

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mindaugas LUNECKAS

ŠEŠIAKOJO ROBOTO JUDĖJIMO ENERGETINIO EFEKTYVUMO TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2018

Disertacija rengta 2014–2018 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Dainius UDRIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

prof. dr. Stjepan BOGDAN (Zagrebo universitetas, Kroatija, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Artūras SERACKIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Rimvydas SIMUTIS (Kauno technologijos universitetas, informatikos inžinerija – 07T),

doc. dr. Voitech STANKEVIČ (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fizika – 02P).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2018 m. gegužės 18 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto Senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2018 m. balandžio 17 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva) bei Lietuvos mokslų akademijos Vrublevskių bibliotekoje (Žygimantų g. 1, LT-01102).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2018-015-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-103-4

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2018

© Mindaugas Luneckas, 2018

mindaugas.luneckas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Mindaugas LUNECKAS

INVESTIGATION OF ENERGY EFFICIENCY OF HEXAPOD ROBOT LOCOMOTION

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2018

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2014–2018.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Dainius UDRIS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Algirdas BAŠKYS (Vilniaus Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Prof. Dr Stjepan BOGDAN (University of Zagreb, Croatia, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof. Dr Artūras SERACKIS (Vilniaus Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof. Dr Habil. Rimvydas SIMUTIS (Kaunas University of Technology, Informatics Engineering – 07T),

Assoc. Prof. Dr Voitech STANKEVIČ (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physics – 02P).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 a. m. on 18 May 2018**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 17 April 2018.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania) and the Wroblewski Library of the Lithuanian Academy of Sciences (Žygimantų st. 1, LT-01102).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos vaikščiojančių robotų energijos sąnaudų problemos jiems judant lygiu ir nelygiu paviršiumi. Pagrindinis tyrimo objektas yra vaikščiojančio roboto valdymo, aplinkos atpažinimo bei kliūčių išvengimo žinomoje aplinkoje metodas. Energijos sąnaudų minimizavimas leistų praplėsti vaikščiojančių robotų pritaikymą ir veikimo laiką. Pagrindinis darbo tikslas – sukurti energijos sąnaudų minimizavimo metodus vaikščiojantiems robotams ir sukurti aplinkos atpažinimo ir klasifikavimo metodus bei ištirti šešiakojo roboto energijos sąnaudas jiems judant žinomoje aplinkoje. Šie metodai gali būti taikomi vaikščiojantiems daugiakojams robotams.

Darbe sprendžiami šie uždaviniai: šešiakojo roboto eisenos parinkimas atsižvelgiant į energijos sąnaudas, paviršiaus kliūčių aptikimo ir perlipimo metodų sudarymas ir jų efektyvumo palyginimas. Taip pat sprendžiami uždaviniai, kurie siejasi su pėdų trajektorijos generavimo metodo kūrimu bei kliūčių dydžio ir tankio įtaka roboto energijos sąnaudoms.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikta mobiliųjų robotų energetinio efektyvumo bei energijos sąnaudų matavimo, skaičiavimo ir optimizavimo metodų analizė.

Antrajame skyriuje pateiktas energetiškai efektyvaus judėjimo metodikos sudarymas vaikščiojantiems robotams. Šiame skyriuje pateiktas šešiakojo roboto matematinio ir fizinio modelių sudarymas, nelygaus paviršiaus klasifikavimo modelio sudarymas bei taktilinio kliūčių aptikimo bei perlipimo metodų sudarymas. Skyriaus gale pateikiamos išvados.

Trečiajame skyriuje tiriamos energijos sąnaudų priklausomybės nuo roboto eisenos bei judėjimo parametrų, kliūčių aptikimo ir perlipimo tikslumas priklausomai nuo kliūčių skaičiaus roboto kelyje, taip pat kliūčių dydžio ir tankio įtaka roboto energijos sąnaudoms.

Disertacijos tema paskelbti 9 straipsniai: keturi – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį, trys – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazės „Conference Proceedings“ leidiniuose ir du – kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose. Disertacijos tema perskaityti 7 pranešimai konferencijose Lietuvoje bei kitose šalyse.

Abstract

In this dissertation the issues of walking robots' energetic efficiency while walking on even and irregular terrain using gait switching and tactile obstacle avoidance methods are investigated. The main object of research is methods for walking robot's locomotion, environment recognition, and obstacle avoidance. The importance of walking robots is their ability to overcome irregular terrain and adaptation to environment. The minimization of energy consumption would improve the use of walking robots and extend their working time. The primary purpose of this dissertation is to develop and investigate environment recognition and classification methods, energetically efficient locomotion method for walking robots. Walking multilegged robots is a field for applying created methods. The dissertation also focuses on investigating energy consumption dependence on obstacle size and density.

The thesis approaches a few major tasks such as gait selection, obstacle detection and avoidance using tactile leg sensors. Second task is related to development of foot trajectory generation and obstacle size and density influence on robot's energy consumption.

The dissertation consists of introduction, three chapters, general conclusions and references.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the thesis, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 revises used literature. Energetic efficiency of mobile robots is discussed along with energy consumption measurement, calculation and optimization methods. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered.

Chapter 2 describes the development of energetically efficient methodology for walking robots. Conclusions are presented at the end of the chapter.

Chapters 3 investigates the energy consumption dependence on movement parameters as well as obstacle avoidance.

9 articles focusing on a topic of the dissertation are published: four – in Clarivate Analytics Web of Science data base cited journals, three – in Clarivate Analytics Web of Science data base "Conference Proceedings" material and two – in other data bases. 7 conference reports were carried out focusing on a topic of the dissertation in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

A_1, A_2, A_3 – sąnarių transformacijos matricos;

COT – transportavimo kaštų vertė;

D – kliūčių tankis;

d – roboto nueitas kelias;

d_k – vienos roboto pėdos trajektorijos ilgis;

E_c – vieno roboto judėjimo ciklo energijos sąnaudos;

E_{ki} – i -osios roboto kojos pavarų energijos sąnaudos;

E_{kin} – kinetinės energijos vertė;

E_{opt} – energijos sąnaudų vertė su žingsnio parametrų parinkimu;

E_p – pilnutinės roboto energijos vertė;

E_{pot} – potencinės energijos vertė;

E_v – roboto valdymo sistemos energijos sąnaudos;

E_{vid} – vidutinė energijos sąnaudų vertė;
 $E_{\text{vid_opt}}$ – vidutinė energijos sąnaudų vertė su žingsnio parametrų parinkimu;
 F_d – standumo jėga;
 F_s – svorio jėga;
 F_t – trinties jėga;
 F_{tr} – traukos jėga;
 H – kliūtis aukštis;
 h – žingsnio aukštis;
 h_1 – žingsnio aukštis judant lygiu paviršiumi;
 h_k – žingsnio aukštis perlipant kliūtį;
 h_{max} – maksimalus žingsnio aukštis;
 I_k – vienos roboto kojos pavarų elektros srovės stipris;
 I_{vid} – vidutinis roboto pavaroms tenkantis elektros srovės stipris;
 K – kliūčių skaičius aplinkoje;
 L – kliūtis ilgis;
 L_1, L_2, L_3 – klubo, šlaunies ir blauzdos kojos dalių ilgiai;
 l – žingsnio ilgis;
 l_i – žingsnio ilgis judant lygiu paviršiumi;
 l_k – žingsnio ilgis perlipant kliūtį;
 l_{max} – maksimalus žingsnio ilgis;
 m_i – i -osios roboto kojos masė;
 m_k – roboto kūno masė;
 N – roboto kūno pakėlimo aukštis;
 n – roboto kojų skaičius;
 $P(x, y, z)$ – roboto pėdos padėtis erdvėje;
 P_k – vienos roboto kojos pavarų vartojamos galios vertė.

P_{vid} – vidutinė galios vertė;
 S – judėjimo ciklų skaičius;
 \bar{S} – judėjimo ciklų skaičius lipant per kliūtis;
 s – žingsnio lanko ilgis;
 s_p – pilnutinis roboto judėjimo kelio ilgis;
 T – eisenos periodas;
 T_3^0 – 3 laisvės laipsnių transformacijos matrica;
 t_k – vienos kojos perkėlimo laikas;
 t_p – pilnutinis roboto veikimo laikas;
 t_{traj} – vienos roboto kojos žingsnio atlikimo laikas, kai kojų judesiai yra sinchronizuoti laiko atžvilgiu;
 v – roboto judėjimo greitis;
 v_{vid} – vidutinis roboto kojos judėjimo greitis;
 W – kliūties plotis;
 w – žingsnio plotis;
 w_i – žingsnio plotis judant lygiu paviršiumi;
 w_{max} – maksimalus žingsnio plotis;
 $\Delta E_{\text{vid-}}$ – energijos sąnaudų vertės nuokrypa nuo vidutinės vertės į žemesnę pusę;
 $\Delta E_{\text{vid+}}$ – energijos sąnaudų vertės nuokrypa nuo vidutinės vertės į didesnę pusę;
 $\Delta I_{\text{vid-}}$ – elektros srovės stiprio nuokrypa nuo vidutinės vertės į žemesnę pusę;
 $\Delta I_{\text{vid+}}$ – elektros srovės stiprio nuokrypa nuo vidutinės vertės į didesnę pusę;
 Δt – laiko prieaugis dėl atsitrenkimų į kliūtis;
 Δt_{max} – maksimalus vienos roboto kojos žingsnio atlikimo laikas;
 Δt_{min} – minimalus vienos roboto kojos žingsnio atlikimo laikas;
 ε – roboto judėjimo kryptis;
 φ_i – i -osios kojos perkėlimo fazė;
 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – klubo, šlaunies ir blauzdos sąnarių kampai.

Santrumpos

DG – dešinė galinė roboto koja;
D-H – Denavito-Hartenbergo parametrai;
DP – dešinė priekinė roboto koja;
DV – dešinė vidurinė roboto koja;
KG – kairė galinė roboto koja;
KP – kairė priekinė roboto koja;
KV – kairė vidurinė roboto koja;
LL – laisvės laipsniai;
SP – servo pavara.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	2
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	6
1. MOBILIŪJŲ ROBOTŲ ENERGIJOS ŠAŅAUDŲ ANALIZĖ	7
1.1. Vaikščiojantys robotai ir jų energijos sąnaudos	7
1.1.1. Vaikščiojančių robotų tipai ir jų valdymo metodai	8
1.1.2. Vaikščiojančių robotų mažo energetinio efektyvumo priežastys	13
1.2. Robotų energijos sąnaudų matavimas ir skaičiavimas	14
1.3. Energijos sąnaudų minimizavimo metodai	17
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	21

2. ENERGETIŠKAI EFEKTYVAUS JUDĖJIMO METODŲ SUDARYMAS	23
2.1. Šešiakojo roboto matematinio ir fizinio modelių sudarymas	24
2.2. Paviršiaus klasifikavimo modelio sudarymas	36
2.3. Kliūčių aptikimo ir perlipimo metodų sudarymas	43
2.3.1. Kliūčių aptikimas ir įvertinimas	44
2.3.2. Pėdos trajektorijos generavimas	46
2.4. Energijos sąnaudų matematinis modelis	49
2.5. Antrojo skyriaus išvados	58
3. ŠEŠIAKOJO ROBOTO ENERGETINIO EFEKTYVUMO TYRIMAI	61
3.1. Šešiakojo roboto energetinio efektyvumo tyrimai judant lygiu paviršiumi	62
3.2. Roboto judėjimo per kliūtis tyrimas	72
3.3. Energijos sąnaudų minimizavimo judant per kliūtis tyrimas	78
3.4. Energijos sąnaudų priklausomybės nuo kliūčių dydžio ir tankio tyrimas	86
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	91
BENDROSIOS IŠVADOS	93
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	95
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	105
SUMMARY IN ENGLISH	107
PRIEDAI ¹	123
A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	126
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje	127
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	135

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	2
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The objectives of the thesis	3
Research methodology	4
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings	4
The defended statements	5
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	6
1. MOBILE ROBOTS' ENERGETIC EFFICIENCY ANALYSIS	7
1.1. Walking robots and their energy consumption	7
1.1.1. Walking robots' types and their control methods	8
1.1.2. Walking robots' low energy efficiency causes	13
1.2. Methods for measuring and calculating robot's energy consumption	14
1.3. Energy consumption minimization methods	17
1.4. First chapter conclusions and formulation of the thesis objectives	21

2. FORMATION OF ENERGY EFFICIENT LOCOMOTION METHODS	23
2.1. Development of hexapod robot mathematical and physical models	24
2.2. Development of terrain classification model	36
2.3. Development of obstacle detection and avoidance methods	43
2.3.1. Obstacles detection and evaluation	44
2.3.2. Foot trajectory generation	46
2.4. Mathematical model of energy consumption	49
2.5. Second chapter conclusions	58
3. RESEARCH OF HEXAPOD ROBOT ENERGETIC EFFICIENCY	61
3.1. Hexapod robot energetic efficiency while moving on even terrain	62
3.2. Investigation of robot movement over obstacles	72
3.3. Energy consumption minimization while moving over obstacles	78
3.4. Research of energy consumption dependence on difficulty of environment ...	86
3.5. Third chapter conclusions	91
GENERAL CONCLUSIONS	93
REFERENCES	95
LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	105
SUMMARY IN ENGLISH	107
ANNEXES ²	123
Annex A. Author's declaration of academic integrity	126
Annex B. Co-author's agreements to present publications material in the doctoral dissertation	127
Annex C. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	135

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Nelygiems paviršiams įveikti, judėjimui sudėtingose bei žmogui pavojingose aplinkose yra tinkamiausi vaikščiojantys robotai, kurie pasižymi dideliu kojų ir laisvės laipsnių skaičiumi (G. C. Haynes *et. al.* 2012, X. Xiong *et. al.* 2015). Didelis laisvės laipsnių skaičius padidina vaikščiojančių robotų lankstumą, judėjimo galimybes ir gebėjimą perlipti nelygų paviršių. Visi dvikojai, keturkojai ar šešiakojai robotai gali turėti nuo aštuonių iki dvidešimt ar net daugiau laisvės laipsnių. Kiekvienas laisvės laipsnis kuriamas naudojant įvairias pavaras, ir dėl to stipriai didėja energijos sąnaudos. Mažinant laisvės laipsnių skaičių mažėja mobilaus roboto manevringumas ir kojų ar rankų darbo zona. Todėl energetiškai efektyvus judėjimas turi būti pasiektas pritaikant kitokio pobūdžio metodus, pavyzdžiui, optimizuojant judesius. Judėjimui nelygiu paviršiumi ar lipant per įvairias paviršiaus kliūtis reikalingi aplinkos atpažinimo jutikliai, o taip pat kliūčių įveikimo metodai. Toks judėjimas reikalauja roboto judėjimo parametrų bei eisenos pakeitimų. Taigi kuriant energetiškai efektyvaus judėjimo metodiką vaikščiojantiems robotams būtina ištirti energijos sąnaudų priklausomybes nuo roboto judėjimo parametrų bei kliūčių dydžio ir tankio.

Sudarant energetiškai efektyvų roboto judėjimo metodą judėjimui lygiu paviršiumi sprendžiama eisenos parinkimo pagal roboto judėjimo greitį problema.

problema. Tokiai problemai spręsti reikia atlikti išsamius energijos sąnaudų priklausomybės nuo judėjimo greičio bei eisenos tyrimus, kurie leistų tinkamai įvertinti sąryšį tarp šių parametru.

Judėjimui per kliūtis dažnai taikomas pėdų pozicionavimo planavimo metodas (M. Kalakrishnan *et. al.* 2011), kuris remiasi kiekvienos kojos padėties koordinačių skaičiavimu visai numatytai judėjimo trajektorijai. Naudojant šį metodą, robotas gauna išankstinę informaciją, kur kuriuo metu kiekviena koja turės atsistoti. Tačiau toks metodas yra gana sudėtingas ir, jei atliekami skaičiavimai realiu laiku, stipriai sulėtėja roboto judėjimas. Kliūčių aptikimui ir išvengimui gali būti naudojami ir tinkamų judėjimo parametru parinkimo ar pėdos trajektorijos transformavimo metodai, kurie yra daug paprastesni ir realiu laiku gali veikti nekeičiant roboto judėjimo greičio.

