 pav.** Visų tiriamųjų subjektų žvilgsnio pozicijos

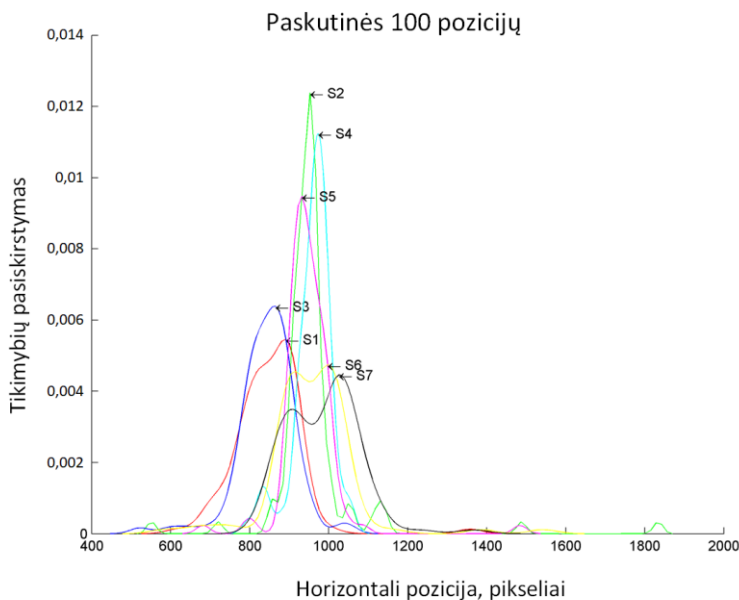
Nuovargio poveikiui atvaizduoti buvo sudarytos pirmų 100 žvilgsnio pozicijų (tik horizontalios padėties) ir paskutinių 100 žvilgsnio pozicijų tikimybių tankio funkcijos. Buvo atsižvelgta tik į horizontalią padėtį, nes žvilgsniu valdomos teksto rašymo programos slankioji klaviatūra judėjo tik horizontalia trajektorija. Gauti rezultatai atvaizduoti 7 ir 8 pav.

### Pirmos 100 pozicijų



**7 pav.** Visų subjektų horizontalios žvilgsnio pozicijos tikimybės tankio funkcijos (pirmos 100 pozicijų)

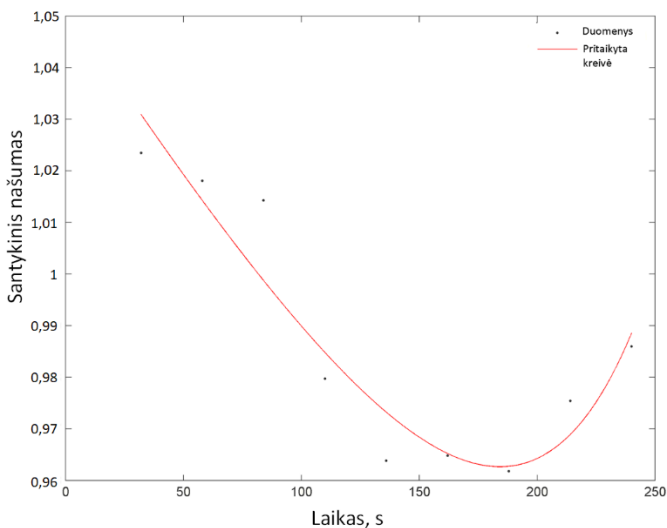
Atkreiptinas dėmesys, kad tikimybės tankio funkcijos forma pakito. Daugumos subjektų atveju funkcija tapo plokštesnė: reikšmės išsibarstė plačiau – tai matoma iš storesnių skirstinių „uodegų“. Tikimybės tankio funkcijos forma rodo, kad trims iš septynių tiriamųjų pasireiškė dviejų faktorių poveikis.



**8 pav.** Visų subjektų horizontalios žvilgsnio pozicijos tikimybės tankio funkcijos (paskutinės 100 pozicijų)

Siekiant modeliuoti vartotojo nuovargį eksperimento metu, laikoma, kad tiriamojo subjekto žvilgsnio pozicijos išlaikymas vyksta pagal eksponentinį nykimo modelį su dviem komponentais: teigiamas reiškia treniravimąsi (apsimokymą), o neigiamas – nuovargį (pagal [Banister ir kt., 1975]).

Buvo taikomas (2) formulėje pasiūlytas modelis. Modelio parametrai buvo nustatyti taikant netiesinį mažiausių kvadratų iteracijos metodą, iki minimumo sumažinant likutinę regresijos liekanų kvadratų sumą ( $RSS$ ) su mažiausių kvadratų algoritmu (angl. *trust-region-reflective*). Skaičiavimai buvo atliekami su „Matlab 2013a“ (versija 8.1, „Mathworks“) sistema. Apskaičiuoti 95 proc. pasikliautinumo rėžiai nustatytiems parametrams. Modelio pritaikymo rezultatai parodyti 9 pav.



**9 pav.** Modelio pritaikymas

Geriausi pritaikyto modelio parametrai yra pateikti 1–2 lentelėse.

**1 lentelė.** Modelio parametrai (vidurkis ir pasikliautinimo intervalas)

Parametras	Vidurkis	95 % pasikliautinimo rėžiai	
$k_1$	1,051	1,021	1,081
$t_1$	1471	-265	2677
$k_2$	-0,0013	-0,012	0,015
$t_2$	55,8	-15,8	127

Modelio pritaikomumui įvertinti buvo apskaičiuotas mišriosios koreliacijos koeficientas:  $R^2 = 1 - (RSS / TSS)$ , kur  $TSS$  yra bendra kvadratų suma, taip pat pagal laisvės laipsnius pakoreguotas mišriosios koreliacijos koeficientas. Kvadratų suma ( $SSE$ ) ir kvadratinė šaknis iš vidutinės kvadratinės paklaidos ( $RMSE$ ) buvo suskaičiuotos siekiant įvertinti skirtumus tarp modeliuojamų ir realių duomenų reikšmių (žr. 2 lent.).

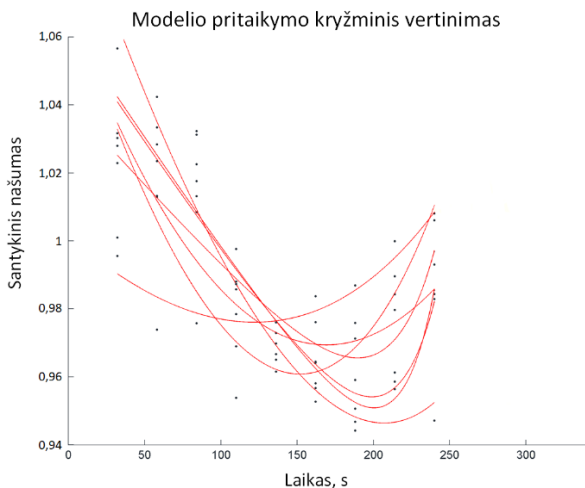
## 2 lentelė. Modelio pritaikymo charakteristikos

Požymis	Reikšmė
<i>SSE</i>	0,0005
Laisvės laipsniai	5
$R^2$	0,9027
Normalizuotas $R^2$	0,8442
<i>RMSE</i>	0,0098

Duomenims analizuoti buvo atlikta pagrindinių komponentų analizė (angl. *principal component analysis, PCA*), remiantis horizontalios žvilgsnio padėties kovariacijos matrica. *Faktorius 1* sudarė 73 proc. visos dispersijos. Šis faktorius turėjo stiprų neigiamą ryšį su našumu ir gali būti priskirtas nuovargiui. *Faktorius 2* sudarė 17 proc. visos dispersijos. Šis veiksnys buvo teigiamai susijęs su veiklos rezultatais ir gali būti priskiriamas treniravimuisi (apsimokymui).

Svarbu žinoti, kiek duomenų taškų reikia kiekvienam parametrai, kad būtų galima atlikti statistinę analizę. Daugialypės tiesinės regresijos atveju kiekvienam parametrai yra rekomenduojama 15 bandymų. Kadangi Banisterio modelis yra netiesinis, kiekvienam parametrai gali prireikti daugiau duomenų taškų. Šiame eksperimente 4 parametrams ištirti atlikti 338 bandymai, kurių turėtų pakakti netiesiniam modeliui.

Analizuojant šio modelio stabilumą, buvo atlikti iteraciniai skaičiavimai su tais pačiais duomenimis, tik neįtraukus vieno atsitiktinai pasirinkto subjekto, kaip rekomenduojama Hellardo ir kt. [Hellard ir kt., 2006] metodikoje. Metodas yra laikomas nepatikimu, jei menki duomenų sutrikimai gali turėti skaičiavimams reikšmingų pokyčių. Siekiant įvertinti rezultatų stabilumą, buvo atlikta vieno atmetimo 7 kartų kryžminė validacija. Kiekvieno bandymo metu vienas subjektas būdavo pašalinamas, o modelio skaičiavimai pakartojami. 10 pav. vaizduojami skirtingi kryžminės validacijos metu gauti modeliai. Modeliai skiriasi vienas nuo kito dėl skirtingų individualių subjekto savybių. Be to, 7 subjektų imties nepakanka modeliui apibendrinti. Vis dėlto kreivių formos yra panašios, o tai rodo, kad Banisterio modelis yra tinkamas žvilgsniu valdomos sąsajos vartotojo nuovargio poveikiui vertinti.



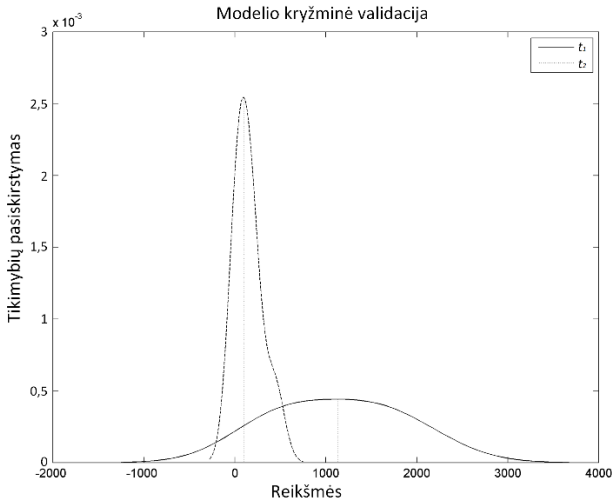
**10 pav.** Kryžminės validacijos metu gauti modeliai

Modelio parametrų matavimo rezultatai apibendrinti 3 lentelėje.