Disertacijoje atlikti energijos sąnaudų priklausomybės nuo eisenos tyrimai ir išspręstos kliūčių aptikimo bei perlipimo metodų kūrimo problemos. Šie metodai buvo pritaikyti energetiškai efektyviam roboto judėjimui žinomoje aplinkoje, kai robotas turi išankstinę informaciją apie kliūčių dydžius.

Darbo aktualumas

Energetiškai efektyvus judėjimas – tai pati svarbiausia vaikščiojančių robotų problema, kuri apima roboto kūrimo bei valdymo klausimus. Tokia problema yra glaudžiai susijusi su judėjimo parametru optimizavimu. Šios problemos sprendimo rezultatai turi didelę reikšmę kuriant energetiškai efektyvaus judėjimo vaikščiojantiems robotams metodiką.

Energetiškai efektyvaus judėjimo problemos sprendimas prasideda roboto kūrimo metu. Nėra bendros metodikos, kuria naudojantis būtų galima sukurti energetiškai efektyvų robotą. Įprastinio roboto kūrimo metu nėra taikomi energijos sąnaudų minimizavimo metodai, o taip pat nėra atsižvelgiama į laisvės laipsnių skaičių ar pavarų energetinį efektyvumą. Taip pat susiduriama su roboto valdymo problemomis judant tiek lygiu, tiek ir nelygiu paviršiumi. Klasikiniai roboto valdymo metodai, tokie kaip atvirkštinė kinematika, atvirkštinė dinamika yra būtini, tačiau nėra taikomi kuriamo roboto energetinio efektyvumo įvertinimui. Judant nelygiu paviršiumi būtinos įvairios aplinkos atpažinimo sistemos, kurios didina energijos sąnaudas, todėl atsiranda poreikis kurti metodus, leidžiančius tobulinti ne tik roboto valdymą, bet ir roboto energetinį efektyvumą.

Vaikščiojantys robotai gali būti įvairių rūšių: dvikojai, keturkojai, šešiakojai ar net turėti ir daugiau kojų, gali būti valdomi vien kinematiniais metodais arba ir kinematiniais, ir dinaminiais. Atliekant energetinio efektyvumo tyrimus robotui judant lygiu paviršiumi ir perlipant kliūtis galima sukurti bendrą energetiškai efektyvaus judėjimo metodiką, tinkamą visiems vaikščiojantiems

robotams nepriklausomai nuo jų struktūros, valdymo sistemos ar veikimo algoritmo.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – šešiakojo vaikščiojančio roboto valdymo metodas, skirtas judėjimui lygiu paviršiumi bei kliūčių aptikimui bei perlipimui.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas yra sukurti ir ištirti lygiu paviršiumi judančių bei kliūtis perlipančių vaikščiojančių robotų energijos sąnaudų minimizavimo metodus.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Sudaryti šešiakojo roboto imitacinį ir fizinį modelius bei pėdų trajektorijų generavimo matematinės išraiškas kliūčių perlipimui.
2. Ištirti roboto energijos sąnaudas ir jas lemiančius veiksnius judant lygiu paviršiumi ir įvertinti judėjimo nuokrypius nuo numatytos judėjimo trajektorijos žingsniuojant paviršiais su įvairaus dydžio ir tankio kliūtimis.
3. Sudaryti ir ištirti pėdų trajektorijų generavimo metodą, kuris galėtų būti naudojamas parinkti žingsnio parametrus siekiant minimizuoti energijos sąnaudas.
4. Ištirti roboto energijos sąnaudų priklausomybę nuo kliūčių dydžio ir tankio aplinkoje, taikant sudarytą pėdų trajektorijų generavimo metodą.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi geometrinis skaičiavimo bei Denavito-Hartenbergo metodai šešiakojo roboto atvirkštinės kinematikos sudarymui, parametrų parinkimo metodas energijos sąnaudų minimizavimo perlipant kliūtis tyrimui atlikti, matematinio modeliavimo bei eksperimentinių tyrimų metodai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sudarytas eisenos parinkimo algoritmas šešiakojams vaikščiojantiems robotams atsižvelgiant į roboto greitį, kurį naudojant galima minimizuoti roboto energijos sąnaudas judant lygiu paviršiumi.
2. Sukurtas naujas kliūčių aptikimo ir perlipimo metodas vaikščiojantiems robotams, kurį naudojant galima realiu laiku nustatyti kliūčių padėtį aplinkoje ir jas perlipti.
3. Sukurtas naujas pėdos trajektorijos generavimo metodas, kurį naudojant robotas gali perlipti žinomo dydžio kliūtis ir parinkti žingsnio parametrus, siekiant sunaudoti minimalų energijos kiekį.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Sudarytas šešiakojo vaikščiojančio roboto matematinis modelis, kurį naudojant galima patikrinti sukurtų metodų efektyvumą ir adekvatumą. Šis modelis išsiskiria galimybe teoriškai skaičiuoti vaikščiojančių robotų energijos sąnaudas.
2. Sukonstruotas šešiakojo vaikščiojančio roboto fizinis modelis, kuris gali būti taikomas įvairiems moksliniams šešiakojų vaikščiojančių robotų judėjimo ir energijos sąnaudų tyrimams atlikti.
3. Parinkta elektros srovės stiprio matavimo schema gali būti taikoma mobiliam robotui tenkančio elektros srovės stiprio matavimui, kuris yra būtinas norint įvertinti roboto energijos sąnaudas.
4. Sukonstruoti ant roboto kojų priekinių dalių montuojami kliūčių aptikimo jutikliai. Naudojant šiuos jutiklius, robotas gali nustatyti, kada kiekviena koja remiasi į kliūtį.

Ginamieji teiginiai

1. Taikant eisenos pakeitimo algoritmą priklausomai nuo roboto judėjimo lygiu paviršiumi greičio gali būti gaunamos iki 21 % mažesnės energijos sąnaudos parenkant banguojančią ir trikoję eisenas, lyginant su energijos sąnaudomis netaikant eisenos pakeitimo metodo.
2. Netaikant kliūčių perlipimo metodo galimi nuokrypiai nuo numatytos judėjimo trajektorijos gali siekti iki 24 %. Taikant kliūčių perlipimo metodą darbe naudotam šešiakojui robotui judėjimui žinomoje aplinkoje nuokrypiai nuo numatytos trajektorijos gali būti sumažinti iki 12 %.
3. Taikant pėdos trajektorijos generavimo metodą judėjimui per įvairaus žinomo dydžio kliūtis galima pasiekti iki 15 % mažesnes energijos sąnaudas, lyginant su judėjimu netaikant pėdos trajektorijos generavimo metodo.
4. Kliūčių tankis aplinkoje stipriai įtakoja roboto energijos sąnaudas (apie 83 J/kliūčiai), tačiau kliūčių aukštis energijos sąnaudoms turi labai mažą įtaką (apie 0,00022 J/cm), jei kliūčių aukštis yra mažesnis už roboto dydį. Kiekviena papildoma kliūtis viename šešiakojo roboto kelio metre energijos sąnaudas padidina iki 7 %.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 9 moksliniai straipsniai: keturi – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį, trys – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazės „Conference Proceedings“ leidiniuose ir du – kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose.

Disertacijos tema perskaityti pranešimai septyniuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje bei užsienyje:

- Tarptautinėje konferencijoje „*iROS2017*“ 2017 m., Vankuveryje, Kanadoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „*Engineering and evolution of bio-hybrid societies*“ 2017 m., Grace, Austrijoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „*4th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*“ 2016 m., Vilniuje, Lietuvoje.

- Užsienio konferencijoje „*From bio-inspired to bio-hybrid (robotic) systems*“ 2016 m., Lozanoje, Šveicarijoje.
- Jaunųjų mokslininkų konferencijose „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2014 ir 2015 m. Vilniuje, Lietuvoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „*ECT-2013: 8th international conference on electrical and control technologies*“ 2013 metais, Kaune, Lietuvoje.

2014 metais buvo dalyvauta „*Myrobotics Winter School and Workshop*“ žiemos mokykloje, Kembridže, Anglijoje. 2016 metais dalyvauta „*From bio-inspired to bio-hybrid (robotic) systems*“ žiemos mokykloje, Lozanoje, Šveicarijoje. 2016 metais buvo atlikta stažuotė Karlo III-ojo universitete, Madride, Ispanijoje. 2017 metais buvo dalyvauta „*Engineering and evolution of bio-hybrid societies*“ vasaros mokykloje. 2015–2016 metais laimėta Lietuvos mokslo tarybos finansuojama doktoranto stipendija už mokslinius pasiekimus.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados.

Darbo apimtis yra 125 puslapiai, tekste panaudotos 96 numeruotos formulės, 47 paveikslai ir 16 lentelių. Ruošiant disertaciją buvo panaudoti 136 literatūros šaltiniai.

Mobiliųjų robotų energijos sąnaudų analizė

Skyriuje nagrinėjami vaikščiojantys robotai, jų tipai, klasės, konstrukcijos bei valdymo metodai. Nagrinėjamos energijos sąnaudų atsiradimo ir didėjimo priežastys, o taip pat energijos sąnaudų matavimo metodai, energijos sąnaudų skaičiavimo bei optimizavimo metodai taikomi įvairiems mobiliems robotams. Skyriaus gale pateikiamos išvados ir tikslinami darbo uždaviniai.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (M. Luneckas, T. Luneckas, D. Udris, N. M. F. Ferreira 2014; V. Valaitis, T. Luneckas, M. Luneckas, D. Udris 2015).

1.1. Vaikščiojantys robotai ir jų energijos sąnaudos

Vaikščiojantys robotai jau tyrinėjami apie 40 metų ir iki šiol yra sukurta nemažas kiekis įvairių tipų bei skirtingų konstrukcijų vaikščiojančių robotų, kurie skiriasi ne tik savo paskirtimi, bet ir valdymo būdu. Lyginant su važiuojančiais robotais, vaikščiojančių robotų didžiausi privalumai yra universalumas, lankstumas bei galimybė judėti nelygiu paviršiumi (C. F. Juang *et. al.* 2015). Važiuojantiems robotams reikia lygaus paviršiaus, kad galėtų judėti, tuo tarpu vaikščiojantys robotai judėjimui naudoja kojas (robotų kūrimas remiasi biologi-

kūrimas remiasi biologiniais aspektais) (H. Kimura *et. al.* 2007, H. E. Daou *et. al.* 2013), todėl gali prisitaikyti prie praktiškai bet kokio paviršiaus. Dėl šių savybių vaikščiojantys robotai gali būti taikomi gelbėjimo operacijoms (D. Wei *et. al.* 2014, J. C. Arevalo *et. al.* 2014), išminavimui (T. S. Shih *et. al.* 2012), krovinių gabenimui (Y. Geva *et. al.* 2014), planetinių tyrimų (A. Omer *et. al.* 2014, J. C. Arevalo *et. al.* 2014) ar povandeninių darbų misijose (J. Y. Kim *et. al.* 2014, J. Y. Kim *et. al.* 2015).

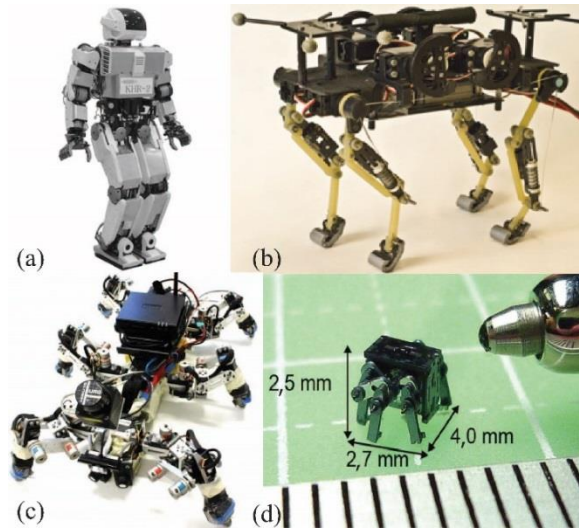
Vaikščiojantys robotai yra kur kas sudėtingesni mechanizmai nei važiuojantys ar vikšriniai robotai (G. C. Haynes *et. al.* 2012). Jie reikalauja itin patikimų valdymo metodų, kad būtų palaikomas pastovus judėjimo stabilumas (S. Parasuraman *et. al.* 2012), kojų ir paviršiaus sąlytis (L. Ding *et. al.* 2013), pasiekiamas reikiamas greitis (M. Li *et. al.* 2014) ir išlaikomos minimalios energijos sąnaudos (D. W. Marhefka *et. al.* 1997).

1.1.1. Vaikščiojančių robotų tipai ir jų valdymo metodai

Visi vaikščiojantys robotai gali būti grupuojami dviem būdais. Visų pirma jie gali būti grupuojami pagal kojų skaičių: dvikojus, trikojus, keturkojus, šešiakojus ir aštuonkojus (X. Y. S. Castro *et. al.* 2013). Keli dvikojų robotų pavyzdžiai gali būti „KHR-2“ robotas (J. H. Kim *et. al.* 2008), „ARMAR-IIIb“ robotas (Trovato *et. al.* 2015) arba „HRP-2“ dvikojis robotas (J. Ido *et. al.* 2009). Iš keturkojų robotų patys pažangiausiai iki šiol sukurti robotai yra Boston Dynamics kompanijai priklausantys „BigDog“ (D. Wooden *et. al.* 2010) arba „LittleDog“ robotai (A. Shkolnik *et. al.* 2011), taip pat Masačusetso technologijos institutui priklausantis robotas gepardas „MIT Cheetah“ (D. J. Hyun *et. al.* 2016). Tarp šešiakojų ir aštuonkojų robotų pirmaujančių nėra, tačiau dažniau tyrinėjami šešiakojai robotai dėl paprastesnės konstrukcijos. Geri šešiakojų robotų pavyzdžiai galėtų būti šie robotai: „Rhex“ šešiakojis (P. C. Lin *et. al.* 2006), „AMOS“ šešiakojis (Xiong *et. al.* 2015) arba Harvardo universiteto ambulatorinis šešiakojis mikro robotas (A. T. Baisch *et. al.* 2010). Vaikščiojančių robotų su skirtingu kojų skaičiumi pavyzdžiai pavaizduoti 1.1 paveiksle.

Kitas grupavimo būdas yra pagal kūno formą. Nuo kūno formos priklauso roboto kinematinis modelis, kuris nulemia judėjimo parametrus ir roboto stabilumą. Pavyzdžiui šešiakojų robotų kūno formos gali būti paprasto stačiakampio arba šešiakampio formos (X. Ding *et. al.* 2010, S. Long *et. al.* 2014). Dažniausiai šios formos būna konstruojamos taip, kad dešinioji ir kairioji pusės būtų simetriškos. Tuo atveju roboto valdymas yra paprastesnis. Tačiau kai kuriais atvejais roboto kūnas būna pilnai simetriškas: tiek dešinioji ir kairioji pusės yra simetriškos ir taip pat priekis ir galas yra simetriški; kūnas yra

kvadrato arba taisyklingo šešiakampio formos (S. Long *et. al.* 2014). Kai kuriais atvejais roboto kūnas gali būti tiesiog taisyklingo apskritimo formos, kur kojos išdėstytos vienodais atstumais aplink jį (X. Ding *et. al.* 2010). Skirtingos kūnų formos ir galūnių kinematinis išdėstymas pavaizduoti 1.2 paveiksle. Tos pačios 9 kūno formos tinka ne tik šešiakojams, tačiau ir keturkojams, ir aštuonkojams robotams.