**3 lentelė.** Kryžminės validacijos modelio parametrų matavimo rezultatai

Modelio parametrai	Vidutinė reikšmė	Standartinis nuokrypis
$k_1$	0,974	0,136
$k_2$	-0,085	0,135
$t_1$	1131	654
$t_2$	-149	147
$t_n$	308	244
$t_g$	177	31

11 pav. pateikiamos nuovargio ir treniravimosi slopinimo koeficientų tikimybių tankio funkcijos, gautos atliekant kryžminę validaciją. Pastebima, kad nuovargio poveikis pasireiškė anksčiau ir yra stipresnis už treniravimosi (apsimokymo) poveikį.



11 pav. Modelio slopinimo parametrų tikimybių tankio funkcijos

## 3.2. Nuovargio modeliavimas žvilgsnio sekimu paremtame kompiuteriniame žaidime

### 3.2.1. Žaidimo aprašymas

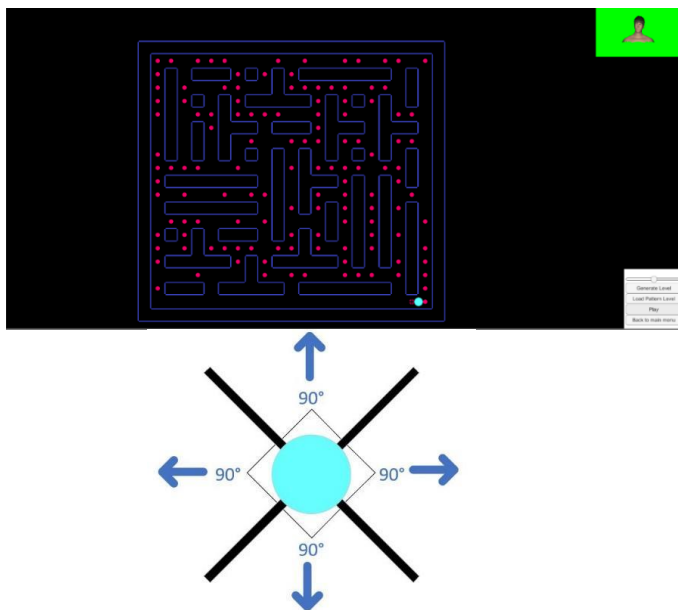
Akių nuovargis paprastai pasireiškia po aktyvių akių judesių, nes įtraukiami ir aplink akis esantys raumenys. Tokius judesius galima atlikti prižiūrint specialistui, tačiau dažnai tai yra monotoniška ir varginanti veikla. Kitas būdas yra taikyti edukacinius žaidimus [Wouters ir kt., 2013]. Edukaciniai žaidimai buvo pasiūlyti kaip priemonė įtraukti žmonėms į naudingas veiklas, pvz., mokymąsi [Danevičius ir kt., 2018], atliekant tam tikras žaidimo užduotis. Dėl šios priežasties buvo sukurtas edukacinis žaidimas, kuris verčia žmogų atlikti vertikalius ir horizontalius akių judesius.

Žaidimo idėja yra grindžiama plačiai žinomu „Pac-Man“ žaidimu, priskiriamu prie labirinto tipo žaidimų. Žaidėjas juda labirintu, kuriame yra paslėptų lobių (žymimų taškeliais) ir klajojančių priešininkų (juos atitinka vaiduokliai). Žaidėjo tikslas yra surinkti taškus išvengiant vaiduoklių. Darbe buvo įdiegta paprastesnė žaidimo versija, kurioje žaidėjas turi judėti labirintu vertikalia ar horizontalia kryptimi ir rinkti kamuoliukus. Nors žaidimo tikslas yra rinkti kamuoliukus, siekiami akių judesiai atliekami vaikštant labirintu. Kintantys vertikalūs ir horizontalūs akies judesiai yra svarbi regos terapijos dalis, kuri, kaip rodo tyrimai, pagerina regėjimą [Brunyé ir kt., 2009], gydo ambliopiją [Fronius ir kt., 2006] ir akių obuolio judėjimo sutrikimus.



Yra du žaidimo režimai: įprastas ir riboto laiko. Žaisdamas įprastu režimu, kad laimėtų, žaidėjas turi surinkti visus labirinte esančius kamuolius. Žaisdamas žaidimą, kuriam numatytas laiko limitas, per jį žaidėjas turi surinkti kuo daugiau kamuoliukų. Kai kamuoliukas yra paimamas, po kurio laiko jis vėl gali atsidurti toje pačioje labirinto vietoje. Sukurtą žaidimą yra lengva žaisti ir jame pritaikomi veiksmingi ŽKS principai, apie kuriuos kalba Shneidermanas ir kt. [2016]: pastovumas (grafika ir žaidimo mechanika adaptuota iš gerai žinomo „Pac-Man“ žaidimo), informatyvus grįžtamasis ryšys (rezultatas skaičiuojamas atsižvelgiant į žaidėjo veiksmus), palaikoma vidinio valdymo padėtis (žaidėjas inicijuoja veiksmus).

Pagrindinis žaidimo langas yra parodytas 12 pav. (viršuje). Pagrindinio personažo judesius riboja žaidimo labirinto sienos. Pagrindinis žaidimo veikėjas (žymimas mėlynu tašku) yra valdomas žaidėjo akių judesiais. Abstrakčiai žaidimo valdymo principai atvaizduoti 12 pav. (apačioje). Sritis aplink pagrindinį veikėją padalyta į keturis segmentus. Kiekvienas segmentas yra apibrėžiamas  $90^\circ$  sritimis nuo pradinio taško, kuris žymi pagrindinį veikėją. Kiekvienas iš keturių segmentų žymi vieną iš keturių judėjimo krypčių. Kai žaidėjo žvilgsnio pozicija užfiksuojama atitinkamame segmente, pagrindinis veikėjas juda kryptimi, kurią žymi segmentas.



12 pav. Žaidimo vaizdas su pagrindiniu veikėju (mėlynas taškas) (viršuje) ir pagrindinio veikėjo valdymo schema (apačioje)

### 3.2.2. Akių nuovargio modelis

Du pagrindiniai veiksniai daro įtaką žaidėjo kognityviniam pažinimui žaidimo metu: mokymasis, kuris žymi dėl praktikos pagerėjusias savybes ir valdymo meistriškumą, ir nuovargis, kuris ženklina gebėjimų atlikti žaidimo veiksmus dėl akių raumenų ir psichinio nuovargio silpnėjimą. Norint įvertinti nuovargio ir poilsio poveikį gebėjimui atlikti žvilgsnio valdymo užduotis, buvo pritaikytas slopinamųjų svyravimų modelis. Slopstantis harmoninis svyravimas yra eksponentiškai mažėjanti sinusoidinė banga, kurios virpesių amplitudė laikui bėgant mažėja. Šis modelis rodo ilgalaikio nuovargio padarinius, taip pat įvertindamas ir trumpalaikius valdymo efektyvumo pagerėjimus. Slopstančio harmoninio svyravimo modelis buvo sėkmingai pritaikytas treniravimosi įtakai fiziniam pajėgumui modeliuoti. Šis modelis gali būti laikomas apibendrinančiu treniruotumo ir nuovargio modelius, tokius kaip Banisterio modelis, kuris rodo raumenų prisitaikymą prie fizinių treniruočių kaip dviejų eksponentinių funkcijų, žyminčių teigiamą įtaką (fizinį pasirengimą) ir neigiamą įtaką (nuovargį), sumą [Calvert ir kt., 1976].

Pritaikytas žaidimo valdymo charakteristikų  $f$  kitimo per tam tikrą laiką  $t$  modelis išreiškiamas taip:

$$f(t) = Ae^{-\lambda t} \times \cos(\omega t + \phi); \quad (6)$$

čia  $A$  – pradinė amplitudė,  $\lambda$  – slopinimo koeficientas,  $\omega$  – kampinis dažnis, o  $\phi$  – pradinis fazės kampas. Jei slopinimo koeficientas yra teigiamas, našumas mažėja dėl nuovargio, o esant neigiamam slopinimui našumas auga dėl treniravimosi efekto. Duomenims grafiškai atvaizduoti naudojami fazių erdvės grafikai [Damasevicius ir kt., 2014], kurie žymi  $f(x)$  ir  $f(t+1)$  reikšmes.

### 3.2.3. Eksperimentai ir rezultatai

Eksperimente dalyvavo 12 sveikų asmenų (6 vyrai ir 6 moterys), kurių amžius 21–42 metai. Visi tyrimo dalyviai užpildė informuoto asmens sutikimo formą ir buvo laikomasi Helsinkio deklaracijos principų. Visų dalyvių buvo paprašyta žaisti žaidimą 15 min. riboto laiko žaidimo režimu. „Tobii Eye Tracker 4C“ žvilgsnio sekimo įrenginys buvo naudojamas akių judesiams fiksuoti ir pagrindiniam žaidimo veikėjui valdyti žvilgsniu.

Žaidimo našumo duomenys buvo pritaikyti slopinamojo harmoninio svyravimo modeliui (žr. (6) lygtį). Prieš atliekant kreivės optimizavimo procedūrą, duomenys buvo glotninami taikant „BoostEMD“ metodą [Damasevicius ir kt., 2015]. Šiuo metodu gautų rezultatų palyginimas su kitais glotninimo metodais gautais rezultatais pateiktas 4 lentelėje.

#### 4 lentelė. Glotninimo rezultatų palyginimas

		Filtravimo metodai			
		<i>BoostEMD</i>	Medianos filtras	Judančio vidurkio filtras	Savitzky'io ir Golay'aus filtras
Standartinis nuokrypis	vidurkis	3,97	4,37	<b>3,89</b>	4,11
	mediana	3,96	3,93	<b>3,75</b>	3,76
Išvestinės standartinis nuokrypis	vidurkis	<b>0,76</b>	1,71	1,30	1,56
	mediana	<b>0,85</b>	1,71	1,25	1,60
Normalizuotos išvestinės standartinis nuokrypis	vidurkis	<b>0,04</b>	0,07	0,05	0,06
	mediana	<b>0,04</b>	0,06	0,04	0,06
Skaičiaus ženklo pasikeitimo skaičius	vidurkis	<b>0,07</b>	0,13	0,11	0,13
	mediana	<b>0,08</b>	0,12	0,10	0,11
Kreivės ilgis	vidurkis	<b>34,44</b>	147,75	94,41	118,57
	mediana	<b>33,76</b>	132,25	70,35	116,50
Suminė kvadratinė antrosios eilės išvestinė	vidurkis	<b>34,44</b>	147,75	94,41	118,57
	mediana	<b>33,76</b>	132,25	70,35	116,50

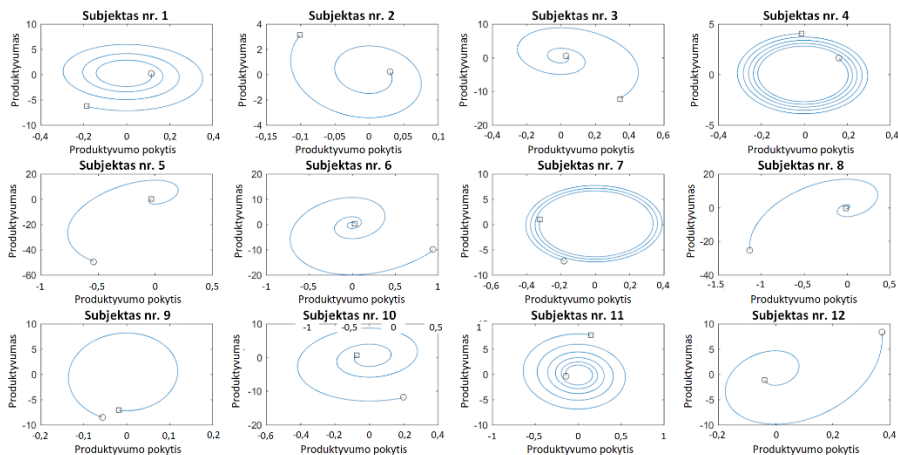
Modelio kreivei optimizuoti buvo naudojamas Levenbergo ir Marquardo algoritmas. Skaičiavimai atlikti „Matlab 2013a“ (versija 8.1, „Mathworks“) sistema. Modelio pritaikymo visiems tyrimo dalyviams rezultatai pateikiami 5 lentelėje. Modelio patikimumas buvo įvertintas naudojant lyginių ir nelyginių reikšmių testą, kurio koreliacijos koeficientas siekė  $0,82 \pm 0,08$  (vidurkis  $\pm$  standartinis nuokrypis). Pastebėta ryški ( $r = 0,82$ ) teigiama koreliacija tarp amplitudės ir slopinimo koeficiento. Tai rodo, kad geriau pradėjusiųjų nuovargio rodikliai būna aukštesni, o lėtai pradėję patiria mažiau nuovargio ir žaidimo metu net geba pagerinti rezultatus. Modelio parametrai gali būti naudojami žaidėjams pagal jų žaidimo dinamiką kategorizuoti į besimokančiuosius (su neigiamu slopinimo koeficientu) ir nulstančiuosius (su teigiamu slopinimo koeficientu).

**5 lentelė.** Visų tyrimo subjektų parametrai pagal slopstančio harmoninio svyravimo modelį

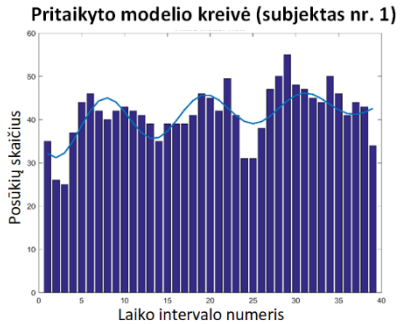
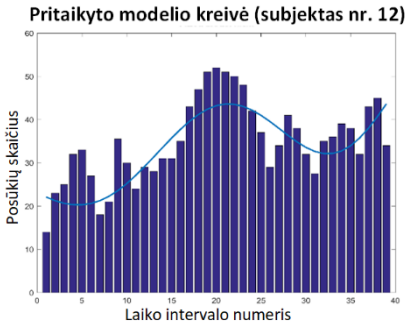
Subjekto nr.	Modelio koeficientai			Lyginių ir nelyginių reikšmių testas
	Amplitudė	Slopinimo faktorius	Kampinis dažnis	
			Fazė	

1	7,6393	0,0317	-0,5407	-2,0307	0,8945
2	4,7579	0,0348	0,2657	0,5575	0,8046
3	15,1602	0,0667	0,3611	-2,9749	0,7480
4	4,1099	0,0114	-0,7830	0,8002	0,9819
5	1,5840	-0,0862	-0,2036	-1,1776	0,7852
6	0,5918	-0,0933	-0,4659	1,7690	0,8982
7	6,2494	-0,0060	0,5168	0,8993	0,7780
8	0,3761	-0,1147	0,3136	2,3527	0,7217
9	7,1254	-0,0062	-0,1551	-2,8604	0,7979
10	1,9880	-0,0483	-0,3842	-0,8683	0,8071
11	8,4314	0,0404	0,8598	-1,1648	0,9275
12	1,6275	-0,0571	0,2378	2,0307	0,8512

13 pav. matyti, kaip keitėsi žaidimo valdymo rezultatai taikant fazių erdvės diagramas. Jie rodo, kaip žaidimo įgūdžiams įtaką daro du procesai: 1) treniravimasis (mokymasis), kuris gerina gebėjimus ir yra atvaizduojamas iš centro į išorę besisukančia spirale, 2) nuovargis, kuris mažina gebėjimus ir yra atvaizduojamas kaip į centrą besisukanti spiralė. Kreivės forma taip pat rodo vartotojo veiklos stabilumą arba nestabilumą. Kuo tankesnė kreivė, tuo stabilesnis vartotojo valdymas, ir atvirksčiai. Šių veikimo tipų pavyzdys pateiktas 14 pav. Kiekvienas subjektas pasižymi tik jam būdingomis savybėmis, kurios neleidžia apibendrinti rezultatų.

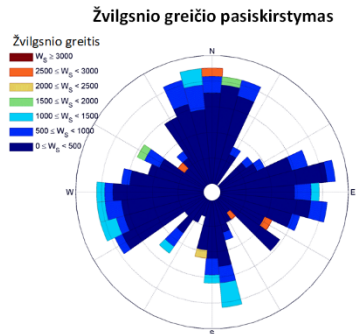
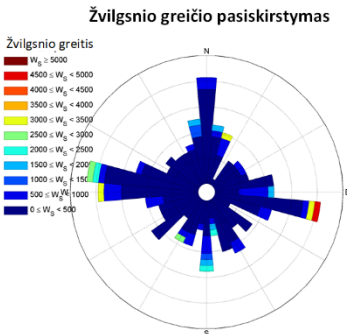


**13 pav.** Žaidimo valdymo parametrų fazių erdvės diagramos (□ – žaidimo pradžia, ○ – žaidimo pabaiga)



**14 pav.** Skirtingi žaidėjų tipai pagal žaidimo valdymo dinamiką: kairėje – padidėjęs treniravimosi (apsimokymo) faktorius (subjektas nr. 12), dešinėje – padidėjęs nuovargio faktorius (subjektas nr. 1)

Sakadų greičio ir erdvinio pasiskirstymo pokyčių rezultatai (žr. 15 pav.) rodo, kad sakadų greitis laikui bėgant mažėja, o žvilgsnių pasiskirstymas erdvėje tampa ne toks ryškus ir mažiau nukreiptas į pagrindines žaidimo valdymo ašis (t. y. horizontalias, V–R, ir vertikalias, Š–P). Tai rodo susilpnėjusį gebėjimą sekti žaidimą ir mažesnę valdymo tikslumą.



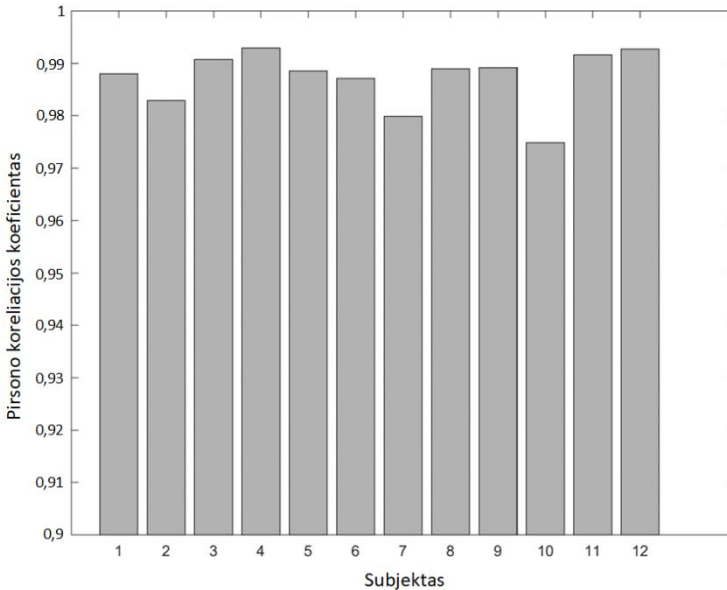
**15 pav.** Sakadų greičio pokytis žaidimo metu (subjektas nr. 5): pirmoji žaidimo pusė (kairėje) ir antroji žaidimo pusė (dešinėje)

Patvirtinti šiam teiginiui buvo sudarytas palyginimo operatorius:

$$C(\Delta t) = \sum_{\Delta t} [v(t + \Delta t) < v(t)], \quad (7)$$

čia  $[\cdot]$  – Iversono operatorius (angl. *Iverson bracket operator*),  $v$  – sakadų greitis,  $\Delta t$  – laiko skirtumas.

Kiekvieno subjekto  $C$  nuo  $\Delta t$  įverčiams buvo atlikta tiesinė regresija, kai  $C = b_0 + b_1 \Delta t$ . Neigiama tendencija (sakadų greičio mažėjimas) buvo patvirtinta visiems subjektams su  $b_1 = -0,53 \pm 0,09$  ir vidutiniu tiesinės regresijos modelio koreliacijos koeficientu 0,98. Kiekvieno subjekto koreliacijos koeficiento reikšmės yra pateiktos 16 pav.