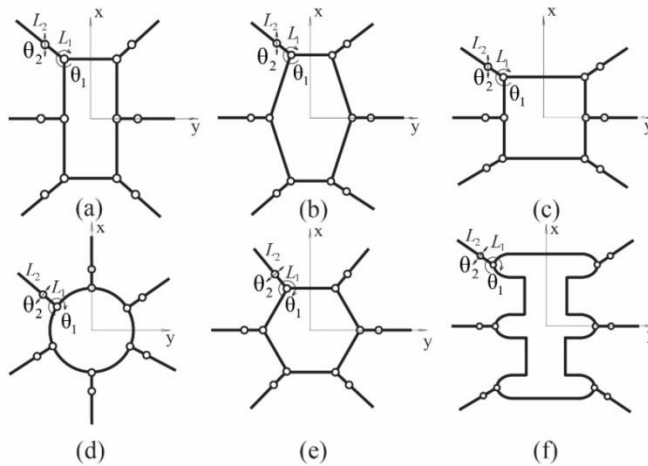


1.1 pav. Vaikščiojančių robotų su skirtingu kojų skaičiumi pavyzdžiai: (a) dvikojis „KHR-2“ robotas (J. Y. Kim *et. al.* 2009); (b) keturkojis „Cheetah-cub“ robotas (A. Sprowitz *et. al.* 2013); (c) šešiakojis „AMOS“ robotas (X. Xiong *et. al.* 2015); (d) šešiakojis mikro robotas (K. Saito *et. al.* 2012)

Fig. 1.1. Examples of walking robots with different number of legs: (a) biped “KHR-2” robot (J. Y. Kim *et. al.* 2009); (b) quadruped “Cheetah-cub” robot (A. Sprowitz *et. al.* 2013); (c) hexapod “AMOS” robot (X. Xiong *et. al.* 2015); (d) hexapod micro robot (K. Saito *et. al.* 2012)

Vaikščiojančių robotų judėjimui naudojamas tam tikras kojų skaičius, todėl visų jų konstrukcija priklauso ir nuo kojų konstrukcijos. Visų vaikščiojančių robotų kojos skiriasi pagal laisvės laipsnių skaičių (LL), kuris nulemia roboto manevringumą. Dažniausiai vaikščiojantys robotai turi tris LL (Y. Go *et. al.* 2006, X. Ding *et. al.* 2010, G. Chen *et. al.* 2017) ant kiekvienos kojos. Kai kuriais atvejais būna robotų su dviem kiekvienos kojos LL (M. J. Spenko *et. al.* 2008). Žinoma, yra ir išimčių, kai roboto koja kuriama su vienu laisvės laipsniu (P. C. Lin *et. al.* 2006) arba labai išskirtiniais atvejais, kai koja sudaroma net iš keturių arba daugiau laisvės laipsnių. Tokie atvejai dažniausiai pasitaiko kuriant įvairius žmogiškuosius dvikojus robotus, kurie reikalauja itin didelio lankstumo

(L. C. Macias *et. al.* 2017). Keičiant LL skaičių ir kojos konfiguraciją (kojos sąnarių išdėstymą) galima gauti daug skirtingų variacijų, kurios nulems, kaip kokybiškai ir greitai robotas gebės judėti lygiu ar nelygiu paviršiumi ir kaip gebės išvengti kliūčių.



1.2 pav. Skirtingas šešiakojų robotų kūnų kinematinis išdėstymas: (a) stačiakampis; (b) šešiakampis; (c) taisyklingas kvadratas; (d) taisyklingos formos apskritimas; (e) taisyklingas šešiakampis; (f) beformis

Fig. 1.2. Different types of hexapod robot body kinematic layout: (a) rectangular; (b) hexagonal; (c) symmetrical square; (d) symmetrical circle; (e) symmetrical hexagon; (f) shapeless form

LL skaičius gali būti didinamas ne vien pavarų skaičiumi kojose, bet ir keičiant pavarų skaičių ant roboto kūno (Y. Tang *et. al.* 2015, S. Wang *et. al.* 2014). Taikant tokį metodą galima mažinti kojų LL skaičių, nes kūno judėjimas kompensuoja kojų judėjimo laisvę. Naudojant tokį metodą, reikia taikyti šiek tiek kitokį roboto valdymą, kuris skiriasi nuo įprastinio atvirkštinės kinematikos uždavinio, o taip pat roboto konstrukcija tampa sudėtingesnė.

Nepriklausomai nuo roboto kūno ir kojų konstrukcijos, į roboto valdymo sistemą turi būti įdiegtas valdymo algoritmas, pagal kurį robotas atliks užprogramuotus veiksmus. Norint valdyti tokias sudėtingas sistemas, sudarytas iš didelio pavarų skaičiaus, ir pasiekti universalų vaikščiojimą dažniausiai naudojami šie metodai: tiesioginės ir atvirkštinės kinematikos metodai (C. Runbin *et. al.* 2013, G. Xin *et. al.* 2015), kai sudaromos roboto kojų jungiamųjų dalių kampų priklausomybės nuo norimų pėdų koordinatų, bei dinamikos ir atvirkštinės dinamikos metodai (S. Ali *et. al.* 2010, A. Mahapatra *et. al.* 2015), kai sudaromos kojų pėdų galinių taškų greičių priklausomybės nuo jungiamųjų dalių kampinių greičių. Siekiant padidinti

roboto pėdų padėčių ir pėdos trajektorijos generavimo tikslumą dažnai taikomas proporcinis-integralinis-diferencialinis (PID) metodas ar jo variacijos (I. Kesckes *et. al.* 2014). Tokio metodo esmė yra priartinti gaunamus atvirkštinės kinematikos ar dinamikos metodų būdu skaičiuojamus kampus/greičius prie norimų teorinių skaičiavimų. Teisingai konfigūruojant PID valdymą galima pasiekti pakankamai aukšto tikslumo rezultatus.

Kitas plačiai tyrinėjamas vaikščiojančių robotų valdymo būdas yra centrinis struktūros generatorius (angl. central pattern generator (CPG)). Toks metodas buvo pastebėtas gamtoje (pvz. vabzdžių judėjime) ir plačiai taikomas robotų judėjimo valdymui (J. H. B. Zambrano *et. al.* 2012, X. Wu *et. al.* 2013) ar judėjimui per nelygų paviršių (C. Weihai *et. al.* 2014). Šio metodo esmė yra kurti valdymo signalus konkrečioms roboto galūnėms ar net sąnariams, tokiu būdu išskaidant bendrą roboto valdymą į atskiras dalis. Tačiau centrinio struktūros generatoriaus metodas nėra pilnai išvystytas ir reikalauja gilesnio nagrinėjimo iki kol jis bus pilnai taikomas vaikščiojantiems robotams.

Taip pat populiarus valdymo metodas yra neraiškioji logika (angl. fuzzy logic). Šis metodas gali būti taikomas ne tik robotikos problemoms spręsti ir yra labai universalus. Neraiškioji logika gali būti taikoma roboto judėjimui pagerinti nepakeičiant stabilumo (I. Kesckes *et. al.* 2014, C. F. Juang *et. al.* 2015, R. K. Barai *et. al.* 2008), judėjimui nuožulniais šlaitais tiek daugiakojams robotams, tiek dvikojams (C. Zhou 2000, U. Seven *et. al.* 2012, W. J. Wang *et. al.* 2017), adaptyviam judėjimui per skirtingus paviršius (Z. Y. Guang *et. al.* 2015), kliūčių išvengimui ir orientavimuisi aplinkoje (Y. H. Chou *et. al.* 2002), taip pat kitose srityse. Neraiškiosios logikos metodas leidžia parinkti tinkamiausias parametrų vertes jas derinant tarpusavyje ir sudarant elgesio taisykles. Deja, norint taikyti didelį parametrų skaičių ar didelį kiekvieno parametro verčių skaičių, stipriai didėja taisyklių kiekis, todėl roboto elgesys tampa paremtas kraštutinumais (roboto elgesys tampa nepastovus).

Nestabilus judėjimas yra viena iš svarbiausių vaikščiojančių robotų problemų, ypač dvikojams robotams (W. Yang *et. al.* 2013, F. Ali *et. al.* 2013). Neišlaikant stabilumo vaikščiojimas yra neįmanomas. Šiai problemai spręsti dažnai naudojamas nulinio momento taško metodas (angl. zero moment point (ZMP)) (R. Xin *et. al.* 2009, V. Antoska *et. al.* 2013). Tai toks taškas ant paviršiaus, kuriame momentai aplink dvi susidariusias ašis yra lygūs nuliui. Stabilumo kriterijus pagal nulinio momento taško metodą sako, kad jei nulinio momento taškas yra palaikymo daugiakampyje, dinamiškai stabilus judėjimas yra garantuotas (A. Massah *et. al.* 2013). Toks metodas gali būti taikomas visiems daugiakojams robotams, tačiau nėra būtinas robotams, kurie turi šešias ar daugiau kojų, nes ant paviršiaus visada yra trys arba daugiau kojų.

Vaikščiojantiems robotams taip pat būtinas judėjimo algoritmas, pagal kurį bus nustatoma, koku eiliškumu robotas perkels kojas. Kojų perkėlimo

eiliškumas yra vadinamas eiseną (angl. gait). Dauguma vaikščiojančių robotų eisenų kuriama pagal gamtoje esančius judėjimo būdus: dvikojams ir keturkojams robotams atkartojant žmones ir kitus gyvūnus (H. Kimura *et. al.* 2007, C. Ferreira *et. al.* 2017), šešiakojams robotams – vabzdžius (M. Schilling *et. al.* 2007, K. Mostafa *et. al.* 2015). Pagrindinės eisenos keturkojams robotams yra ėjimas, žingsniavimas, risnojimas ir šuoliavimas (X. Zhiang *et. al.* 2006, C. Rungin *et. al.* 2013, A. Sprowitz *et. al.* 2013). Šešiakojų pagrindinės eisenos yra trys: trikojė, dvikojė ir banguojanti (M. R. Fielding *et. al.* 2004, W. Chen *et. al.* 2012). Robotai, judėdami šiomis eisenomis, gali pasiekti plačiausią greičių diapazoną ir mažiausias energijos šaūaudas.

Nors eisenos yra tinkamas metodas judant pakankamai paprastais ir lygiais paviršiais, judėjimui nelygiais ar sudėtingais paviršiais jos gali būti sunkiai pritaikomos. Tokiu atveju tinkamesnis judėjimo metodas yra kojų pėdų koordinacių planavimo metodas (angl. footplanner method) (K. Hauser *et. al.* 2008). Šio metodo esmė yra sugeneruoti koordinates kiekvienai roboto pėdai atskirai ir pritaikyti rezultatus generuojant nuoseklų ėjimą (savotišką eiseną). Tada kiekviena koja bus pastatoma ant paviršiaus nepriklausomai nuo jo nelygumo. Lyginant su eisenomis, pėdų pastatymo planavimo metodas yra itin lėtas, nes atliekami skaičiavimai kiekvienam žingsniui viso judėjimo metu.

Tiek judėjimas naudojant skirtingas eisenas, tiek kojų pėdų pozicionavimo planavimas priklauso nuo kojų ir jų LL skaičiaus. Kartais gali nutikti taip, kad kuri nors jungiamoji dalis nustos dirbti (suges, nulūš arba negaus pakankamo energijos kiekio). Taip nutikus roboto judėjimas gali pasikeisti arba sustoti. Šiai problemai spręsti taikomas klaidai tolerantiškos eisenos metodas (angl. fault tolerant gait) (U. Asif 2012), kuris leidžia sukurti ir pritaikyti naujas eisenas judėjimui lygiu ir nelygiu paviršiumi įvykus pavaros ar jutiklio gedimui. Panašus metodas, skirtas judėjimui nenumatytomis sąlygomis, kai sugenda tam tikros roboto detalės, yra T-atsparumo metodas (angl. T-resilience) (S. Koos *et. al.* 2013). Šis metodas nėra skirtas nustatyti sugedusioms dalims, tačiau leidžia savarankiškai ir efektyviai rasti elgseną, kai sugedusi dalis nėra reikalinga. Žinoma, šie metodai dar yra tik pirminės versijos roboto judėjime esant gedimams, todėl nėra pilnai sukurti ir veikia tik tam tikromis sąlygomis.

Robotams būdinga taikyti tokius valdymo metodus, kurie dažnai sutinkami ir gyvoje gamtoje. Vienas tokių būdų yra dirbtinių neuronų tinklas (angl. neural network) (K. Saito *et. al.* 2012). Šis metodas nėra paprastas ir reikalauja daug laiko tinkamai sukonfigūruoti, kad gerai veiktų, tačiau gali būti labai plačiai taikomas sprendžiant įvairias robotų valdymo ar judėjimo problemas. Viena iš dažnų neuroninių tinklų taikymo sričių yra roboto judėjimo eisenų mokymas (C. F. Juang *et. al.* 2011). Robotas išmoksta pasirinkti sau tinkamiausią eiseną, todėl nereikalinga žmogaus pagalba. Neuroninius tinklus taip pat praktiška taikyti

planuojant robotų judėjimą (S. Yildirim 2008), gerinant judėjimo tikslumą (Y. Lin *et. al.* 1997) arba pavarų valdymo tikslumą (J. Santos *et. al.* 2017), tačiau toks būdas yra žinomas kaip labai lėtas procesas ir reikalauja daugelio bandymų. Kai kuriais atvejais dirbtinių neuronų tinklai taikomi kaip virtualūs jutikliai, siekiant apmokyti robotą teisingai suprasti iš jutiklių gautą informaciją (J. Estremera *et. al.* 2005). Kitas būdas taikyti dirbtinius virtualius neuroninius tinklus yra biologinių principų imitavimas siekiant suprasti, pvz. vabzdžių, judėjimą ir elgseną (M. Schilling *et. al.* 2013). Toks neuroninių tinklų pritaikymas leidžia geriau suprasti gamtoje naudojamus gyvųjų organizmų judėjimo ir prisitaikymo principus, kurie vėliau tampa naudingi vaikščiojančių robotų kūryboje ir valdyme. Tačiau visi metodai susiję su neuroniniais tinklais veikia labai lėtai, todėl juos sunku pritaikyti roboto veikimui realiu laiku.

Vaikščiojančių robotų kūryboje dažnai naudojami ir jėgos jutikliai, kurie yra būtini kontroliuojant roboto pėdų sąlytį su paviršiumi (L. Ding *et. al.* 2013). Naudojant jėgos jutiklius taip pat galima valdyti ir roboto judėjimą per nelygų paviršių (S. Kaliyamoorthy *et. al.* 2005) ar siekiant išlaikyti visapusišką stabilumą (M. Agheli *et. al.* 2016). Vienintelis sunkumas, susijęs su jėgos jutikliais, yra jų integravimas ant roboto pėdų. Jėgos jutikliai dažniausiai yra ploni ir jautrūs, todėl montuoti juos reikia itin saugiai, o taip pat kiekvienas robotas yra unikalus ir jutiklių montavimas gali stipriai skirtis.

Lyginant visus aptartus robotų valdymo metodus matyti, kad pagrindinis panašumas tarp jų yra lėtas veikimas. Dauguma minėtų metodų reikalauja daug laiko, kad būtų atlikti skaičiavimai, todėl dažniausiai skaičiavimai atliekami ne realiu laiku, o prieš roboto veikimą. Tai yra trūkumas, nes metodai negali būti taikomi robotui veikiant realiu laiku, nes robotas juda greičiau nei priima sprendimą ir todėl gali nespėti atlikti reikiamų veiksmų. Kitas pastebimas trūkumas yra metodų tarpusavio nesusietumas. Nors kiekvienas metodas atskirai yra universalus, tačiau tarpusavyje jie sunkiai gali būti suderinti, kad veiktų kaip vienas. Tai neleidžia praplėsti robotų valdymo galimybių, o tik pritaikyti juos konkrečioms atvejams. Apibendrinant galima teigti, kad trūksta bendresnių metodų, kurių taikymas leistų derinti daugiau roboto savybių ir parametrų.

1.1.2. Vaikščiojančių robotų mažo energetinio efektyvumo priežastys

Nepaisant didelių vaikščiojančių robotų privalumų judant nelygiu paviršiumi, prisitaikant prie aplinkos bei plačių šių robotų taikymo galimybių, konstruojant tokias autonomines sistemas susiduriama su problemomis, kurias būtina išspręsti norint panaudoti vaikščiojančius robotus realioje užduotyse. Savarankiškos užduotys reikalauja ilgo darbo laiko, todėl viena iš svarbiausių autonominių

vaikščiojančių robotų problemų tampa didelės energijos sąnaudos (H. P. Siregar 2005, A. Roennau *et. al.* 2011).