**16 pav.** Koreliacijos koeficiento reikšmės, leidžiančios patvirtinti neigiamą sakadų greičio kitimo tendenciją

### 3.3. EMG grindžiamos teksto rašymo programos prototipas

#### 3.3.1. Vienakanalio žmogų tausojančios sąsajos modelio pritaikymas kuriant EMG grindžiamą teksto rašymo programą

EMG pagrindu sukurtos teksto rašymo sistemos projektas yra grindžiamas vienakanalio žmogų tausojančios sąsajos modeliu. Šiame modelyje yra 4 pagrindiniai komponentai: 1) sąveikos sluoksnis, 2) intelektualusis sluoksnis, 3) nuovargio vertinimo procedūra ir 4) valdymo sluoksnis. Įvesties kanalas ir grįžtamojo ryšio veikla priskiriami sąveikos sluoksniui. Įvesties kanalas nustato

įvesties būdą, taikomą sistemai valdyti. Grįžtamojo ryšio veikla apibrėžia sistemos reakciją į vartotojo patiriamą nuovargį.

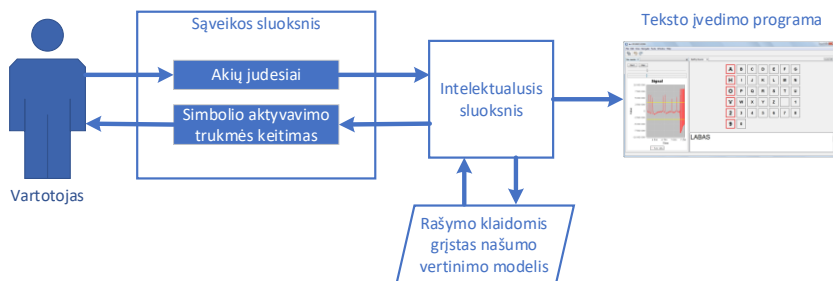
Vienakanalis žmogų tausojančios sąsajos modelis, skirtas EMG grindžiamai teksto rašymo programai, pavaizduotas 17 pav. Šio modelio sandara yra tokia:

1. Sąveikos sluoksnis. EMG pagrindu veikiančios teksto rašymo programos sąveikos sluoksnis apibrėžia įvesties kanalą, kuris šiuo atveju yra EMG signalas, ir grįžtamojo ryšio veiklą, kuri šiame kontekste yra žvilgsnio išlaikymo laiko korekcija. Apskritai sąveikos sluoksnis apibūdina abipusę komunikaciją tarp vartotojo ir sistemos ir užtikrina grįžtamąjį ryšį, atsižvelgdamas į nuovargį.

2. Intelektualusis sluoksnis. Šiame sluoksnyje agreguojami įvesties duomenys ir generuojamas atsakas į konkrečius duomenų šablonus. Šis sluoksnis taip pat yra tarpininkas tarp visų kitų sluoksnių. Intelektualusis sluoksnis yra atsakingas už: 1) EMG signalo pavertimą valdymo komandomis, 2) EMG signalo ir teksto rašymo programos valdymo parametrų transformavimą į nuovargio vertinimo procedūrai tinkamą formą, 3) sistemos adaptavimą konkrečiam vartotojui, kad būtų galima valdyti sistemą kuo ilgiau nepatiriant nuovargio.

3. Iš anksto nustatytas nuovargio modelis. Šis modelis paremtas slenkstine funkcija. Modelio parametras yra rašybos klaidų skaičius. Kai pasiekiamas tam tikras rašybos klaidų skaičius (nustatomas vartotojo), siunčiamas signalas, indikuojantis nuovargio padidėjimą.

4. Teksto rašymo programa. Tai programa, kuri leidžia rašyti tekstą naudojant kaktos raumenų įtempimus. Išsamus EMG pagrindu sukurtos teksto rašymo programos sąsajos aprašas pateikiamas kituose skyreliuose.



17 pav. Sistemos karkasas pagal vienakanalį žmogų tausojančios sąsajos modelį

### 3.3.2. Teksto rašymo programos, valdomos pasitelkus EMG, nuovargio modelis

Šis modelis yra grindžiamas simbolio aktyvavimo trukme. Simbolio aktyvavimo trukmė apibrėžia laiko tarpą, per kurį galima inicijuoti to simbolio užrašymo komandą. Kiekvienam vartotojui simbolio aktyvavimo trukmė yra

parenkama adaptyviai, atsižvelgiant į padaromas spausdinimo klaidas ir teisingai pasirinkamas raidės. Šis modelis yra apibrėžiamas taip:

$$t_{\text{dwell time}} = \begin{cases} t_0 + n_e t_e - n_s t_s, & t_{\text{dwell time}} > 0 \\ 0, & t_{\text{dwell time}} \leq 0 \end{cases}; \quad (8)$$

čia  $t_{\text{dwell time}}$  – esamas simbolio aktyvavimo laikas,  $t_0$  – pradinis simbolio aktyvavimo laikas,  $t_e$  – klaidos atveju pridedamas laikas,  $t_s$  – pasirinkimo momentu pridedamas laikas,  $n_e$  – klaidų skaičius,  $n_s$  – pasirinkimų skaičius. Laikoma, kad buvo padaryta rašybos klaida, kai simbolis arba žodis yra ištrinamas. Pasirinkimas užfiksuojamas, kai įvedama raidė.

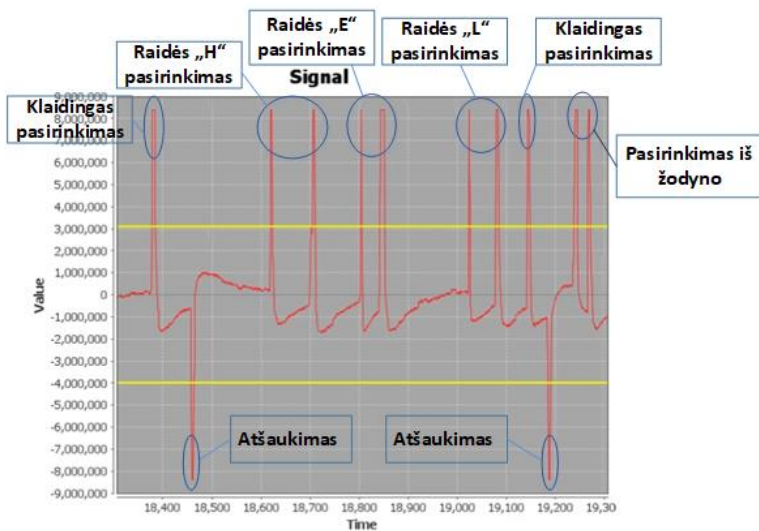
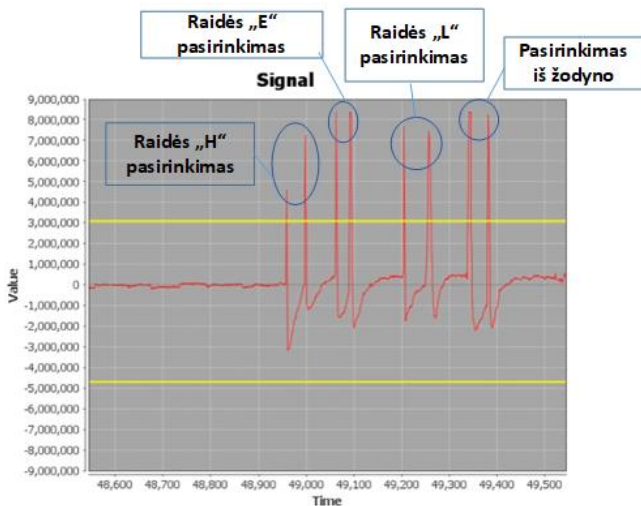
Klaidos atveju pridedamo laiko vertė yra didesnė nei pasirinkimo momentu pridedamo laiko:  $t_e > t_s$ . Vadinasi, rašybos klaida turi didesnę įtaką simbolio aktyvavimo laikui. Šis apribojimas padeda subalansuoti simbolio aktyvavimo laiko dinamiką ir išvengti pastovumo, kuris šiuo atveju yra nepageidaujamas, nes treniruočių efektas leidžia šį laiką mažinti.

### 3.3.3. Valdymas

Teksto rašymo programoje yra skiriamos dvejų tipų valdymo komandos: komanda „Pasirinkti“ ir komanda „Atšaukti“. Komanda „Pasirinkti“ (angl. „Select“) leidžia pasirinkti stulpelį ar tame stulpelyje esantį simbolį. Komanda „Atšaukti“ skirta išeiti iš pasirinkto stulpelio arba ištrinti pasirinktam simboliui. Šias valdymo komandas galima inicijuoti veido raumenų judesiais. Beveik kiekvienas mirksnis reiškia atitinkamą komandą (mirksnis kairiąja akimi – „pasirinkti“, mirksnis dešiniąja akimi – „atšaukti“). Naudotojas gali matyti EMG signalo grįžtamąjį ryšį EMG signalo peržiūros srityje (žr. 18 pav.). Konkreti valdymo komanda įvykdoma, kai EMG signalo amplitudė yra aukštesnė nei nustatytos slenkstinės reikšmės. Slenksčius žymi geltonos horizontalios linijos EMG signalo peržiūros srityje. Viršutinis slenkstis žymi komandą „Pasirinkti“, o apatinis – komandą „Atšaukti“. Slenksstinės reikšmės gali būti reguliuojamos naudojant slenksčio nustatymo slankiklius.

EMG signalo vaizdas įvedinėjant žodį „hello“ yra parodytas 18 pav. Viršuje esančiame paveikslėlyje žodis „hello“ yra užrašytas be klaidų. Apačioje matyti, kad įvedant žodį buvo padarytos dvi klaidos. Klaidoms ištaisyti turi būti pasirinkta komanda „Atšaukti“. Teigiami signalo šuoliai žymi komandą „Pasirinkti“, neigiami – komandą „Atšaukti“. Vienas bandymas (vieno simbolio pasirinkimas) turi du teigiamus signalų šuolius, pirmasis šuolis – stulpelio parinkimas, antrasis – raidės atitinkamame stulpelyje pasirinkimas.