Yra daug priežasčių, kodėl vaikščiojantys robotai pasižymi didelėmis energijos sąnaudomis. Viena iš dažniausiai sutinkamų priežasčių yra didelis pavarų skaičius (G. C. Haynes *et. al.* 2012, X. Xiong *et. al.* 2015). Įprastai dvikojai, keturkojai ir šešiakojai robotai turi nuo 12 iki 24 ar net daugiau LL, o kiekvienas LL kuriamas montuojant papildomą elektros pavarą (arba hidraulinę, jei robotas yra itin didelis). Robotai, turintys mažesnę LL skaičių nepasižymi tokiu geru lankstumu lyginant su robotais, kurie turi didesnę LL skaičių.

Kita priežastis didelėms energijos sąnaudoms atsirasti yra didelis roboto svoris. Visi vaikščiojantys robotai turi nešti ne tik savo kūno konstrukciją, tačiau ir visas pavaras, valdymo sistemą ir net energijos šaltinį (D. C. Kar *et. al.* 2001). Įprastai vaikščiojantys robotai gali sverti nuo kelių iki keliasdešimties kilogramų (S. Bartsch *et. al.* 2012, R. Zhang *et. al.* 2013, X. Xiong *et. al.* 2015) (kartais ir iki kelių tonų (A. Irawan *et. al.* 2011)). Net kai kurie mikro robotai, kurie sveria vos kelis gramus, pagal savo dydį suvartoja didelį energijos kiekį (P. Birkmeyer *et. al.* 2009, N. J. Kohut *et. al.* 2011).

Nors valdymo schemos elektronikos komponentai suvartoja sąlyginai mažą energijos kiekį, didelis jų skaičius gali stipriai įtakoti bendrą roboto energetiką. Kaip yra žinoma, dauguma vaikščiojančių robotų turi veikti savarankiškai be žmogaus įsikišimo, todėl tokiam darbo režimui būtina aprūpinti robotą įvairiais jutikliais ir vykdykliais, kad jis galėtų laisvai orientuotis aplinkoje, tinkamai priimti sprendimą arba tikslingai atlikti mokslinius tyrimus (L. Minati *et. al.* 2002). Taip pat reiktų atkreipti dėmesį ir į tai, kad iš kuo daugiau komponentų sudarytas robotas, tuo daugiau atsiranda galimybių gedimams ir didesnę įtaką daro detalių nusidėvėjimas. Kai tam tikros detalės nusidėvi (pvz. pavaros ar jutikliai), roboto judėjimui pasidaro reikalingas didesnis energijos kiekis siekiant išlaikyti nepakeistą judėjimą (X. Wu *et. al.* 2011).

Dar viena didelių energijos sąnaudų priežastis yra įvairūs sąlyčiai su paviršiumi judant nelygiu paviršiumi, atsitrenkimai į aplinkoje esančias kliūtis (Z. G. Zhang *et. al.* 2006), o taip pat šiluminiai nuostoliai pavarose ar valdymo sistemoje veikiant intensyviu darbo režimu metu (T. Okada *et. al.* 2010), trintis ar tamprumas (A. T. Baisch *et. al.* 2014).

1.2. Robotų energijos sąnaudų matavimo ir skaičiavimo metodai

Norint įvertinti roboto energijos sąnaudas reikia taikyti vieną iš energijos sąnaudų matavimo ir skaičiavimo metodų. Tokių metodų yra palyginti nedaug ir jie yra pakankamai paprasti.

Pats paprasčiausias ir dažniausiai naudojamas energijos šaŅaudų matavimo metodas yra robotui tenkančio elektros srovės stiprio matavimas judėjimo metu (A. Roennau *et. al.* 2011). Energijos šaŅaudos labiausiai susijusios su pavaru energijos šaŅaudomis (S. S. Roy *et. al.* 2011), todėl dažniausiai stebimas būtent pavaroms tenkantis elektros srovės stipris. Šaltinio įtampos kitimą taip pat galima stebėti, taigi energiją galima apskaičiuoti kaip galios kitimą laike (P. G. de Santos *et. al.* 2009, S. S. Roy *et. al.* 2014):

$$E = \int u(t) \cdot i(t) dt, \quad (1.1)$$

čia E – bendras sistemos suvartojamas energijos kiekis, $u(t)$ – maitinimo šaltinio įtampa, $i(t)$ – iš šaltinio tekančios elektros srovės stipris, t – laikas.

Valdymo sistemos suvartojama energija įprastai būna tokia maža, kad į (1.2.1) formulę ji nėra įskaičiuojama, nebent tai būtų mikro robotas, kurio pavaru ir kitų elektronikos komponentų suvartojamas energijos kiekis yra artimas.

Pagal (1.1) formulę gautas roboto suvartojamas energijos kiekis nieko nepasako apie jo energetinį efektyvumą. Perskaičiuojant energijos kiekį į transportavimo kaštų parametą (angl. cost of transport (COT)) galima gauti roboto suvartojamos energijos kiekio ar galios santykį su jo mase bei judėjimo greičiu arba nueitu atstumu:

$$COT = \frac{E}{mgd} = \frac{P}{mgv}, \quad (1.2)$$

čia E – bendra sistemos suvartota energija, P – suvartojama galia, m – sistemos masė (įskaitant papildomą krovinį), g – laisvojo kritimo pagreitis, d – roboto nueitas kelias, v – roboto judėjimo greitis.

Transportavimo kaštai parodo, kiek energijos reikia suvartoti, norint nugabenti tam tikros masės kūną, tam tikru atstumu arba kokia galia reikalinga tam tikros masės kūnui judėti tam tikru greičiu. Todėl toks metodas yra taikomas labai plačiai: gyvūnų, vabzdžių, automobilių, paukščių, žuvų, didesnių mobiliųjų robotų (J. Nishii 1998, A. G. G. Rodriguez *et. al.* 2014) bei mikro robotų (P. Birkmeyer *et. al.* 2009, A. T. Baisch *et. al.* 2014) energetinio efektyvumo skaičiavimui. Kai kuriuose šaltiniuose transportavimo kaštai dar vadinami „specifine varža“ (B. S. Lin *et. al.* 2001, U. Saranlı *et. al.* 2001, P. Arena *et. al.* 2006, D. S. Merodio *et. al.* 2012) arba mechaniniais transportavimo kaštais (angl. mechanical cost of transport (cmt)) (O. S. Kwon *et. al.* 2012) ir skaičiuojamas pagal tokią pačią formulę kaip (1.2).

Kitas būdas energijos šaŅaudoms įvertinti yra mechaninis metodas, kai matuojami visų LL (pavaru) momentai (F. Yamasaki *et. al.* 2002, A. C. Amran *et. al.* 2013). Mechaninę galią apskaičiuoti galima integruojant

pavaros momento ir sąnario kampinio greičio sandaugą (J. Estremera *et. al.* 2008):

$$W = \int_{t=0}^{t=T} \tau(t) \cdot \omega(t) dt, \quad (1.3)$$

čia $\tau(t)$ – LL momentas, $\omega(t)$ – LL kampinis greitis, t – laikas, T – kojos ciklo periodas.

Kaip matyti iš šaltinio (J. Estremera *et. al.* 2008), tiek mechaninė, tiek elektrinė energijos sutampa, jei pavarų naudingumo koeficientas prilyginamas 1, todėl formulių (1.1) ir (1.3) dešiniojos pusės yra lygios, todėl:

$$E = \int u(t) \cdot i(t) dt = \int \tau(t) \cdot \omega(t) dt. \quad (1.4)$$

Kai kuriose dinaminėse sistemose yra naudojami tiesiaeigiai varikliai ar pavaros, todėl sukamojo momento tokiose sistemose nėra ir energijos skaičiavimas pagal (1.4) formulę yra netinkamas. Tokiu atveju pilnutinę pavaros energiją galima apskaičiuoti integruojant veikiančios jėgos ir fiksuoto taško koordinatės sandaugą (B. Vanderborght *et. al.* 2009):

$$E = \int |F \cdot x| dt, \quad (1.5)$$

čia E – linijinės pavaros energija, F – tašką veikianti jėga, x – fiksuoto taško koordinatė, t – laikas.

Dar vienas metodas energijos šaŅaudų matavimui yra kinetinės energijos skaičiavimas. Daugumai robotų naudojamos sukamojo judesio pavaros, todėl kinetinę pavaros energiją galima apskaičiuoti pagal pavaros inercijos ir kampinio greičio sandaugą (S. Kim *et. al.* 2006):

$$E_k = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2, \quad (1.6)$$

čia E_k – vienos pavaros kinetinė energija, I – pavaros inercija, ω – kampinis pavaros greitis.

Kai kuriais atvejais vien kinetinės energijos įvertinimo neužtenka, todėl yra skaičiuojama ir potencinė sistemos energija. Vieno LL potencinę energiją galima apskaičiuoti kaip tos dalies masės, masės centro taško aukščio ir laisvojo kritimo pagreičio sandaugą (Z. Wang *et. al.* 2011):

$$E_p = m \cdot g \cdot h, \quad (1.7)$$

čia E_p – vienos pavaros potencinė energija, m – pavaros masė, g – Žemės traukos pagreitis, h – pavaros masės centro taško aukštis.

Tiek kinetinės energijos išraiška (1.6), tiek potencinės energijos išraiška (1.7) yra pateiktos vienam roboto LL. Robotikoje visada reikalinga sistemos pilnutinė energija, kuri susideda iš visų jungiamųjų dalių suvartojamos energijos kiekio. Žinant tai, pastarąsias išraiškas galima perrašyti taip:

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_i \cdot \omega_i^2, \quad (1.8)$$

$$E = \sum_{i=1}^N m_i \cdot g \cdot h_i, \quad (1.9)$$

čia E – pilnutinė sistemos energija, I_i – i -tojo roboto LL inercija, ω_i – i -tojo LL kampinis greitis, m_i – i -tojo LL masė, g – Žemės traukos pagreitis, h_i – i -tojo LL masės centro aukštis, N – LL skaičius.

Tarpusavyje energijos matavimo ir skaičiavimo metodai nesusiję, nes kiekvienas metodas reikalauja skirtingų matavimo priemonių ir skaičiavimo parametrų. Apibendrinus, suvartojamos energijos matavimo metodas priklauso nuo roboto konstrukcijos. Jei robotas maitinamas iš elektros srovės šaltinio ir yra galimybė pamatuoti šiuos parametrus, gali būti taikomi elektros srovės stiprio matavimo metodai. Jie pasižymi tikslumu ir paprastumu, nes šaltinio įtampas kitimą taip pat galima išmatuoti, o daugiausia kinta tik elektros srovės stipris ir laikas – lengvai išmatuojami dydžiai. Jei tiesioginių energijos sąnaudų išmatuoti nėra įmanoma, tenka taikyti energijos įvertinimo metodus, susijusius su jėgų ir momentų matavimu. Šie metodai taip pat yra pakankamai tikslūs, tačiau nėra galimybės įvertinti roboto valdymo sistemos suvartojamos energijos kiekio.

1.3. Energijos sąnaudų minimizavimo metodai

Iki šiol jau buvo atliktas nemažas kiekis tyrimų siekiant minimizuoti robotų energijos sąnaudas ar optimizuoti judėjimą, kad būtų suvartojamas minimalus energijos kiekis. Tai daroma tam, kad robotų (ypač vaikščiojančių) darbo laikas būtų kuo didesnis, nes autonomiškumas reikalauja pakankamai didelio energijos rezervo. Kitu atveju robotai bus nepajėgūs atlikti jiems užduotų darbų ar tyrimų arba darbo metu išsijungs nebaigę užduoties.

Idealiu atveju, robotui judant lygiu horizontaliu paviršiumi, jėgos ir greičio kryptys nesutampa ir dėl to robotas turėtų suvartoti labai mažą energijos kiekį (tik judėjimo impulsui sukurti). Tačiau iš tikrųjų yra žinoma, kad net ir judant lygiu paviršiumi robotai vartoja energiją (K. Yoneda *et. al.* 2003). Tai susiję su trintimi, oro pasipriešinimu, energijos keitimo nuostoliais ir panašaus pobūdžio priežastimis, tačiau patvirtina, kad energijos sąnaudų minimizavimas vaikščiojantiems robotams yra aktualus uždavinys.

Vienas iš žinomų metodų minimizuoti roboto energijos sąnaudas yra tinkamas jėgų paskirstymas roboto pėdose, kad visos pavaros vartotų minimalų energijos kiekį (D. W. Marhefka *et. al.* 1998). Tokiame metode įskaitytas vidinių jėgų minimizavimas, jungiamųjų dalių momentų minimizavimas ir sistemos galios minimizavimas ir yra sprendžiamas taikant atitinkamas

optimizavimo metodus. Tačiau šis metodas nėra visapusiškai geras, nes tais atvejais, kai roboto judėjimas yra pagrįstas ribinėmis vertėmis (pvz. maksimalus kojos aukštis, pėdos koordinatė neatitinka roboto kojos darbo zonos), užprogramuotos funkcijos duoda priešingą rezultatą (gali būti gaunama begalinė parametro vertė).

Energijos sąnaudų minimizavimui taip pat aktualu roboto konstrukcija. Mažinant konstrukcinių detalių ir pavarų skaičių arba keičiant jas tam tikromis kitomis lengvesnėmis dalimis mažėja roboto masė (D. W. Marhefka *et. al.* 1998). Kaip buvo nagrinėta 1.2 poskyryje, energijos sąnaudos stipriai priklauso nuo viso roboto masės, todėl, minimizuojant roboto konstrukciją galima pasiekti teigiamų rezultatų. Vienas iš vaikščiojančių robotų pavyzdžių, kur robotas konstruojamas naudojant minimalų pavarų skaičių ir detalės parenkamos mažesnio tankio medžiagos (pvz. titanas, aliuminis, plastikas, silikonas, guma) yra „Rhex“ šešiakojis robotas, kuris turi tik šešias pavaras (U. Saranlı *et. al.* 2001, J. D. Weingarten *et. al.* 2004). Tačiau ne visais atvejais tinka naudoti mažą pavarų skaičių, nes nuo to priklauso LL skaičius ir roboto lankstumas. Taip pat ir mažesnio tankio medžiagos ne visada yra tinkamos. Kai kuriais atvejais robotas turės kelti/nešti sunkius daiktus ar tvirtai įsikibti į paviršių, todėl yra didelė tikimybė, kad elastingos ir lengvos medžiagos greitai skils ar lūš, todėl įvyks roboto gedimas.

Panašus eksperimentas mažinant roboto pavarų skaičių ir renkantis tik energetiškai efektyvius elektronikos komponentus buvo atliktas su „Ranger“ robotu, kuris turi tik penkias pavaras (P. A. Bhounsule *et. al.* 2014). Šis robotas vienu akumuliatorių baterijos įkrovimu nuėjo net 65 km atstumą per 31 val. Toks rezultatas buvo pasiektas ne vien mažinant pavarų skaičių, bet ir atliekant judėjimo trajektorijos optimizavimą matematinio modeliavimo aplinkoje ne realiu laiku. Buvo pasiekta, kad didžiąją dalį energijos suvartoja ne pavaros, o jutikliai ir kiti elektronikos komponentai bei mechaninis darbas.

Pavarų skaičių galima mažinti iki nulio. Tokie robotai egzistuoja ir jie vadinami pasyviais vaikščiotojais (angl. passive walkers). Tai yra robotai, kurie neturi nei valdymo sistemos, nei pavarų, nei jutiklių. Būtent dėl šių priežasčių jie pasižymi itin dideliu energetiniu efektyvumu (D. G. E. Hobbelen *et. al.* 2008). Tačiau neturint nei vienos pavaros, judėjimui sukurti būtina nuožulni plokštuma, ir tokie robotai negeba kompensuoti išorinių veiksnių, tokių kaip oro pasipriešinimo, vėjo, įvairių trikdymų. Taigi tai rodo, kad sukurti robotus be pavarų yra itin sudėtingas uždavinys.

Kitas energijos sąnaudų minimizavimo būdas yra pateiktas šaltinyje (R. J. Lock *et. al.* 2009). Čia rašoma, kaip atlikti roboto kūrimo optimizavimą atliekant įdėmius pasyvaus stabilumo ir aktyvaus vaikščiojimo atsižvelgiant į energijos sąnaudas stebėjimus. Šio metodo privalumas yra tai, kad energijos sąnaudos yra įvertinamos dar prieš konstruojant robotą. Yra numatoma, kaip kis

energijos šaŅaudos keičiantis roboto stabilumui bei judėjimo parametrams. Nėra pilnai įmanoma įvertinti visus veiksnius ir pokyčius bei sąryšius su išorinėmis jėgomis, todėl šis metodas yra tik dalinai veiksmingas.