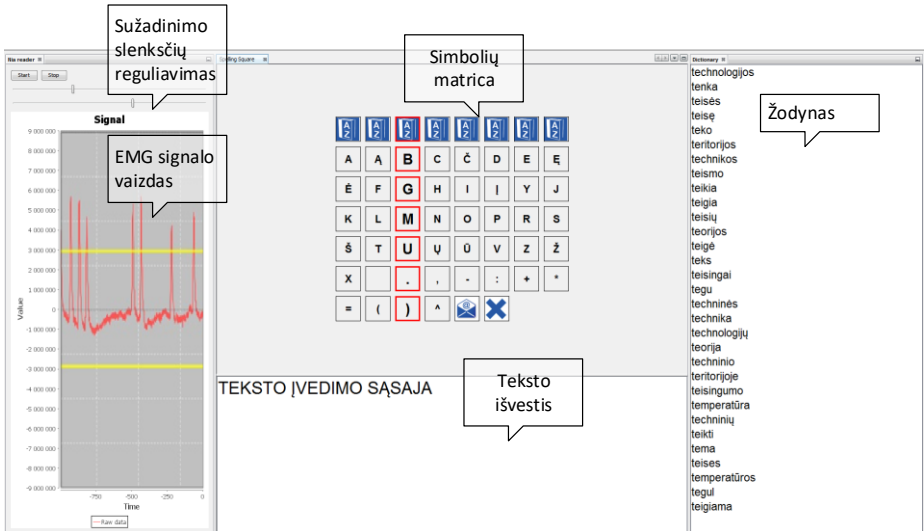


**18 pav.** Signalo vaizdas rašant žodį „hello“. Viršuje: nėra rašybos klaidų ir tik trys raidės („hel“) buvo pasirinktos iš simbolių matricos. Apačioje: buvo padarytos dvi rašybos klaidos, todėl po kiekvieno netinkamo pasirinkimo inicijuota komanda „Atšaukti“. Abiem atvejais žodis buvo užbaigtas pasirinkus jį iš žodyno

### 3.3.4. Tradicinė teksto rašymo programos sąsaja

Sukurta EMG grindžiama teksto įvedimo programa turi dvi skirtingas vartotojo sąsajas. Viena iš jų yra tradicinė matricos pagrindu veikianči tekstą rašymo programos sąsaja, vaizduojama 19 pav. Antroji – vizuali, konceptais paremta sąsaja, pateikta 20 pav. Svarbiausia abiejų sąsajų dalis yra simbolių matrica. Matrica yra pritaikoma taip, kad į ją būtų galima pridėti įvairių simbolių (tarp jų specialiųjų ar tautinių). Raudonos spalvos stulpelis parodo programos žymeklio padėtį. Žymeklis nuosekliai juda iš stulpelio į stulpelį, kol vartotojas aktyvuoja komandą „Pasirinkti“. Tada žymeklis juda per kiekvieną to stulpelio simbolių. Po kitos komandos „Pasirinkti“ yra parenkamas konkretus simbolis. Šis simbolis rodomas išvesties srityje (žr. 19 pav.). Žymeklis juda tempu, kuris svyruoja nuo 500 iki 1500 milisekundžių. Žingsnio (simbolio sužadavimo laiko) vertė priklauso nuo naudotojo padarytų klaidų skaičiaus. Mažesnis klaidų skaičius reiškia greitesnį žymeklio judėjimo greitį. Kiekvieną kartą, kai vartotojas įvykdo komandą „Atšaukti“, laikoma, kad įvyko klaida.

Pirmoje programos simbolių matricos eilutėje galima pasirinkti įeiti į žodyną. Kai įvesti keli simboliai arba žodžio kamienas, žodynas suteikia galimybę užbaigti tam tikrą žodį greičiau. Sistema įtraukia žodyno pasirinkimus, todėl dažniausiai vartojami žodžiai yra žodyno viršuje; taigi galima teigti, kad žodynas prisitaiko prie vartotojo.



19 pav. EMG grįstos teksto įvedimo programos tradicinė sąsaja

### 3.3.5. Vaizdinių konceptų pagrindu veikianti teksto įvedimo programos sąsaja

Buvo įdiegta visiškai kitokia EMG grįstos teksto įvedimo programos sąsaja. Tradicinėse teksto rašymo programose naudojamos įprastos įvairiai išdėstytos abėcėlės raidės. Šiuo atveju įdiegta vaizdinės koncepcijos sąsaja, pagrįsta grafiniais simboliais (grafemomis). Grafiniai simboliai leidžia naudoti alternatyvią komunikacijos formą, paremtą vaizdiniais elementais, o ne formalia rašytine (tekstine) kalba, kuria perteikiama prasmė ar idėja. Piktogramos arba ideogramos naudojamos perduodamoms sąvokoms žymėti. Piktogramos – tai paveikslukai, panašūs į tai, ką jie reiškia, ir žymintys koncepciją, objektą, veiklą, vietą ar įvykį. Ideograma – tai grafinis simbolis, žymintis idėją, o ne raidžių grupę, surašytą pagal sakininės kalbos fonemas ir gramatikos taisykles, kaip tai daroma tekstinėmis kalbomis.

Vaizdiniai simboliai yra kasdienio mūsų gyvenimo dalis, jie matomi kalbant apie transporto, vaistų ar kompiuterių sritis, nes glaustai ir lengvai suprantama forma nurodo vietas, kryptis, veiksmus ar suvaržymus realiame pasaulyje ar virtualiojoje erdvėje. Taigi vaizdiniai simboliai gali būti naudojami situacijose, kai tekstiniai pranešimai neįmanomi arba netinkami dėl konteksto ar į vartotojus nukreiptų ribojimų.

Nors tekstinės (raidėmis grindžiamos) kalbos yra tinkama priemonė visoms žmogaus bendravimo formoms išreikšti, reikia daug teksto užrašymo (įvedimo) pastangų, kad būtų užtikrinta žmogaus ir kompiuterio komunikacija, kuri konkrečioms vartotojų grupėms, pvz., vartotojams, turintiems motorinių sutrikimų, gali būti sunki našta. Vaizdiniais konceptais grindžiama sąsaja leidžia išreikšti aukšto lygio sąvokas naudojant žymėjimą, pritaiktą konkrečių vartotojų problemų rinkiniui. Tokie sąsaja galėtų būti pritaikyta konkrečiai sričiai ir būti grindžiama tik atitinkamomis šios srities sąvokomis ir ypatybėmis.

20 pav. pateiktas vaizdiniais konceptais grindžiamos sąsajos vaizdas. Vaizdiniais konceptais grindžiama sąsaja yra išreiškiama per hierarchinę struktūrą. Ją sudaro simbolių matricos, viena su kita sujungtos nuorodomis. Kiekviena nuoroda pateikiama kaip konkrečios srities piktograma. Šiame darbe panaudoti vaizdiniai simboliai iš 8 pagrindinių sąvokų sričių: emocijų, vietos, veiksmo, laiko, objektų, kūno dalių, asmenybės ir specialiųjų simbolių.

Dauguma darbe naudotų vaizdinių piktogramų yra adaptuotos iš „The Noun“ projekto ([thenounproject.com](http://thenounproject.com)), o kitos – pagal poreikį pritaikytos.

Kiekvieno domeno matrica, taip pat šakninė matrica gali būti lengvai išplėsta pridėdant naujų piktogramų (sąvokų) konkrečiai domeno matricai. Be to, kiekvienoje konkreta domeno piktogramoje (koncepcijoje) gali būti nuoroda į konkrečią subdomeno matricą. Taksonominis sąvokų matricų medis yra apibendrintas 21 pav.

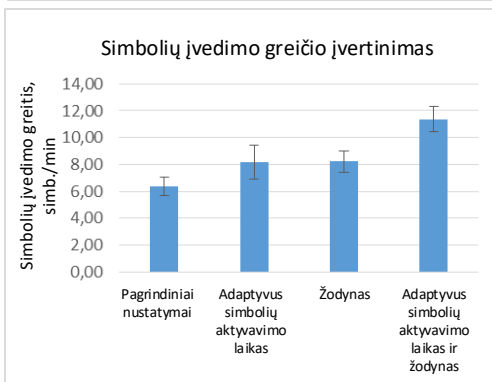
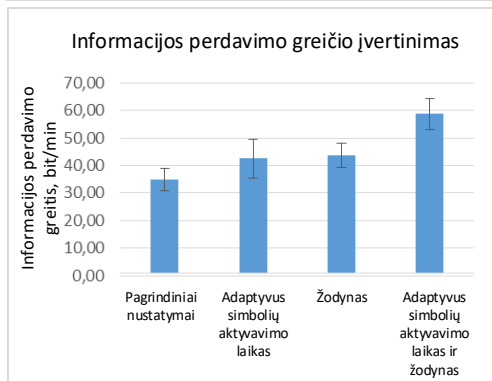
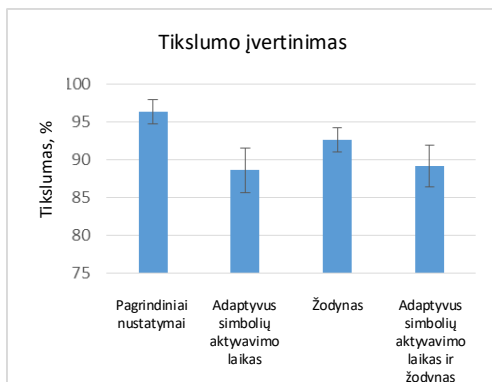


subjekto. Visi simboliai buvo 1,5×1,5 cm dydžio (0,86×0,86° vaizdo kampas), o visa teksto užrašymo programos matrica buvo 9,5×13 cm (5,44×7,42° vaizdo kampas). Stimulai buvo surikiuoti eilės tvarka iki intensyviausio.

Eksperto dalyviams buvo pateiktos trys pastraipos. Jie turėjo suvesti pasiūlytas teksto pastraipas naudodamiesi teksto rašymo programa. Visos teksto dalys buvo pateiktos lietuvių kalba. Pirmoji pastraipa buvo 126 simbolių ilgio, jos turinį galima apibrėžti kaip kasdienius pokalbius. Antroje pastraipoje buvo 111 simbolių, o turinys buvo mokslinio pobūdžio. Trečioji pastraipa buvo 120 simbolių, ją sudarė mokslinis turinys su matematinėmis lygtimis. Kiekvienas dalyvis kartojo eksperimentą keturis kartus. Apskaičiuotos vidutinės tikslumo, įvesties greičio ir informacijos perdavimo greičio vertės. Rezultatai pateikti 6 lentelėje.