Kaip jau žinoma, vaikščiojančių robotų energijos šaŅaudos atsiranda dėl didelio pavarų skaičiaus lyginant su važiuojančiais robotais. Taigi konstruojant ratus ant roboto pėdų galima gauti pusiau važiuojantį, pusiau vaikščiojantį robotą. Toks metodas buvo išbandytas ant Cassino šešiakojo roboto (G. Carbone *et. al.* 2008). Parenkant tinkamą kojų konfigūraciją, vaikščiojantis robotas gali elgtis kaip važiuojantis ir judant lygiu paviršiumi tokiu būdu pasiekiamas didelis energetinis efektyvumas. Pagrindinė šio metodo savybė yra universalumas (robotas gali elgtis kaip dviejų skirtingų rūšių robotai). Tačiau iš tikrųjų toks robotas nėra pilnai nei važiuojantis, nei vaikščiojantis ir negali turėti visų vienos ar kitos rūšies privalumų.

Energijos šaŅaudas taip pat galima minimizuoti kuriant robotus, panašius į biologinius organizmus. Tai yra patogu todėl, kad gamtoje gyvūnai ir vabzdžiai išsiugdė idealius judėjimo ir prisitaikymo metodus, kurie puikiai padeda jiems išgyventi. Norint pilnai nukopijuoti gyvūnus ar vabzdžius, reikalingas didelis pavarų skaičius ir sudėtingas valdymo algoritmas, kad būtų gautas toks pat roboto lankstumas ir prisitaikymas. Tačiau tokiu būdu kuriami robotai turi itin didelį LL skaičių, kurio jie nesugeba optimaliai kontroliuoti, o didelis pavarų skaičius lemia dideles energijos šaŅaudas (M. F. Silva *et. al.* 2011).

Konstrukcijos atžvilgiu energijos šaŅaudų minimizavimui stipriai padeda ir konstrukcinių detalių keitimas į elastingas medžiagas, pvz. kojas, kojų jungiamąsias dalis keičiant spyruoklėmis ir panašiai (J. Ackerman *et. al.* 2011). Naudojant elastingas medžiagas roboto masę, kurią gali sudaryti elektronikos, baterijos ir kūno masė, judėjimo metu galima kompensuoti tamprumu (J. Ackerman *et. al.* 2013). Žinoma, tokių medžiagų naudojimas padaro robotinę sistemą mechaniškai sudėtingesne, didėja būtinų detalių skaičius, todėl didėja ir roboto masė.

Yra žinoma, kad palaikymo fazė yra labiausiai energetiškai nuostolingas etapas eisenos metu. Todėl energijos šaŅaudos tampa susijusios ir su vaikščiojančių robotų kojų konfigūracija (T. Zielinska 2015). Priklausomai nuo kojos dalių ilgių, galimų žingsnio ilgių, stovėsenos, kūno pakėlimo aukščio, keičiasi suvartojamas roboto energijos kiekis. Taigi keičiant roboto kojos konstrukciją galima sumažinti suvartojamą energijos kiekį. Toks metodas yra gana paprastas ir nereikalauja papildomų priemonių (jutiklių, pavarų), tačiau reikalauja papildomų skaičiavimo ir optimizavimo metodų, kurie leistų rasti tinkamiausias konfigūracijas.

Roboto darbo laiką praplėsti galima ne vien minimizuojant energijos šaŅaudas, bet sudarant papildomą valdymo algoritmą roboto grįžimui įkrauti bateriją arba ją pasikeisti kita (J. Wu *et. al.* 2012). Toks metodas reikalauja

įkrovimo stotelės, stumdymo mechanizmo ir užrakinimo mechanizmo. Privalumas yra tai, kad roboto tipas nėra svarbus: gali būti važiuojantis, vikšrinis, vaikščiojantis. Kad vyktų tikslesnis roboto prisišvartavimas prie aptarnavimo stotelės, roboto priekyje montuojama kamera, o baterija yra lengvai atjungiamo ir pritaisyta taip pat roboto priekyje. Šio metodo rezultatai rodo, kad visa baterijos keitimo operacija trunka ~84 sekundes ir tai reiškia, kad robotui nereikia laukti kelių valandų, kol baterija bus pilnai įkrauta. Toks metodas stipriai prailgina roboto veikimo laiką ir nereikalauja didelio žmogaus įsikišimo į roboto darbą.

Panašus metodas roboto įkrovimui buvo sukurtas mokslininkų G. Parker ir R. Zbeda, kurie pasiūlė pritaikyti genetinį algoritmą, kuris leistų robotui rasti informaciją, susijusią su baterijos įkrovimu. Gautą informaciją robotas pritaiko rasti baterijos įkrovimo stotelę ir grįžti į ją (G. Parger *et. al.* 2014). Robotas aprūpintas didelės talpos kondensatoriais, kad užtikrintų maksimalų efektyvumą. Tačiau pagrindinis tokio metodo trūkumas yra tai, kad sunku nustatyti ribą, kiek laiko robotas turi dirbti, o kada jau nutraukti darbą ir judėti link įkrovimo stotelės, kad likusios energijos užtektų nukeliauti iki įkrovimo stotelės. Tačiau genetinis algoritmas stipriai pagerina visą metodo veikimą ir rodo, kad jo pritaikymas gali duoti teigiamų rezultatų.

Yra ir kitų būdų kaip prailginti roboto darbo laiką. Pavyzdžiui, mokslininkai Y. He, Z. You ir X. Wang pasiūlė patobulinti hibridinę energijos sistemą (HES), kuri realiu laiku kaupia ir tiekia saulės energiją robotui (Y. He *et. al.* 2013). Sistemos struktūra yra sąlyginai paprasta; jai reikalinga saulės baterija, pjezoelektrinis generatorius, ličio jonų baterija ir superkondensatorius. Tinkamai sudarius elektrines principines schemas galima sukonstruoti pagerintą įprastos energijos sistemos variantą. Tokiam metodui realizuoti nereikia tobulinti roboto valdymo programos ar įdiegti papildomų skaičiavimo metodų.

Nenaudojant įvairių mechaninių ar elektroninių priemonių energijos šaŅaudų minimizavimas gali būti atliktas pasinaudojant kelio planavimo metodais. Kai turimas konkretus roboto modelis be papildomų priemonių ir jam reikia išvažinėti tam tikrą paviršiaus plotą, tinkamas judėjimo planavimas gali pagerinti ne tik energetinį efektyvumą, bet ir judėjimo paklaidas (I. A. Hameed 2014, H. Kim *et. al.* 2014). Kelio planavimas leidžia ne tik tinkamai planuoti judėjimo trajektoriją lygiu keliu, bet ir nelygiu paviršiumi, kur yra kalnuotos ir duobėtos vietos. Pagrindinis privalumas yra tai, kad kelio planavimas gali būti suderintas su kitais energijos šaŅaudų minimizavimo metodais (kaip papildoma priemonė) ir tarpusavyje metodai nepakenks vienas kitam. Tačiau kelio planavimas yra sudėtingas matematinis procesas, kuris reikalauja didelio valdymo sistemos pajėgumo, o tai gali padidinti energijos šaŅaudas.

Kelio planavimo metodus galima derinti, pavyzdžiui, su genetiniais algoritmais. Toks tyrimas buvo atliktas I. Chaari, A. Koubaa, S. Trigui,

H. Bennaceur, A. Ammar ir K. Al-Shalfan mokslininkų naudojant mažą važiuojantį robotą (I. Chaari *et. al.* 2014). Derinant genetinį algoritmą kartu su skruzdžių kolonijos optimizavimo metodu (angl. ant colony optimization (ACO)) mokslininkų grupė pastebėjo, kad galima paimti privalumus tiek iš vieno metodo, tiek iš kito. Metodų derinimas davė puikius rezultatus minimizuojant energijos sąnaudas, užduoties atlikimo laiką ir kelio radimo tikimybę.

Kai kurie robotų veiksmai ir darbai gali reikalauti itin didelio energijos kiekio, pavyzdžiui judėjimas nelygiu paviršiumi ar šokinėjimas, kad įveiktų neperlipamas kliūtis. Tokiais atvejais energijos suvartojimas turi būti įdėmiai stebimas, kitaip per dideli energijos impulsai gali pakenkti robotui, pavyzdžiui, gali būti sugadinti roboto elektronikos komponentai ar valdymo sistema. Šaltinyje (H. Chai *et. al.* 2016) aprašyta, kaip tinkamai planuoti šokinėjimo parametrus, kad būtų sunaudojamas minimalus energijos kiekis. Buvo pastebėta, kad energijos kiekis į sistemą turi būti paduodamas pagal norimą šokimo aukštį. Gaunama, kad robotas gali pašokti į reikiamą aukštį nesuvartodamas didesnio energijos kiekio nei iš tikrųjų reikia.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus literatūros analizę disertacijos tema buvo patvirtinta, kad darbo įvade iškelti uždaviniai lieka neišspręsti ir aktualūs. Taip pat buvo padarytos šios išvados:

1. Viena iš svarbiausių vaikščiojančių robotų problemų yra didelės energijos sąnaudos, kurios dažniausiai atsiranda dėl didelio pavarų skaičiaus ar netinkamos roboto konstrukcijos (pvz. per didelė roboto masė). Šios problemos sprendimas yra aktualus ir leistų plačiau taikyti vaikščiojančius robotus atliekant realias užduotis.
2. Pagrindinis vaikščiojančių robotų privalumas lyginant su važiuojančiais ar vikšriniais robotais yra galimybė judėti nelygiais, žmogui sunkiai prieinamais, paviršiais, siekiant atlikti sudėtingas ir pavojingas užduotis, tokias kaip išminavimas, gelbėjimo operacijos, planetų paviršiaus tyrimai, povandeninės užduotys.
3. Išsamūs energijos sąnaudų tyrimai robotui įveikiant įvairias kliūtis yra svarbus uždavinys, nes pagrindinis vaikščiojančių robotų privalumas yra galimybė judėti nelygiais paviršiais. Taigi roboto

gebėjimas judėti per kliūtis stipriai pagerintų vaikščiojančių robotų efektyvumą.

4. Iki šiol nėra nustatyta, kaip vaikščiojančių robotų energijos sąnaudos siejasi su paviršiaus nelygumais, todėl yra sunku rasti tinkamiausią metodą energijos sąnaudų minimizavimui robotui judant nelygiu paviršiumi. Prieš sprendžiant energijos sąnaudų optimizavimo uždavinį, būtina sukurti metodiką, leidžiančią nustatyti, kaip kinta roboto energijos sąnaudos keičiantis paviršiaus tipui ar kliūčių dydžiui.

5. Skirtingi energijos sąnaudų minimizavimo metodai gali būti taikomi tik konkrečioms mobiliems robotams. Tačiau nagrinėtuose šaltiniuose nėra aprašytų metodų, teikiančių informaciją apie bendrą roboto efektyvumą, o sukurti metodai nėra taikytini visoms robotų rūšims. Atliekant išsamius energijos sąnaudų tyrimus robotui judant paviršiais su skirtingo dydžio ir tankio kliūtimis būtų galima sukurti bendrą energijos sąnaudų minimizavimo metodą, tinkantį robotams su bet koku kojų skaičiumi.

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Sudaryti šešiakojo roboto imitacinę ir fizinę modelius bei pėdų trajektorijų generavimo matematinės išraiškas kliūčių perlipimui.
2. Ištirti roboto energijos sąnaudas ir jas lemiančius veiksnius judant lygiu paviršiumi ir įvertinti judėjimo nuokrypius nuo numatytos judėjimo trajektorijos žingsniuojant paviršiais su įvairaus dydžio ir tankio kliūtimis.
3. Sudaryti ir ištirti pėdų trajektorijų generavimo metodą, leidžiantį parinkti žingsnio parametrus siekiant minimizuoti energijos sąnaudas.
4. Ištirti roboto energijos sąnaudų priklausomybę nuo kliūčių dydžio ir tankio aplinkoje, taikant sudarytą pėdų trajektorijų generavimo metodą.

Energetiškai efektyvaus judėjimo metodų sudarymas

Šiame skyriuje sudaromi darbe naudojamo šešiakojo roboto matematinis ir fizinis modeliai, aprašomos eisenos ir pėdų trajektorijų generavimo metodas, skirtas judėjimui lygiu paviršiumi. Taip pat pateikiamas fizinio roboto struktūros ir valdymo sistemos aprašymai. Skyriuje taip pat pateikiamas matematinio roboto modelio sudarymas *MATLAB*[®] programos aplinkoje, kuris leidžia patikrinti roboto ir jo funkcijų veikimą.

Skyriuje pateikiamas nelygaus paviršiaus klasifikavimo modelio sudarymas. Pateikiami nelygaus paviršiaus ir kliūčių apibrėžimai. Kliūtys klasifikuojamos pagal dydį bei atsižvelgiant į šešiakojo vaikščiojančio roboto dydį.

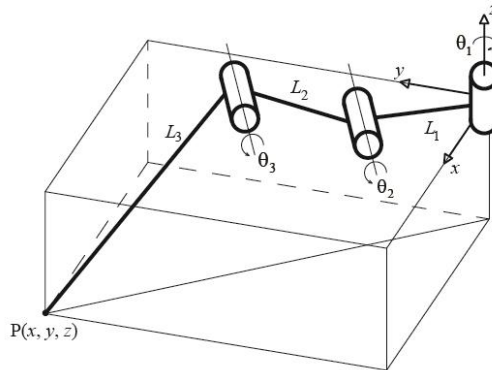
Taip pat pateikiami kliūčių aptikimo ir perlipimo metodų sudarymas. Aprašomi taktiliniai kojų jutikliai būtini kliūčių aptikimui aplinkoje. Pėdų trajektorijų generavimo metodas patobulinamas integruojant galimybę keisti ne tik žingsnio aukštį ir ilgį, bet ir žingsnio plotį.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus moksliniai straipsniai (T. Luneckas, M. Luneckas, D. Udris 2013; M. Luneckas, T. Luneckas, D. Udris 2013; D. D. Esteban, M. Luneckas, T. Luneckas, J. Kriaučiūnas, D. Udris 2016; A. Skaburskytė, M. Luneckas, T. Luneckas, J. Kriaučiūnas, D. Udris 2016).

2.1. Šešiakojo roboto matematinio ir fizinio modelių sudarymas

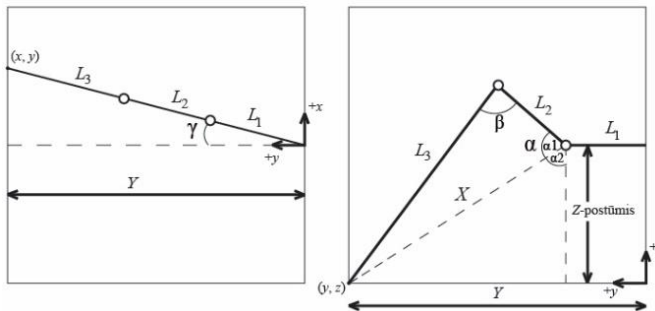
Tyrimų objektas – šešiakojis vaikščiojantis robotas, kuris ant kiekvienos kojos turi po 3 LL. Tai yra standartinio tipo robotas, todėl matematiniam modeliui sudaryti naudojamas trigonometrinis metodas, kuriuo naudojantis yra paprasta išvesti atvirkštinės kinematikos lygtis, naudojamas roboto judėjimui valdyti.

Roboto kojos struktūra pavaizduota 2.1 paveiksle. Pirmasis sąnarys, kuris vadinamas klubo (lot. coxa) dalimi yra skirtas kojos judėjimui (x, y) plokštumoje valdyti. Antrasis ir trečiasis sąnariai (šlaunies (lot. femur) ir blauzdos (lot. tibia) dalys) yra skirti kojos judėjimui z ašimi valdyti. Kojos pėdos padėtis erdvėje 2.1 paveiksle pavaizduota kaip taškas $P(x, y, z)$. Šis taškas priklauso nuo visų trijų koordinatinių. Geriausias būdas spręsti šį uždavinį yra išskaidyti trijų matmenų trigonometriją į dviejų matmenų projekcijas, kaip pateikta 2.2 paveiksle.