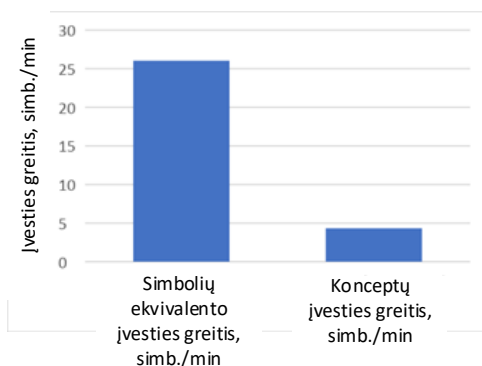
**6 lentelė.** Teksto rašymo programos įvertinimas

<b>Kiekybinė metrika</b>	<b>Vidurkis</b>	<b>Maksimali vertė</b>
<b>PAGRINDINIAI NUSTATYMAI</b>		
Tikslumas	96,29	98,25
Informacijos perdavimo greitis	34,78	41,83
Įvedimo greitis	6,37	7,57
<b>SU ADAPTYVIU SIMBOLIO AKTYVAVIMO LAIKU</b>		
Tikslumas	88,61	93,64
Informacijos perdavimo greitis	42,53	49,79
Įvedimo greitis	8,19	9,60
<b>SU ŽODYNU</b>		
Tikslumas	92,65	96,06
Informacijos perdavimo greitis	43,55	49,26
Įvedimo greitis	8,22	9,35
<b>SU ADAPTYVIU SIMBOLIO AKTYVAVIMO LAIKU IR ŽODYNU</b>		
Tikslumas	89,16	92,53
Informacijos perdavimo greitis	58,69	65,53
Įvedimo greitis	11,35	12,42



22 pav. Tikslumo, informacijos perdavimo greičio ir įvedimo greičio grafikai

Eksperimentas su vaizdiniais konceptais grindžiama sąsaja buvo atliktas tomis pačiomis sąlygomis kaip ir su tekstine informacija grindžiama sąsaja. Dalyviai turėjo įvesti vieną teksto dalį (196 simboliai), kurios turinys buvo kasdienės pokalbių temos. Šioje pastraipoje buvo pateiktos teksto formuluotės, kuriose kalbama apie pagrindinius vartotojo poreikius. Eksperimentas buvo atliktas su 2 asmenimis (abu vyrai, 24 ir 28 metų amžiaus). Buvo matuojama eksperimento užduoties vykdymo trukmė ir apskaičiuotas įvesties greitis (žr. 23 pav.).



**23 pav.** Konceptais grįstos teksto užrašymo programos įvesties greitis

23 pav. pateiktos dvi įvesties greičio metrikos: koncepto įvesties greitis (validžių konceptų, įvestų per laiko vienetą, skaičius) ir tekstinės kalbos raidžių įvesties greitis, kuriuo perduodamas tas pats pranešimas. Rezultatai rodo, kad vaizdiniais konceptais grindžiama sąsaja gali padidinti įvesties greitį iki 26,03 simbolio per minutę (atitinka 4,31 koncepto per minutę), palyginti su tradicine tekstine informacija grindžiama sąsaja (11,35 simbolio per minutę).

## IŠVADOS

1. Psichologinis ir fizinis nuovargis yra veiksnys, lemiantis valdymo gebėjimų fiziologinės kompiuterijos sistemose silpnėjimą. Nepaisant nuovargio faktoriaus reikšmės, FKS srityje įprasti valdymo nuovargio tyrimai atliekami tik fragmentiškai ir trūksta platesnio požiūrio į nuovargio problemą. Kita vertus, sporto treniruočių srityje nuovargio tyrimai yra labai reikšmingi ir toli pažengę. Kadangi ir sporto treniruotėse, ir FKS nuovargio prigimtis yra panaši, galima daryti prielaidą, kad sporto srities nuovargio tyrimo metodai gali būti taikomi ir FKS srityje.
2. Pasiūlytas žmogų tausojančios sąsajos modelis apibrėžia žmogaus ir FKS sąveiką iš nuovargio perspektyvos. Siūlomi du modelio variantai: vienakanalis žmogų tausojantis modelis ir multimodalinis žmogų

tausojantis modelis. Pagrindinė naujovė yra nuovargio vertinimo procedūra, kuri sąveikauja su standartiniais FKS vartotojo sąsajos elementais ir leidžia aprašyti, kaip sistema turėtų reaguoti į našumo (veikimo) praradimą, kurį parodo padidėjęs vartotojo nuovargis. Žmogų tausojančių modelių pritaikomumas pademonstruotas trijose skirtingose sistemose: 1) teksto rašymo žvilgsniu sistemoje (žr. 4.1 poskyrį), 2) akimis valdomame žaidime (žr. 4.2 poskyrį) ir 3) EMG signalais grindžiamoje teksto rašymo programoje (žr. 4.3 poskyrį).

3. Analitinis Banisterio ir kt. našumo modelis yra tinkamas treniravimosi ir nuovargio efektams žvilgsnio sekimo pagrindu valdomoje teksto įvedimo programoje aprašyti (žr. 4.1 poskyrį). Modelio validumui užtikrinti buvo vertinamas žvilgsnio pozicijos tikslumas atliekant teksto įvedimo užduotį su 7 subjektais. Analizės rezultatai buvo interpoliuojami pagal Banisterio ir kt. modelį. Pats tiksliausias modelis pasiekė gerus tinkamumo rezultatus ( $R2 = 0,9027$ ,  $RMSE = 0,0098$ ,  $SSE = 0,0005$ ), tačiau skirtingų vartotojų valdymo tikslumo svyravimai buvo reikšmingi dėl individualaus treniravimosi ir nuovargio poveikio. Dėl šios priežasties negalima apibendrinti modelio. Pagrindinių komponentų analizė parodė, kad modelio kintamumas gali būti paaiškinamas dviem faktoriais: nuovargio (73 proc. dispersijos) ir treniravimosi (17 proc. dispersijos). Kadangi treniravimosi tempas yra lėtesnis nei nuovargio, vadinasi, treniravimosi poveikis rezultatams yra gerokai mažesnis. Valdymo kokybės pikas pasireiškia pačioje eksperimento pradžioje, o toliau krinta, iki kol pradeda vėl augti. Banisterio modelis leidžia apskaičiuoti laiką, per kurį bus pasiektas pradinis valdymo tikslumas. Šis laikas turėtų būti laikomas poilsio laiku. Eksperimento metu apskaičiuotas vidutinis poilsio laikas siekia  $308 \pm 244$  s ( $5 \pm 4$  min). Didelis standartinis nuokrypis rodo didelę individualių veiksmų įtaką, todėl modelio parametrai kiekvienam subjektui turėtų būti apskaičiuojami individualiai.
4. Analitinis našumo modelis, grindžiamas slopstančiais harmoniniais svyravimais, yra tinkamas valdymo tikslumo kintamumui žvilgsniu valdomame žaidime aprašyti. Slopstančio harmoninio svyravimo modelio pritaikymo validumas buvo išbandytas pritaikius lyginių ir nelyginių reikšmių testą. Testas parodė stiprią teigiamą koreliaciją ( $0,82 \pm 0,08$ ). Individualios tiriamųjų savybės, nustatytos pritaikius slopstančio harmoninio svyravimo modelį, gali būti naudojamos žaidėjams kategorizuoti pagal jų žaidimo valdymo dinamiką. Pirminiai eksperimento rezultatai rodo, kad žaidėjai, kurių slopinimo koeficientas yra neigiamas, gali būti priskirti prie besimokančiųjų, o pasižymintys teigiamu slopinimo koeficientu – prie nuilstančiųjų. Pastebima stipri ( $r = 0,82$ ) teigiama koreliacija tarp amplitudės ir slopinimo faktoriaus, kuri rodo, kad



sėkmingai startavę žaidėjai paprastai pasižymi aukštesniais nuovargio rodikliais, o lėčiau startavę patiria mažiau nuovargio ir po kurio laiko netgi pagerina žaidimo našumą. Sakadų greičio ir krypties analizė rodo, kad ilgalaikis sakadų greitis ir žvilgsnio judesio tikslumas žaidimo metu dėl patiriamo akių nuovargio yra linkę mažėti – kiekvieno subjekto atveju tiesinės regresijos modeliai rodo neigiamas tendencijas (vidutinis koreliacijos koeficientas lygus 0,98).

5. EMG pagrindu veikiančiai teksto įvedimo programai buvo pritaikytas vienakanalis žmogų tausojančios sąsajos modelis. N vertinimo procedūra paremta klaidų kiekio slenkstine funkcija ir simbolio aktyvavimo laiko adaptavimu. Papildomai taikomas automatinis žodynas. Abi šios sistemos savybės padidino sistemos informacijos perdavimo greitį nuo 34,78 iki 58,69 bit/min. Simbolių įvedimo greitis padidėjo nuo 6,37 iki 11,35 simbolių per minutę, tačiau sumažėjo simbolių išrinkimo tikslumas (nuo 96,29 iki 89,16 proc.). Tai rodo, kad nuovargio vertinimo procedūra ir automatinis žodynas leidžia tekstą įvesti greičiau, tačiau taip pat padidina įvedimo klaidų skaičių. Vis dėlto didesnė sistemos valdymo sparta leidžia atsiradusias klaidas ištaisyti greičiau – tai indikuoja simbolių įvedimo greičio padidėjimas. Šis parametras skaičiuojamas tik teisingai įvedus simbolius.