2.1 pav. Darbe naudojamo šešiakojo roboto kojos kinematinis modelis

Fig. 2.1. Kinematic model of hexapod robot leg used in the thesis



2.2 pav. 3 LL roboto kojos kinematinio modelio projekcijos į xy ir yz plokštumas

Fig. 2.2. Projection of 3-DOF robotic leg kinematic model to xy and yz planes

Kad roboto koja būtų pilnai valdoma atvirkštinės kinematikos būdu, reikia rasti kampus α , β ir γ (2.2 pav.). Iš kairiosios 2.2 paveikslo pusės nesunku nustatyti, kad kampas γ išreiškiamas taip:

$$\frac{x}{y} = \tan(\gamma) \rightarrow \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right), \quad (2.1)$$

čia x – kojos ilgio projekcija į x koordinačių ašį, y – kojos ilgio projekcija į y koordinačių ašį.

Belieka rasti kampus α ir β . Tam reikės nagrinėti 2.2 paveikslo dešiniąją dalį. Matoma, kad abu kampai yra toje pačioje plokštumoje, tačiau kampą α rasti yra pakankamai keblu. Kampą α reikia išskaidyti į kampus α_1 ir α_2 . Dabar galima rasti kampą α_1 randant ilgį Y :

$$Y = \sqrt{Z_{\text{nuokrypa}}^2 + (X - L_1)^2}, \quad (2.2)$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1}\left(\frac{Z_{\text{nuokrypa}}}{X}\right). \quad (2.3)$$

Norint surasti α_2 , reikia pasinaudoti kosinusių teorema:

$$\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c}, \quad (2.4)$$

$$\cos B = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2 \cdot a \cdot c}, \quad (2.5)$$

$$\cos C = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2 \cdot a \cdot b}. \quad (2.6)$$

čia a , b ir c – bet kokio trikampio kraštinių ilgiai, A , B ir C – šio trikampio kampai.

Žinant visas trikampio kraštines iš 2.2 paveikslo galima rasti α_2 kampą:

$$L_3^2 = L_2^2 + X^2 - 2 \cdot (L_2) \cdot X \cdot \cos(\alpha_2), \quad (2.7)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1}\left(\frac{L_3^2 - L_2^2 - X^2}{-2 \cdot (L_2) \cdot X}\right). \quad (2.8)$$

Žinoma, kad $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$. Dabar galima rasti galutinę kampo α išraišką iš formulių (2.3) ir (2.8):

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{Z_{\text{nuokrypa}}}{X}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{L_3^2 - L_2^2 - X^2}{-2 \cdot (L_2) \cdot X}\right). \quad (2.9)$$

Kampą β galima išreikšti iš šios lygties:

$$X^2 = L_3^2 + L_2^2 - 2 \cdot (L_3) \cdot (L_2) \cdot \cos(\beta), \quad (2.10)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{X^2 - L_3^2 - L_2^2}{-2 \cdot (L_3) \cdot (L_2)} \right). \quad (2.11)$$

Pakeitus LL kampų žymėjimą galima gauti bendras atvirktinės kinematikos išraiškas. Klubo, šlaunies ir blauzdos dalių ilgiai jau yra žinomi ir žymimi L_1 , L_2 ir L_3 . Klubo dalies kampas yra γ , šlaunies dalies kampas – α , o blauzdos dalies kampas – β . Pervadinus šiuos kampus kaip klubo, šlaunies ir blauzdos kampus θ_1 , θ_2 ir θ_3 atitinkamai, lygtis (2.1), (2.9) ir (2.11) galima perrašyti bendrąja forma:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{x}{y} \right), \quad (2.12)$$

$$\theta_2 = f_1 + f_2, \quad (2.13)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{L_3^2 + L_2^2 - B^2}{-2 \cdot L_3 \cdot L_2} \right), \quad (2.14)$$

čia:

$$B = \sqrt{l_4 + z^2}, \quad (2.15)$$

$$l_4 = \sqrt{x^2 + y^2} - L_1, \quad (2.16)$$

$$f_1 = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 + B^2}{2 \cdot L_3 \cdot B} \right), \quad (2.17)$$

$$f_2 = \sin^{-1} \left(\frac{z}{B} \right). \quad (2.18)$$

Matematiniam šešiakojo roboto modeliui sudaryti lygčių (2.12)–(2.18) nepakanka, nes nėra žinomi visų kojų postūmiai ir posūkiai kūno masės centro atžvilgiu, o taip pat reikia žinoti roboto kūno formą bei kūno ir kojų matmenis.

Visų pirma buvo sudaryta transformacijų matrica. Transformacijų matricoms sudaryti buvo naudojamas Denavito-Hartenbergo (D-H) kinematikos metodas. Tam buvo sudaroma D-H parametrų lentelė (2.1 lentelė).

2.1 lentelė. Denavito-Hartenbergo parametrų lentelė 3 LL roboto kojai

Table 2.1. Denavit-Hartenberg parameters for 3-DOF robotic leg

j	θ	d_j	a_j	α_j	Σ	P
1	θ_1	0	L_1	$\pi/2$	0	0
2	θ_2	0	L_2	0	0	$-\pi/6$
3	θ_3	0	L_3	0	0	$2\pi/3$

2.1 lentelėje j – žymi LL (pavaras), θ_j – LL kampus, d_j – LL prailginimus, a_j – sąnarių ilgius, α_j – LL posūkius, Σ – LL tipą, P – LL postūmius.

Turint D-H parametrus galima sudaryti transformacijos matricas kiekvienam sąnariui:

$$A_1 = \begin{pmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & L_1 \cdot \cos q_1 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & L_1 \cdot \sin q_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.19)$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & L_2 \cdot \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & L_2 \cdot \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.20)$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & L_3 \cdot \cos q_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & L_3 \cdot \sin q_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.21)$$

čia A_1 , A_2 ir A_3 – 1, 2 ir 3 LL (klubo, šlaunies ir blauzdos) transformacijos matricos atitinkamai.

Žinoma, kad bendra transformacijos matrica T_3^0 išreiškiama naudojant D-H transformacijos matricas:

$$T_3^0 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3. \quad (2.22)$$

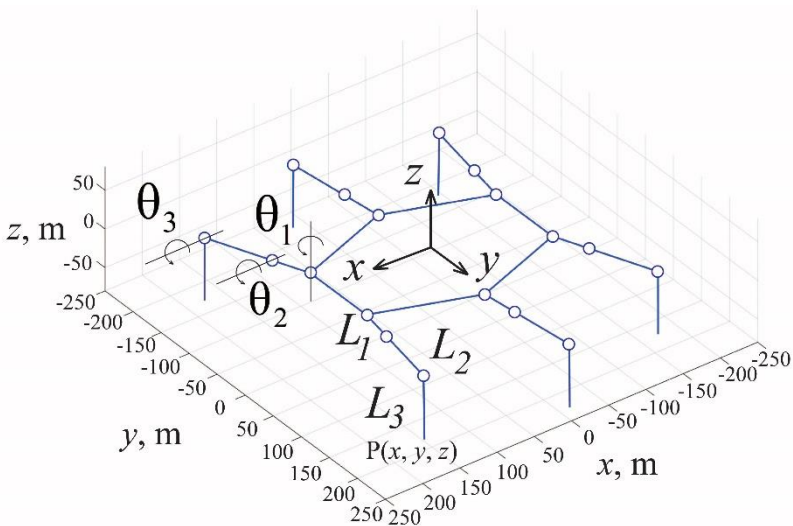
Ištačius lygtis (2.19)–(2.21) į lygtį (2.22), gaunama galutinė transformacijos matrica:

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_{123} - c_1 s_{23} & -c_{12} s_3 - c_{13} s_2 & s_1 & L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} - L_3 c_1 s_{23} \\ c_{23} s_1 - s_{123} & -c_2 s_{13} - c_3 s_{12} & -c_1 & L_1 s_1 + L_2 c_2 s_1 + L_3 c_{23} s_1 - L_3 s_{123} \\ c_2 s_3 + c_3 s_2 & c_{23} - s_{23} & 0 & L_2 s_2 + L_3 c_2 s_3 + L_3 c_3 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

čia $s_1 - \sin(\theta_1)$, $s_2 - \sin(\theta_2)$, $s_3 - \sin(\theta_3)$, $s_{12} - \sin(\theta_1 + \theta_2)$, $s_{13} - \sin(\theta_1 + \theta_3)$, $s_{23} - \sin(\theta_2 + \theta_3)$, $s_{123} - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$, $c_1 - \cos(\theta_1)$, $c_2 - \cos(\theta_2)$, $c_3 - \cos(\theta_3)$, $c_{12} - \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $c_{23} - \cos(\theta_2 + \theta_3)$, $c_{123} - \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$.

Šešiakojo roboto kūnas pasirinktas šešiakampis su statiškai stabiliais parametrais (D. D. Esteban *et. al.* 2016): 20° kampinių kojų posūkiiai ir 0,45 m postūmiai vidurinėms kojoms. Šešiakojo roboto kinematinis modelis

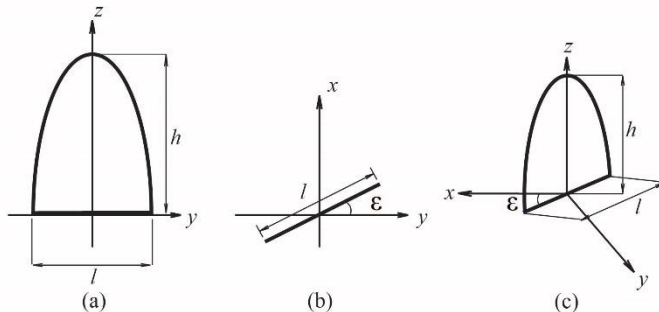
MATLAB[®] programos aplinkoje pavaizduotas 2.3 paveiksle. Kūno plotis – 0,1 m priekinėje ir galinėje dalyse, 0,19 m – viduryje. Roboto kūno ilgis yra 0,25 m. Kojų dimensijos yra šios: L_1 , L_2 ir L_3 yra 0,052 m, 0,082 m ir 0,1 m atitinkamai. Platesnis šešiakojo roboto imitacinio modelio sudarymo aprašymas pateiktas šaltiniuose (T. Luneckas *et. al.* 2011, T. Luneckas *et. al.* 2012).



2.3 pav. Šešiakojo roboto kinematinis modelis MATLAB[®] programos aplinkoje
Fig. 2.3. Hexapod robot kinematic model inside MATLAB[®] program

Roboto judėjimui reikalingas pėdų trajektorijų generavimas. Pėdų trajektorijų generavimui sudaryti buvo koreguojamos ankstesniame darbe sudarytos pėdų trajektorijos (T. Luneckas 2013). Trajektorijos projekcijos zy ir xy plokštumose pavaizduotos 2.4 paveiksle. Kaip matyti iš 2.4 paveikslo, zy plokštumoje pėdos judėjimas yra sinusoidės bangos formos. Tokia forma leidžia keisti roboto žingsnio ilgį, aukštį bei judėjimo kryptį. Tačiau norint tinkamai sudaryti pėdų trajektorijas, reikia išskaidyti projekcijas į atskiras koordinačių priklausomybes nuo laiko. Siekiant patobulinti ankstesnes pėdų trajektorijas buvo atlikti keli esminiai pakeitimai. Ankstesnių pėdų trajektorijų x koordinatė atitikdavo roboto judėjimą į šonus, o y koordinatė – pirmyn ir atgal. Toks pasirinkimas buvo netinkamas, nes dažnai koordinatės būdavo sumaišomos, todėl įvykdavo roboto gedimas dėl blogai suskaičiuotų atvirkštinės kinematikos verčių. Šiame darbe sudarant atskirų koordinačių priklausomybes nuo laiko, x ir y koordinatės buvo sutapatintos su standartiniu koordinačių sistemos žymėjimu, siekiant suvienodinti realaus roboto vaikščiojimą su matematinio modeliavimo aplinkoje esamo roboto vaikščiojimu. Šis pakeitimas taip pat leidžia laisviau

valdyti roboto kojų judėjimus pirmyn-atgal ir į šonus. Kitas pakeitimas: buvo sukeistos x ir y koordinatinių lygtys. Roboto valdymas yra paprastesnis, kai x koordinatė atitinka kojų judėjimą į priekį ir atgal, o taip pat toks žymėjimas yra vizualiai patogesnis. Atskirų koordinatinių priklausomybės nuo laiko pavaizduotos 2.5 paveiksle.



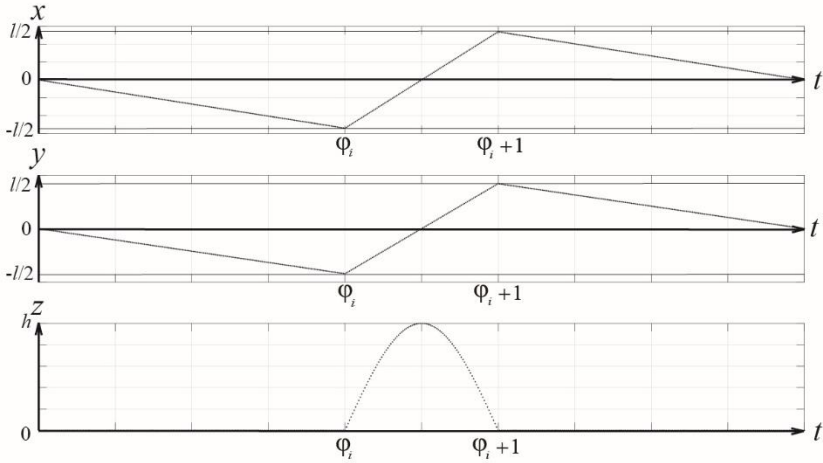
2.4 pav. Roboto pėdos trajektorijos projekcijos į zy plokštumą (a), į xy plokštumą (b) ir erdvinis vaizdas (c); l – žingsnio ilgis, h – žingsnio aukštis, ε – judėjimo kryptis. Čia žingsnio plotis $w = 0$ m

Fig. 2.4. Robot's foot trajectory projections into zy plane (a), xy plane (b), and spatial view (c); l – step length, h – step height, ε – stride direction. Here step width $w = 0$ m

2.5 paveikslas vaizduoja pėdos trajektorijos atskirų koordinatinių priklausomybes nuo laiko. Akivaizdu, kad $x(t)$ ir $y(t)$ priklausomybės yra tokios pačios. Remiantis 2.5 paveikslu, galima išskirti tris atvejus: kai laiko momentas yra lygus arba mažesnis nei kojos perkėlimo fazė, kai laiko momentas yra didesnis nei kojos perkėlimo fazė, bet lygus arba mažesnis nei perkėlimo fazė pridėjus laiko vienetą ir kai laiko momentas yra didesnis nei kojos perkėlimo fazė pridėjus laiko vienetą.

- $t \leq \varphi_i$;
- $\varphi_i < t \leq \varphi_i + 1$;
- $t > \varphi_i + 1$.

Pirmuoju ir trečiuoju atveju, roboto koja yra palaikymo fazėje (pastatyta ant paviršiaus) ir stumiasi atgal. Todėl $x(t)$ ir $y(t)$ priklausomybės yra tiesės, einančios per taškus 0 , φ_i ir $\varphi_i + 1$ laiko atžvilgiu ir taškus $-l/2$, 0 ir $l/2$ x koordinatės atžvilgiu. Antruoju atveju roboto koja yra perkėlimo fazėje (daromas žingsnis). Todėl $z(t)$ priklausomybė yra tiesė tarp taškų 0 ir φ_i , $\varphi_i + 1$ ir T ir sinusoidės pusperiodis tarp taškų φ_i ir $\varphi_i + 1$.



2.5 pav. Roboto pėdos trajektorijos atskirų koordinatinių priklausomybės nuo laiko; φ_i – i -tosios kojos perkėlimo fazė

Fig. 2.5. Robot's foot trajectory separate coordinate dependences on time; φ_i – i -th leg's transfer phase

Pagal šiuos tris atvejus ir pagal koordinatinių priklausomybes nuo laiko galima sudaryti kiekvienos koordinatės lygtis:

$$x(t) = \begin{cases} -\cos(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T - 2 \cdot \varphi_i + 2 \cdot t - 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t \leq \varphi_i, \\ \cos(\varepsilon) \cdot l \cdot (T - \varphi_i), & \text{kai } \varphi_i < t \leq \varphi_i + 1, \\ \cos(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T + 2 \cdot \varphi_i - 2 \cdot t + 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t > \varphi_i + 1, \end{cases} \quad (2.24)$$

$$y(t) = \begin{cases} -\sin(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T - 2 \cdot \varphi_i + 2 \cdot t - 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t \leq \varphi_i, \\ \sin(\varepsilon) \cdot (l \cdot (t - \varphi_i)), & \text{kai } \varphi_i < t \leq \varphi_i + 1, \\ \sin(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T + 2 \cdot \varphi_i - 2 \cdot t + 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t > \varphi_i + 1, \end{cases} \quad (2.25)$$

$$z(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } t \leq \varphi_i, \\ h \cdot \sin((t - \varphi_i) \cdot \pi), & \text{kai } \varphi_i < t \leq \varphi_i + 1, \\ 0, & \text{kai } t > \varphi_i + 1, \end{cases} \quad (2.26)$$

čia t – laikas, T – periodas.

Pagal sudarytas roboto pėdos trajektorijas x koordinatė atitinka roboto judėjimą tiesiai arba atgal (ilgis), y koordinatė atitinka roboto judėjimą į kairę arba dešinę puses (plotis), o z koordinatė atitinka aukštį.

Vienas iš svarbiausių aspektų kuriant robotus yra jų judėjimo planavimas (D. Henrich 1997). Netaikant judėjimo planavimo metodo, robotas tiesiog stovėtų vietoje. Yra daug skirtingų robotų konfigūracijų (D. C. Kar 2003) ir dar daugiau skirtingų metodų skirtų roboto judėjimui valdyti. Tačiau vienas iš dažniausiai pasitaikančių robotų judėjimo metodų yra eisenos. Toliau aprašomos judėjimo eisenos, kurios buvo naudojamos darbe.

Kaip jau buvo apžvelgta 1 skyriuje, šešiakojų robotų pagrindinės eisenos yra trys: trikojė (angl. tripod), dvikojė (angl. tetrapod) ir banguojanti (angl. wave). Tačiau šiame darbe buvo naudojamos keturios eisenos: trys pagrindinės ir banguojančios eisenos modifikacija – pulsuojanti (angl. ripple) eisena.

Kiekvieną eisena galima išskaidyti į dvi fazes: palaikymo fazę ir perkėlimo fazę. Palaikymo fazės metu koja liečiasi su paviršiumi, išlaiko roboto svorį ir stumiasi atgal, kad sukurtų judėjimą. Perkėlimo fazės metu koja yra pakeliama į viršų (daromas žingsnis) ir vėliau leidžiama žemyn. Kiekviena eisena skiriasi šių dviejų fazių išdėstymu kiekvienai kojai (kojų perkėlimo eiliškumu). Taip pat skiriasi ir kiekvienos eisenos periodas, kuris priklauso nuo to, kiek kojų bus perkeliama vienu metu. Kiekvienos darbe naudojamos eisenos kojų perkėlimo fazės ir periodai pateikti 2.2 lentelėje. Kojų pavadinimų sutrumpinimai yra tokie:

- KP – kairė priekinė;
- KV – kairė vidurinė;
- KG – kairė galinė;
- DP – dešinė priekinė;
- DV – dešinė vidurinė;
- DG – dešinė galinė.

2.2 lentelė. Darbe naudojamų eisenų kojų perkėlimo fazės ir periodai

Table 2.2. Leg transfer phases and periods of different gaits used in the thesis

Eisena	T	φ_{KP}	φ_{KV}	φ_{KG}	φ_{DP}	φ_{DV}	φ_{DG}
Trikojė	2	0	1	0	1	0	1
Dvikojė	3	0	1	2	1	2	0
Banguojanti	6	0	1	2	3	4	5
Pulsuojanti	6	0	2	4	5	3	1

Perkėlimo fazę lygi 0 reiškia, kad ši koja bus perkeliama pirmoji, 1 – antroji ir t. t. Taigi trikojės eisenos metu visų pirma bus perkeliamos KP, DG ir DV, o vėliau KV, DP ir DG. Kaip matome trikojės eisenos metu perkeliamos vienos

pusės priekinė ir galinė ir kitos pusės vidurinė kojos. Dvikojės eisenos metu visų pirma perkeliama KP ir DG kojos, tada KV ir DP ir galų gale KG ir DV. Banguojančios eisenos kojų perkėlimo eiliškumas yra toks: KP, KV, KG, DP, DV ir DG. Pulsuojančios eisenos kojų perkėlimo eiliškumas yra toks: KP, DG, KV, DV, KG ir DP. Sprendžiant pagal eisenų periodus, trumpiausiai trunkanti eisena yra trikojė, o ilgiausiai trunkančios eisenos yra banguojanti ir pulsuojanti.

Suvedus šiuos parametrus į gautas pėdų trajektorijas, išreikštas lygtimis (2.24)–(2.26), gaunamas nuoseklus šešiakojo roboto judėjimas skirtingomis eisenomis.

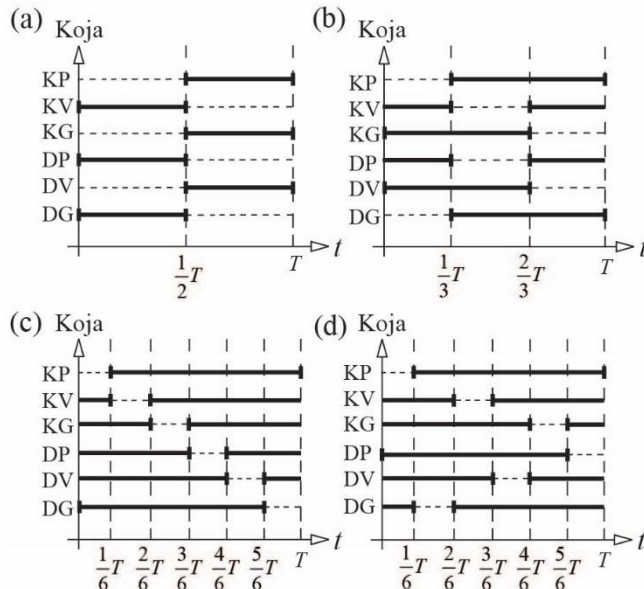
Visų darbe naudojamų eisenų grafinis atvaizdavimas pateiktas 2.6 paveiksle. Kaip matoma iš 2.2 lentelės ir 2.6 paveikslo, visos eisenos (išskyrus banguojančią ir pulsuojančią) skiriasi periodais. Trikojės eisenos periodas yra sudarytas iš 2 etapų, dvikojės – iš 3 etapų, banguojančios ir pulsuojančios eisenų periodai – iš 6 etapų. Trikojės eisenos metu perkeliama trys kojos, o kitos lieka palaikymo fazėje. Dvikojės eisenos metu perkeliama dvi kojos, o keturios lieka palaikymo fazėje. Banguojančios ir pulsuojančios eisenų metu perkeliama tik viena koja, o kitos penkios lieka palaikymo fazėje. Vienintelis skirtumas tarp banguojančios ir pulsuojančios eisenų yra tik kojų perkėlimo eiliškumas.

Pagal šiuos duomenis taip pat galima nustatyti ir eisenų greitį bei stabilumą. Mažiausiai stabili, bet greičiausia eisena yra trikojė, dėl didžiausio kojų perkėlimo skaičiaus ir mažiausio eisenos periodo. Vienas iš būdų roboto stabilumui garantuoti yra jėgų pasiskirstymas tarp kojų (M. S. Erden *et al.* 2007). Tačiau standartinis stabilumo kriterijus sako, kad mažiausiai trys kojos turi būti ant paviršiaus visą laiką, kad būtų išlaikomas statinis ir dinaminis stabilumai. Trikojė eisena šį kriterijų tenkina, tačiau minimaliai.

Šiek tiek lėtesnė bet stabilesnė eisena yra dvikojė. Šios eisenos stabilumas yra geresnis dėl to, kad keturios kojos pastoviai yra ant paviršiaus. Pati stabiliausia ir lėčiausia eisena yra banguojanti, nes vienu metu perkeliama yra tik viena koja. Šios eisenos metu ant paviršiaus pastoviai yra penkios kojos, todėl stabilumo kriterijus tenkinamas maksimaliai. Banguojanti eisena yra netgi stabilesnė nei pulsuojanti eisena, nes kojų perkėlimo eiliškumas yra nuoseklus, o pulsuojančios eisenos kojų perkėlimo eiliškumas nėra nuoseklus. Eisenų stabilumo tyrimas plačiau aprašytas šaltinyje (A. Skaburskytė *et al.* 2016).

Šešiakojo roboto HexaV4 fiziniam modeliui konstruoti buvo pasirinkti šie komponentai: AX-12 servo pavaros, STM32F411RE mikrovaldiklis (ARM Cortex M4 architektūros), sumontuotas STM32 Nucleo-F411RE bandymų plokštėje, servomechanizmų AX-12 duomenų sąsajos suderinimo schema, pagal gamintojo rekomendacijas sudaryta iš loginių grandynų 74HC126 ir 74HC04 (Robotis 2006), LM7805 tipo 5 V įtampos stabilizatorius mikrovaldikliui, elektros srovės stiprio matavimo schema. Kiekviena roboto koja turi po 3 LL, o robotas turi 6 kojas, todėl visumoje robotas gaunasi 18 LL sistema. Duomenims

iš roboto mikrovaldiklio siūsti į asmeninį kompiuterį tolimesniam kaupimui ir apdorojimui naudojamas Bluetooth ryšio modulis, keičiantis asinchroninę nuosekliąją duomenų sąsają bevieliniu ryšiu. Mikrovaldiklio programa atlikus pakeitimus įkeliama iš asmeninio kompiuterio per USB sąsają, naudojant STM32 Nucleo-F411RE bandymų plokštėje įmontuotą ST-Link V2 programavimo bei derinimo schemą. Šešiakojo roboto valdymo sistemos funkcinė elektrinė schema pavaizduota 2.7 paveiksle.

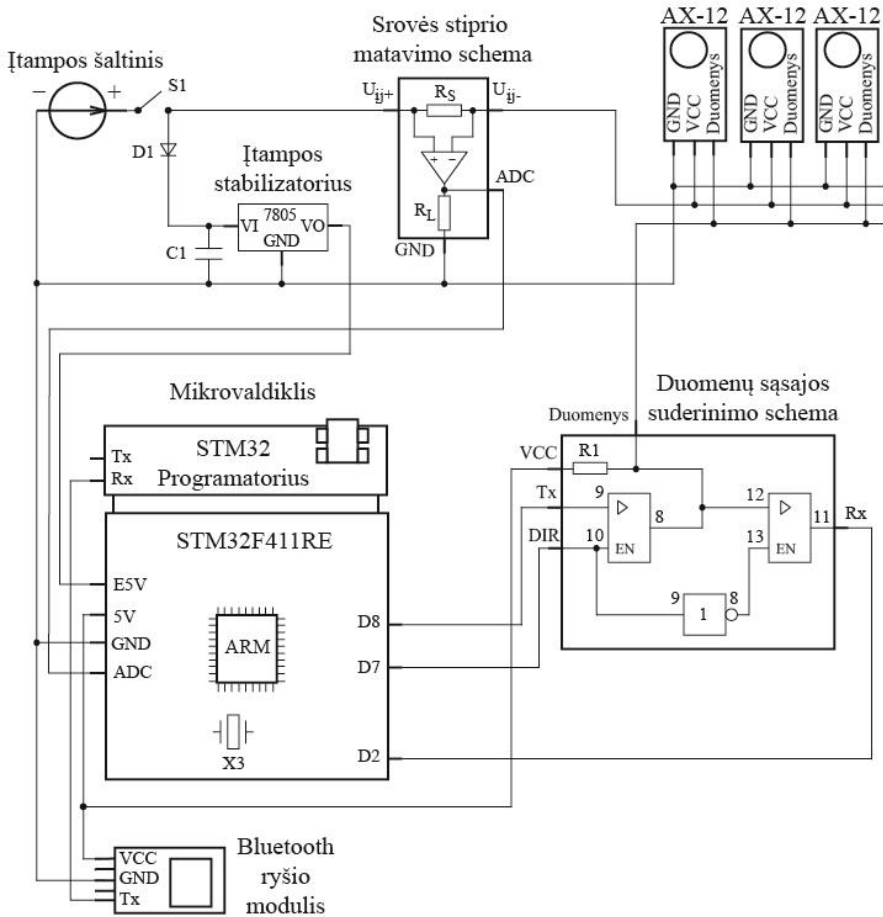


2.6 pav. Eisenų grafinis atvaizdavimas: (a) trikojė; (b) dvikojė; (c) banguojanti; (d) pulsuojanti

Fig. 2.6. Graphical representation of all gaits: (a) tripod; (b) tetrapod; (c) wave; (d) ripple

Eksperimentų metu šešiakojis robotas maitinamas naudojant reguliuojamą laboratorinį nuolatinės įtamos šaltinį, kurio įtampa nustatyta 11 V, nes servo pavaroms AX-12 reikia 10–12 V įtamos. Mikrovaldiklio modulis maitinamas 5 V įtampa, todėl įmontuotas LM7805 tipo įtamos stabilizatorius kartu su dviem elektrolitiniais kondensatoriais, kurių talpa 100 μF ir dviem keraminiais kondensatoriais, kurių talpa 0,1 μF . Pagal gamintojo rekomendacijas duomenų sąsajos suderinimo schema sudaryta iš dviejų valdomų kartotuvų su trijų būsenų išėjimais, kuriems panaudotas 74HC126 tipo integrinis grandynas. Norint duomenų perdavimo kryptį valdyti vienu mikrovaldiklio signalu, panaudotas inverteris (74HC04 tipo integrinis grandynas). Siekiant užtikrinti

servomechanizmų valdymo signalo aukštą loginį lygį artimą 5 V, kartotuvo išėjimas per 10 kΩ varžos rezistorių R1 prijungtas prie 5 V įtampos šaltinio. Taip pat modernizuota STM32 Nucleo-F411RE bandymų plokštėje esanti mikrovaldiklio taktavimo schema – panaudotas išorinis 16 MHz kvarcinis rezonatorius X3, prie kurio prijungti 20 pF kondensatoriai. Tai leido lanksčiau programiškai keisti mikrovaldiklio veikimo spartą.



2.7 pav. Šešiakojo roboto valdymo sistemos funkcinė elektrinė schema
Fig. 2.7. Hexapod robot control system function electric diagram

Labai svarbi roboto valdymo sistemos dalis yra elektros srovės stiprio matavimo schema, kuri sudaryta iš šunto varžos R_S , specializuoto integrinio grandyno INA169 ir varžos R_L , kuri keičia išėjimo elektros srovės stiprį į įtampą. Toks elektros srovės stiprio matavimo metodas pasirinktas todėl, kad tai

yra klasikinis metodas ir lyginant su kitais metodais (pvz. Holo jutiklis), šunto varžos metodas pasižymi mažais triukšmais ir mažomis paklaidomis.

Gamintojo pateikiamoje INA169 grandyno dokumentacijoje (Texas Instruments 2005) buvo pateikta charakteristika, pagal kurią ir buvo skaičiuojamos reikiamos R_S ir R_L varžų vertės:

$$U_{is} = I_S \cdot R_S \cdot 1000 \mu \frac{A}{V} R_L, \quad (2.27)$$

čia U_{is} – išėjimo įtampa, I_S – apkrovos elektros srovės stipris.

Visų pirma, pagal elektros srovės stiprio intervalą buvo parinkta R_S varžos vertė. Gauta, kad tinkamiausia R_S varžos vertė yra 0,1 Ω , pasirinktas 2 W leistinos sklaidomos galios ir 1 % tikslumo 2010 korpuso SMD rezistorius. Toliau buvo parenkama R_L varžos vertė. Šią vertę geriausia buvo parinkti tokią, kad išėjimo įtampos vertė atitiktų elektros srovės stiprį patogiu santykiu 1 A/1 V. Pagal gamintojo aprašyme pateiktą formulę apskaičiavus pasirinktas R_L rezistorius yra 10 k Ω varžos, 1 % tikslumo ((2.28) lygtis).

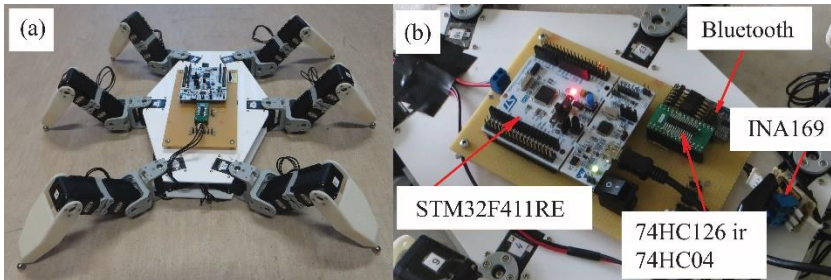
$$R_L = \frac{3,3 \text{ V}}{3,3 \text{ A} \cdot 0,1 \Omega \cdot 1000 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V}}. \quad (2.28)$$

Taip pat buvo patikrinta galima INA169 grandyno matavimo paklaida pagal dokumentacijoje pateiktą charakteristiką. Esant 25 °C aplinkos temperatūrai (tipinė roboto veikimo sąlyga), kai įėjimo įtampa yra lygi 15 mV, gaunama 2 % elektros srovės stiprio matavimo paklaida (~150 mA). Tačiau iš charakteristikos taip pat matyti, kad didėjant įėjimo įtampai, elektros srovės stiprio matavimo paklaida mažėja. Rezultatai rodo, kad elektros srovės stiprio matavimo schema yra sudaryta tinkamai ir darbe naudojama vaikščiojančio roboto energijos sąnaudoms įvertinti.

Valdymo sistemai tenkantis elektros srovės stipris yra labai mažas – 100 μ A/MHz. Gamintojo duomenimis, esant maksimaliam 100 MHz vidiniam taktų dažniui, 3,6 V maitinimo įtampai ir įjungtiems visiems vidiniams resursams, procesoriaus srovė neviršija 25 mA. Bluetooth ryšio moduliui reikia ~20 mA elektros srovės stiprio siuntimo režime. Palyginimui, vienos servo pavaros ramybės būsenoje elektros srovės stipris yra apie 84 mA, veikimo metu – iki 900 mA. Darbe naudojamas šešiakojis robotas turi 18 LL, todėl viso yra 18 servo pavarų. Taigi valdymo sistemai kartu su Bluetooth ryšio modulių tenkantis elektros srovės stipris yra nykstamai mažas, panaudojus specializuotą mažo suvartojimo valdiklį ir Bluetooth 4.0 (BLE) sąsają gali būti dar sumažintas dešimtis kartų, todėl darbe nebuvo matuojamas bei įskaitomas. Dėl šios priežasties elektros srovės stiprio matavimo schema jungiama tarp maitinimo šaltinio ir servo pavarų. Tokiu būdu buvo stebima, koks elektros srovės stipris

tenka visoms pavaroms ir vėliau gautas elektros srovės stipris buvo perskaičiuojamas į energijos sąnaudas.

Galutinis šešiakojo roboto HexaV4 ir jo valdymo sistemos pavyzdys yra pavaizduotas 2.8 paveiksle. Matyti, kad pagrindiniai roboto valdymo sistemos komponentai yra mikrovaldiklis, Bluetooth ryšio modulis, elektros srovės stiprio matavimo schema ir duomenų sąsajos suderinimo schema.



2.8 pav. Šešiakojis robotas HexaV4: (a) fizinis modelis; (b) valdymo sistemos sudėtinės dalys

Fig. 2.8. Hexapod robot HexaV4: (a) physical model; (b) control system components

2.2. Paviršiaus klasifikavimo modelio sudarymas

Paviršiaus aptikimas, identifikavimas ir klasifikavimas yra svarbūs uždaviniai robotikoje, nes robotai privalo gebėti atpažinti savo aplinką, kad joje galėtų orientuotis ir nukeliauti iš vieno taško į kitą. Jei robotas negebės atpažinti kliūčių ar paviršiaus tipo, jis paprasčiausiai atsitrenks į kalnus, uolas ir todėl gali įvykti gedimas ir roboto veikla bus nutraukta.

Yra daug metodų, kaip atpažinti aplinką ir ją suvokti, tačiau vienas iš dažniausiai pasitaikančių metodų yra susijęs su stereo kamerų panaudojimu (S. Zenker *et. al.* 2013). Naudojant stereo kameras galima pasiekti net apie 90 % tikslumą atpažįstant tokius paviršius kaip akmenys, žolė, asfaltas, smėlis ir panašiai. Tačiau tokio metodo trūkumas yra tai, kad gaunamas labai didelis informacijos kiekis. Informacijos apdorojimas užtrunka ilgą laiką, ypač jei norima gauti spalvotą vaizdą, kuris suteiktų daugiau informacijos apie aplinką.

Kitas pasitaikantis metodas paviršiaus atpažinimui yra susijęs su 2D lazerinių skenerių panaudojimu (D. Belter *et. al.* 2011). Tokių metodų principas dažniausiai yra gautų 2D žemėlapių pavertimas į 3D žemėlapi, kuris vėliau perduodamas į roboto valdymo sistemą arba naudojamas kelio planavimui. Visų pirma yra skenuojama aplinka ir gaunamas 2D žemėlapis. Tada pritaikomas vienas iš vaizdų atpažinimo algoritmų, kuris leidžia dvimačius vaizdus paversti trimačiais. Privalumas yra tai, kad naudojantis tokiu metodu, robotas gali

palyginus greitai apdoroti gautą iš aplinkos informaciją realiu laiku judant nežinomoje teritorijoje.

Svarbu pabrėžti, kad paviršiaus atpažinimas ir klasifikavimas yra du skirtingi metodai. Pirmasis metodas skirtas aptikti paviršiaus nelygumus ar kliūtis, taip pat įvertinti, kada koja yra pastatyta ant paviršiaus ir kokiame aukštyje yra. Antrasis metodas skirtas suskirstyti skirtingus paviršiaus tipus į klases pagal tam tikrus kriterijus. Paviršiaus skirstymas yra reikalingas tam, kad robotui būtų lengviau įvertinti aplinką ir tinkamai pasirinkti judėjimo kelią bei parametrus (pvz. greitį, eiseną), kad judėtų efektyviai ir suvartotų mažesnę energijos kiekį.

Šiuo metu robotikos srityje daugiausiai darbų yra susijusių su vaikščiojančių robotų judėjimu per nelygų paviršių, todėl populiariausias metodas paviršiaus nelygumų skirstymui yra pagal paviršiaus tipą. Įprastai išskiriami tokie paviršiai: žolė, asfaltas, lapai, pjuvenos, smėlis, gruntas, cementas, akmenys, žemė, plytelės (N. Kottege *et. al.* 2015, K. Walas 2015). Tai dažniausiai aplinkoje pasitaikantys paviršiaus tipai ir robotams tikrai teks judėti per panašaus tipo aplinkas.

Kitas būdas grupuoti paviršius yra grupavimas pagal kategoriją, taip pat įskaitant ir kiekvienos kategorijos galimus variantus. Tai yra šiek tiek sudėtingesnis metodas, nes visi paviršiaus tipai suskirstomi į atskiras, smulkesnes kategorijas (G. Best *et. al.* 2013). Pavyzdžiui, akmenys suskirstomi į tokias kategorijas: smėlis, smulkūs akmenys, akmenys ir stambūs akmenys. Taip pat galima skirstyti pagal spalvą, pavyzdžiui, žolė: tamsi žolė, šviesi žolė, labai šviesi žolė, išblukusi žolė. Toks metodas yra itin geras, nes robotas gauna išsamesnę informaciją apie tokio paties paviršiaus skirtingas kategorijas ir gali tinkamai įvertinti aplinką.

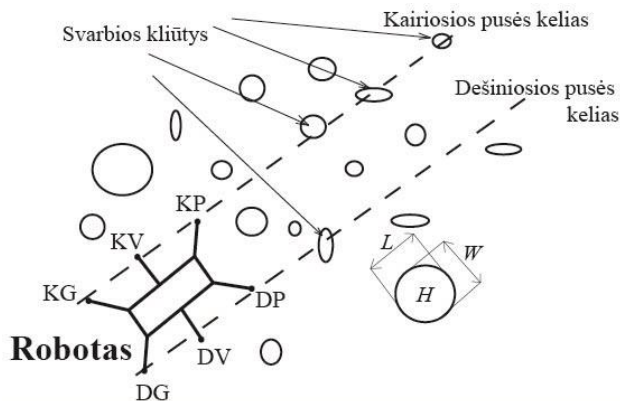
Pats primityviausias būdas skirstyti paviršių yra pagal judėjimo galimybę: galima įveikti, negalima įveikti. Toks metodas paprastai taikomas judėjimo trajektorijos planavimui (M. Kruusmaa 2003, V. R. Jisha *et. al.* 2012). Paviršiaus nelygumai skirstomi į dvi kategorijas: kliūtis ir lygus paviršius. Tačiau toks paviršiaus skirstymo metodas nesuteikia jokios informacijos apie paviršiaus tipą ar apie kliūčių aukštį, todėl taikomas tik labai konkrečiais atvejais ar matematinio modeliavimo aplinkose.

Šiame darbe buvo klasifikuojamos kliūtys, jų dydis bei paviršius, atsižvelgiant į kliūčių dydį ir tankį aplinkoje. Buvo nustatyti esminiai skirtumai tarp nelygaus paviršiaus ir kliūčių. Kliūčių dydis tapatinamas su roboto galimybėmis ir sudaromos kliūčių dydžių matematinės išraiškos. Tyrimai buvo atliekami su imitaciniu roboto modeliu ir su realiu, todėl kliūtys skirstomos dviem būdais. Pirmuoju atveju kliūčių dydžiai tapatinami su šešiakojo roboto matematinio modeliu, kai roboto kūnas yra plokščias (kūno storis yra lygus 0). Antruoju atveju kliūčių dydžiai tapatinami su fiziniu šešiakojo roboto modeliu,

kurio kūno storis nėra lygus 0, todėl judėjimo parametrai šiek tiek skiriasi nuo matematinio modelio. Taip pat, imitacinis roboto modelis buvo idealizuotas, siekiant ištirti, kiek energijos sunaudojama išoriniams veiksniams kompensuoti.

Visų pirma svarbu nustatyti, kas yra nelygus paviršius, o kas yra kliūtis. Nelygų paviršių galima apibrėžti kaip pastovus paviršiaus aukščio kitimą. Nelygaus paviršiaus aukštis gali kisti labai įvairiai (silpai, stipriai), tačiau dažniausiai jis yra įveikiamas. Tuo tarpu kliūtis gali būti apibrėžta kaip atskiras paviršiaus aukščio pasikeitimas. Iš esmės nelygų paviršių galima apibūdinti kaip didelį kiekį kliūčių, esančių arti viena kitos (liečiasi tarpusavyje). Atskiros kliūtys yra individualūs objektai, kuriuos galima nusakyti ilgiu, pločiu ir aukščiu.

Darbe taip pat buvo atskiriamos dvi kliūčių kategorijos. Pirmajai kategorijai buvo priskiriamos svarbios kliūtys, kitai kategorijai – kliūtys, kurios neįtakos roboto judėjimo kelio (2.9 pav.). Pirmajai kategorijai priskirtos kliūtys yra tos, kurias robotui teks perlipti, o visos kitos kliūtys nėra svarbios, nes jų padėtys yra ne roboto kelyje. Kiekvieną kliūtį galima apibūdinti trimis parametrais: ilgis L , plotis W ir aukštis H .



2.9 pav. Skirtingos kliūtys roboto kelyje

Fig. 2.9. Different obstacles along robots path

Roboto judėjimo parametrus nusako šie dydžiai: žingsnio ilgis l , plotis w ir aukštis h . Siejant kliūčių dydžius su roboto judėjimo parametrais kliūtis galima skirstyti į keturias grupes:

- Lygus paviršius. Tai nebūtinai turi būti 0 mm aukščio paviršius, tačiau nelygumai tokie maži, kad robotui judant tokioje aplinkoje nereikia keisti judėjimo parametru. Lygus paviršius matematiškai gali būti išreikštas taip:

$$H < h_i, \quad (2.29)$$

čia h_i – roboto žingsnio aukštis judant lygiu paviršiumi.

- Mažos kliūtys. Tai tokio dydžio kliūtys, kurių robotas negali ignoruoti, tačiau gali perlipti keičiant žingsnio parametrus. Mažas kliūtis matematiškai galima išreikšti taip:

$$\begin{aligned} L &\in [l_i, l_{\max}], \\ H &\in [h_i, h_{\max}], \\ W &\in [w_i, w_{\max}], \end{aligned} \quad (2.30)$$

čia l_i ir w_i – roboto žingsnio ilgis ir plotis judant lygiu paviršiumi atitinkamai, l_{\max} , w_{\max} ir h_{\max} – maksimalus roboto žingsnio ilgis, plotis ir aukštis atitinkamai.

- Vidutinės kliūtys. Kitaip tokias kliūtis galima pavadinti „ilgomis“ kliūtėmis. Tokių kliūčių ilgis ir plotis yra didesni nei maksimalūs roboto galimi žingsnio ilgis ir plotis, tačiau aukštis yra įveikiamas. Tokias kliūtis robotas gali perlipti statant kojas ant kliūties viršaus. Matematiškai tokias kliūtis apibūdinti galima taip:

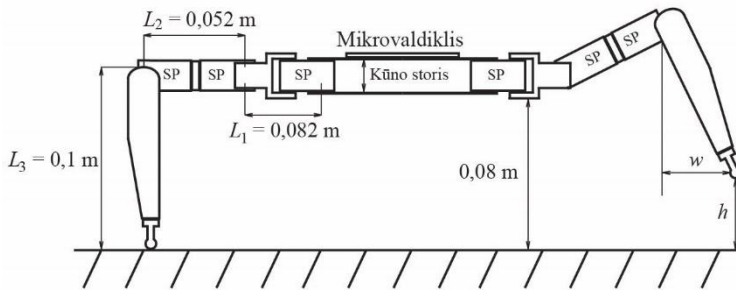
$$\begin{aligned} L &\in [l_{\max}, \infty], \\ H &\in [h_i, h_{\max}], \\ W &\in [w_i, \infty]. \end{aligned} \quad (2.31)$$

- Didelės kliūtys. Tai yra tokios kliūtys, kurios negali būti įveiktos jokiais judėjimo metodais. Tokių kliūčių pavyzdžiais gali būti uolos, statūs kalnai, vandens telkiniai. Vienintelis būdas išvengti tokias kliūtis yra kelio planavimas ir jų apėjimas. Dideles kliūtis matematiškai apibrėžti galima taip:

$$\begin{aligned} L &\in [l_{\max}, \infty], \\ H &\in [h_{\max}, \infty], \\ W &\in [w_{\max}, \infty]. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Toliau buvo nustatomi darbe naudojamo šešiakojo roboto maksimalūs judėjimo parametrai. Visi tyrimai buvo atliekami robotui judant, kai kūnas yra neutralioje padėtyje. Tokia stovėsena gaunama tada, kai šlaunies ir blauzdos kojų dalys yra statmenos viena kitai (2.10 pav.). Roboto judėjimo parametrus nustatantys dydžiai neutralioje stovėsenoje pavaizduoti 2.10 paveiksle.

Norint apibrėžti roboto judėjimo ribas reikia nusakyti pradinius ir maksimalius pėdos trajektorijos parametrus: žingsnio ilgį, plotį ir aukštį. Pradiniai judėjimo parametrai paprastai yra tokie: $l_i = 0,05$ m, $w_i = 0$ m, $h_i = 0,01$ m. Toliau pateiktas roboto maksimalių pėdos trajektorijos parametru nustatymas.



2.10 pav. Šešiakojo roboto geometrinis modelis, nusakantis kojos dydį ir žingsnio parametrus, neutralioje stovėsenoje

Fig. 2.