## LITERATŪRA

- [Ahn ir kt., 2014] Ahn, M., Lee, M., Choi, J., & Jun, S. (2014). A review of brain-computer interface games and an opinion survey from researchers, developers and users. *Sensors*, 14(8), 14601–14633.
- [Antunes ir Santana, 2018] Antunes, J., & Santana, P. (2018). A study on the use of eye tracking to adapt gameplay and procedural content generation in first-person shooter games. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 23.
- [Banister ir kt., 1975] Banister, E. W., Calvert, T. W., Savage, M. V., & Bach, T. (1975). A systems model of training for athletic performance. *Aust J Sports Med*, 7(3), 57–61.
- [Brunyé ir kt., 2009] Brunyé, T. T., Mahoney, C.R., Augustyn, J.S., Taylor, H.A. (2009). Horizontal saccadic eye movements enhance the retrieval of landmark shape and location information. *Brain and Cognition* 70: 279–288. doi:10.1016/j.bandc.2009.03.003
- [Busso ir kt., 2002] Busso, T., Benoit, H., Bonnefoy, R., Feasson, L., Lacour, J. R. (2002). Effects of training frequency on the dynamics of performance response to a single training bout. *Journal of Applied Physiology*, 92, 572–580.
- [Calvert ir kt., 1976] Calvert, T. W., Banister, E. W., Savage, M. V. et al. (1976). A systems model of the effects of training on physical performance. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 6 (2), pp. 94–102, 1976.
- [Castellini ir van der Smagt, 2009] Castellini, C., & van der Smagt, P. (2009). Surface EMG in advanced hand prosthetics. *Biological cybernetics*, 100(1), 35–47.
- [Cipriani ir kt., 2008] Cipriani, C., Zaccone, F., Micera, S., & Carrozza, M. C. (2008). On the shared control of an EMG-controlled prosthetic hand: analysis of user–prosthesis interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 170–184.
- [Damasevicius ir kt., 2014] Damasevicius, R., Martisius, I., Jusas, V., & Birvinskas, D. (2014). Fractional delay time embedding of EEG signals into high dimensional phase space. *Electronics and Electrical Engineering* 20(8), 55–58. doi:10.5755/j01.eee.20.8.8441
- [Damasevicius ir kt., 2015] Damasevicius, R., Vasiljevas, M., Martisius, I., Jusas, V., Birvinskas, D., & Wozniak, M. (2015). BoostEMD: an extension of EMD method and its application for denoising of EMG signals. *Elektronika ir elektrotechnika*, 21(6), 57–61.

- [Danevičius ir kt., 2018] Danevičius, E., Maskeliunas, R., Damaševičius, R., Połap, D., & Woźniak, M. (2018). A soft body physics simulator with computational offloading to the cloud. *Information* (Switzerland), 9(12). doi:10.3390/info9120318
- [Fitz-Clarke ir kt., 1991] Fitz-Clarke, J. R., Morton, R. H., & Banister, E. W. (1991). Optimizing athletic performance by influence curves. *Journal of Applied Physiology*, 71(3), 1151–1158.
- [Fronius ir kt., 2006] Fronius, M., Cirina, L., Kuhli, C., Cordey, A., & Ohrloff, C. (2006). Training the adult amblyopic eye with “perceptual learning” after vision loss in the non-amblyopic eye. *Strabismus*, 14(2), 75–79.
- [Ghassemi ir kt., 2019] Ghassemi, M., Triandafilou, K., Barry, A., Stoykov, M. E., Roth, E., Mussa-Ivaldi, F. A., ... & Ranganathan, R. (2019). Development of an EMG-controlled Serious Game for Rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 27(2), 283–292.
- [Hellard ir kt., 2006] Hellard, P., Avalos, M., Lacoste, L., Barale, F., Chatard, J. C., & Millet, G. P. (2006). Assessing the limitations of the Banister model in monitoring training. *Journal of sports sciences*, 24(05), 509–520.
- [Karran, 2014] Karran, A. J. (2014). Exploring the Biocybernetic loop: Classifying Psychophysiological Responses to Cultural Artefacts using Physiological Computing (Doctoral dissertation, Liverpool John Moores University).
- [Lee ir kt., 2015] Lee, S. M., Kim, S. D., Jang, J. H., Lee, S. M., & Lee, S. E. (2015, November). Design of an EMG signal recognition system for human-smartphone interface. In *2015 International SoC Design Conference (ISOCC)* (pp. 337–338). IEEE.
- [MacKenzie ir Soukoreff, 2003] MacKenzie, I. S., & Soukoreff, R. W. (2003, April). Phrase sets for evaluating text entry techniques. In *CHI'03 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 754–755). ACM.
- [Maskeliunas ir kt., 2016] Maskeliunas, R., Damaševičius, R., Martišius, I., & Vasiljevas, M. (2016). Consumer-grade EEG devices: are they usable for control tasks? *PeerJ*, 4, e1746.
- [Morton ir kt., 1990] Morton, R. H., Fitz-Clarke, J. R., & Banister, E. W. (1990). Modeling human performance in running. *Journal of applied physiology*, 69(3), 1171–1177.

[Muñoz ir kt., 2017] Muñoz, J. E., Gouveia, E. R., Cameirao, M., Bermudez, I., & Badia, S. (2017). The biocybernetic loop engine: an integrated tool for creating physiologically adaptive videogames. In *4th International Conference in Physiological Computing Systems*.

[Pageaux ir Lepers, 2016] Pageaux, B., & Lepers, R. (2016). Fatigue induced by physical and mental exertion increases perception of effort and impairs subsequent endurance performance. *Frontiers in physiology*, 7, 587.

[Serbedzija ir Fairclough, 2009] Serbedzija, N. B., & Fairclough, S. H. (2009, May). Biocybernetic loop: From awareness to evolution. In *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 2063–2069). IEEE.

[Shneiderman ir kt., 2016] Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. (2016). Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction. *Pearson*.

[Špakov ir Majaranta, 2009] Špakov, O., & Majaranta, P. (2009). Scrollable Keyboards for Casual Eye Typing. *PsychNology Journal*, 7(2).

[Wouters ir kt., 2013] Wouters, P., van Nimwegen, C., van Oostendorp, H., & van Der Spek, E. D. (2013). A meta-analysis of the cognitive and motivational effects of serious games. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 249–265. doi:10.1037/a0031311

## **INFORMACIJA APIE AUTORIŲ**

### **Asmeninė informacija**

Mindaugas Vasiljevas

Gimimo vieta: Pagėgiai, Lietuva

Gimimo data: 1988 m. rugsėjo 27 d.

El. pašto adresas mindaugas.vasiljevas@ktu.lt

### **Institucija**

Kauno technologijos universitetas

Informatikos fakultetas

Programų inžinerijos katedra

Studentų g. 50-101A, LT-51368, Kaunas, Lietuva

### **Išsilavinimas**

2013–2018	Informatikos inžinerijos krypties doktorantūros studijos Kauno technologijos universiteto Informatikos fakulteto Programų inžinerijos katedroje. Kaunas, Lietuva
-----------	--

2011–2013	Įgytas programų sistemų inžinerijos magistro laipsnis Kauno technologijos universiteto Informatikos fakulteto Programų inžinerijos katedroje. Kaunas, Lietuva
2007–2011	Įgytas informatikos inžinerijos bakalauro laipsnis Kauno technologijos universiteto Informatikos fakulteto Kompiuterių katedroje. Kaunas, Lietuva.

### **Darbo patirtis**

2013–2016	KTU Informatikos fakulteto Programų inžinerijos katedros asistentas. Dėstomi moduliai: objektinis programavimas, duomenų struktūros, robotų programavimo technologijos. Vadovavimas KTU olimpiadinio programavimo komandai.
2016–dabar	KTU Informatikos fakulteto Programų inžinerijos katedros lektorius. Dėstomi moduliai: objektinis programavimas, lygiagretusis programavimas, žmogaus ir kompiuterio sąsajos projektavimas, robotų programavimo technologijos. Vadovavimas KTU olimpiadinio programavimo komandai.
2018–dabar	IT įmonės „ICYBIT“ projektų vadovas. Veiklos: vadovavimas programuotojų komandai, darbų planavimas, sistemų projektavimas ir programavimas.

## ABSTRACT

### Relevance of the work

Human-computer interface (HCI) based on physiological interaction, also known as physiological computing, is a very important research area in computer science. This type of interface goes beyond the typical human-computer interaction. Physiological interfaces incorporate human body characteristics into their functionality. Physiological characteristics of the human body could be determined as any quantitative data of physiological nature that are recorded from the human. The concept of physiological interaction or physiological computing systems (PCS) encompasses such well-known paradigms as brain-computer interface (BCI), neural computer interface (NCI), gaze tracking interface etc.

The initial focus of the PCS-based interfaces was on people with disabilities, since their condition often requires an alternative mode of communication. Recently, we can observe an increasing number of applications that primary focus on healthy users. BCI games and entertainment application, for instance, are expected to constitute a large market of potential users (both healthy and disabled) [Ahn et al., 2014]. Although eye tracking has been known as a useful research utility, recent studies reveal that eye tracking provides a more challenging and immersive experience to the PC game players [Antunes and Santana, 2018]. EMG-based interfaces were mostly applied to control of prosthetics [Castellini and van der Smagt, 2009, Cipriani et al., 2008], but nowadays we can find applications of EMG-based interfaces for smartphones [Lee et al., 2015] and serious games [Ghassemi et al., 2019].

One of the main reasons why PCS-based interfaces are more often used in entertainment applications is the growing number of consumer-grade electronic devices for physiological signal scanning. For a long time, systems were bulky, expensive and laboratory-oriented. Recently more consumer-affordable devices based on physiological computing and eye tracking emerged in the market (e.g. Tobii eye trackers for gaze tracking, Emotiv EPOC+ for BCI applications, MYO gesture control armband for electromyography (EMG)-based control). The gaze tracking systems have become more user-friendly and significantly cheaper. However, in many cases higher affordability has been achieved at the expense of accuracy [Maskeliunas et al., 2016].

The control of interfaces based on PCS is rather a demanding task since a user has to carry out often unnatural activity, which results in high cognitive and physical load. The performance of a user controlling this kind of interface varies due training, emerging fatigue or change in mental state. Mental and physical fatigue have negative impact to performance, while training affects user performance positively.

Fatigue is described as extreme tiredness resulting from mental or physical exertion or illness [Pageaux and Lepers, 2016]. It is common for almost every human physical activity. While controlling a personal computer (PC) in conventional ways, a user experiences fatigue after a relatively long period of time. Fatigue while controlling PC or any other digital device using human – machine interface based on physiological computing usually emerges much faster. Fatigue effects in the EMG-based interfaces are usually concerned with tension of specific muscles, which are responsible for muscle control. Users of the eye-tracking-based human – machine interfaces are usually affected by fatigue which eye muscle tension or even tiredness related with continuous looking at a PC screen and low blinking rate cause. In the field of BCI a user encounters mental fatigue because control of BCI applications requires significant mental concentration. User fatigue results in the decrease of performance and accuracy of system control, so that a user is able to perform high quality control just for a relatively short period of time (measured in minutes or hours. To expand time period of high-quality control in human – machine interface, intelligent user interfaces (UI's) are developed or, if possible, multimodal interfaces are applied.

The training effect opposes the fatigue effect. Therefore, the period of high-quality control might be expanded by performing consistent training. Concepts of fatigue and training are common for physiology research. The analytical models of sport athlete's performance, which encompass the muscular fatigue and training components, have been proposed by Banister and other researchers [Banister et al., 1975, Calvert et al., 1976, Morton et al., 1990, Busso et al., 2002] in the eighties of the twentieth century and elaborated later. Nowadays this research has not lost their relevance. Moreover, they can be applied in new research areas, such as physiological computing, multimodal interface, BCI and NCI.

### **Object of the work**

The object of this work is an intelligent model of user performance-aware HCI.

### **Aim of the work**

To enable the monitoring, analysis and increase of performance of users working with physiological computing-based user interfaces by proposing the concept and model of the adaptive human-oriented HCI.

### **Tasks of the work**

For the aim of the thesis to be achieved, the following objectives have been set out:

1. Perform the analysis of the existing HCI models related to physiological computing.

2. Carry out the analysis of the existing human performance models.
3. Develop an extension to the existing physiological models to allow for the development of an adaptive user performance-aware interfaces.
4. Adapt the performance models for EMG-based HCI and gaze tracking-based HCI.

## **Scientific novelty**

In this work the following novel results are presented:

1. The extension of the biocybernetic loop concept, called human-assistive HCI model, has been proposed. The model has two variants: human-assistive single channel model (HASCM) and human-assistive multimodal model (HAMM). HASCM is applied to the users who can use only one input modality. HAMM is applied to users who can use more than one input modality. The novelty of the proposed model lies in two aspects: (i) the aforementioned model is derived from the concept of the biocybernetic loop, but it is more specific in the sense that it provides practical framework for user interface design, (II) the proposed model incorporates the performance evaluation in the human-computer communication process.
2. The analytical model of athlete performance proposed by Banister et al. [Banister et al., 1975] was adapted to PCS research area. Based on this analytical model and experimental results, the analytical performance model for a speller based on eye tracking, has been derived. The derived model of eye tracking performance could be applied to develop human-assistive interface systems.
3. The analytical DHO model, applied to evaluate performance of sport's athletes, was adapted to evaluate the performance of users in the context of PC game based on eye tracking. This model is suitable for long-term analysis of performance dynamics. Findings show that this model well describes long-term fatigue and training effects and short-term recovery of user performing abilities.
4. To denoise and smooth the raw performance data of a PC game based on gaze tracking, a signal decomposition method, called BoostEMD [Damasevicius et al., 2015] has been developed. BoostEMD is an extension of a widely known Empirical Mode Decomposition (EMD) method, which is used to decompose time series representing a physiological signal into constituent mono-component signals, also known as Intrinsic Mode Functions (IMFs). In BoostEMD approach, the



initial IMFs are further decomposed in lower order IMFs applying the principles of the EMD method and some additional signal transformation, called boosting [Damasevicius et al., 2015].

## **Practical value**

Human-assistive HCI model provides a framework for the development of human – machine interfaces based on physiological computing. Using human-assistive HCI model, user interfaces based on the performance characteristics of physiological interaction can be designed. The aim of this model is to enhance time period of continuous accurate control of the human – machine interface based on physiological computing.

Typically, one of the biggest application areas of user interfaces, based on various physiological signals, is the systems for disabled. In general, such assistive technologies can be applied everywhere (both at work and home) in our everyday life to increase the quality of our life, sustain work productivity as well as for entertainment. Using such a system user starts feeling fatigue relatively fast, therefore, performance of the system control decreases as well. The performance of a user depends on individual characteristics. The proposed human-assistive HCI model aims to adapt the interface to individual user needs and abilities and helps to prolong the time of effective usage of a certain interface. Moreover, some specific performance evaluation methods, suitable for interfaces based on eye tracking and EMG recording, have been adapted from other domains.

## **Thesis statements**

1. The proposed Human-assistive HCI model could be applied to develop human – machine interfaces based on physiological signal control.
2. Empirically determined analytical performance model developed by Banister et al. fits well user performance data obtained by using virtual keyboard interface based on eye tracking.
3. Empirically determined analytical DHO performance model fits well user performance data obtained by applying a PC game based on eye tracking.
4. The proposed BoostEMD signal decomposition method can smooth the raw performance data of the PC game based on gaze tracking better than other analyzed smoothing methods (moving average, Savitzky-Golay and median filters).

## **Scientific approval**

The experimental results were presented and discussed in 4 international scientific conferences:

1. XV International Conference on Human Computer Interaction, Interacción 2014, Tenerife, Spain.

2. 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2014, Warsaw, Poland.
3. The 19<sup>th</sup> International Conference ELECTRONICS 2015, Palanga, Lithuania.
4. 12th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, ICCP 2016, Cluj-Napoca, Romania.

## **LIST OF PUBLICATIONS OF MINDAUGAS VASILJEVAS ON DISSERTATION TOPICS**

### **Articles in Journals refereed in Web of Science**

1. Maskeliūnas, Rytis; Damaševičius, Robertas; Martišius, Ignas; **Vasiljevas, Mindaugas**. Consumer grade EEG devices: are they usable for control tasks? // PeerJ. London: PeerJ Inc. ISSN 2167-8359. 2016, vol. 4, article e1746, p. 1-27. DOI: 10.7717/peerj.1746.
2. Damaševičius, Robertas; **Vasiljevas, Mindaugas**; Martišius, Ignas; Jusas, Vacius; Birvinskas, Darius; Wozniak, Marcin. BoostEMD: an extension of EMD method and its application for denoising of EMG signals // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and electrical engineering. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. eISSN 2029-5731. 2015, vol. 21, iss. 6, p. 57-61. DOI: 10.5755/j01.eie.21.6.13763.

### **Articles in Journals without impact factor refereed in Web of Science**

3. Damaševičius, Robertas; **Vasiljevas, Mindaugas**; Šumskas, Tomas. Development of a concept-based EMG-based speller // DYNA. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. ISSN 0012-7353. 2015, vol. 82(193), p. 170-179. DOI: 10.15446/dyna.v82n193.53493.

**Also, 7 articles refereed in other databases.**

### **General Conclusion**

1. Mental and physical fatigue is the major factor of performing abilities decrease in physiological computing systems (PCS). Despite the significance of the fatigue factor, previous research in PCS domain are conducted only in a fragmented manner and lack a complex approach to the fatigue problem. On the other hand, fatigue research in sports training domain is of high interest and far advanced. Since the nature of fatigue in both sports training and PCS is similar, the approaches of the fatigue estimation and prediction known in sports domain could be adopted in PCS.

2. The proposed Human-assistive HCI model describes the interaction between a human and PCS from the user performance perspective. Two variants of the model are proposed: Human-assistive single-channel HCI model (HASCM) and Human-assistive multimodal HCI model (HAMM). The main novelty is the performance evaluation procedure, which interacts with the standard UI components of the PCS and describes how the system should react to loss of productivity (performance). The applicability of the Human-assistive HCI models has been demonstrated by the design of 3 different applications: (1) gaze spelling system, (2) eye-controlled game and (3) EMG-based speller.
3. Analytical user performance model developed by Banister et al. is applicable for evaluation of training and fatigue effects in using the gaze tracking-based spelling system. To validate the model, the accuracy of gaze landing in performing text entry task has been analyzed for 7 subjects. The analysis results have been fitted to Banister et al. model. The most accurate model reached good fitness results ( $R^2=0.9027$ ,  $RMSE = 0.0098$ ,  $SSE=0.0005$ ), however, the variability between user performance is significant and is larger than intra-user variability due to learning and fatigue effects. PCA analysis shows that intra-user variability can be explained by two factors: fatigue (73% of variance) and learning (17% of variance). Since the learning acts slower than fatigue and has less effect on the results, time-to-peak value is smaller than time-to-initial performance. Therefore, it is advised to use time-to-initial performance as an estimate of rest time.
4. An analytical user performance model based on damped harmonic oscillation (DHO) is suitable to describe variability in performance of a PC game based on gaze tracking. The validity of the DHO model fitting has been tested using odd-even analysis, which has shown strong positive correlation ( $0.82\pm 0.08$ ). Individual characteristics of subjects established via the damped oscillation model could be used for categorization of players under their playing skills and abilities. As initial experiment results show players can be categorized as learners, whose damping factor is negative, and fatiguers, whose damping factor is positive. A strong  $r = 0.82$  positive correlation between amplitude and damping factor is observed, which indicates that good starters usually have faster fatigue rates, whereas slow starters have less fatigue and even improve their game performance during the play. A temporal and directional analysis of saccade velocity indicates that in the long-term saccade

velocity and gaze movement accuracy tend to reduce during the game due to eye fatigue, since linear regression models demonstrate negative trends for each subject with mean correlation of 0.98.

5. The extension of the EMD method called BoostEMD has been used to pre-process data of the PC game based on gaze tracking. BoostEMD method helps to smooth the signal and reduce the impact of outliers, which complicate model fitting procedure. This method has been compared with other popular smoothing methods (moving mean, median and Savitzky-Golay filters) using time series smoothness characteristics. Nemenyi test has been performed to rank the smoothing results. 5 out of 6 tests rank BoostEMD as the best one. BoostEMD more than twice outperforms nearest competitors in terms of path length and cumulative square jerk, which are important smoothness indicators.
6. The developed EMG-based speller adapts HASCM model. The pre-set performance evaluation procedure based on dwell time adaptation together with a dictionary has been introduced. Those system features have increased bit rate (from 34.78 to 58.69 bit/min) and input speed (from 6.37 to 11.35 CPM), at the same time dropping the accuracy (from 96.29 % to 89.16 %). It indicates that dwell time adaptation and dictionary enable the user to enter the text faster, but also increase the number of mistakes. However, the ability to control the system faster also helps user to correct mistakes faster, since input speed is calculated only for correctly-entered symbolsUDK 004.5:612.014.3(043.3)

SL344. 2019-06-17, 3.25 leidyb. apsk. 1. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas  
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas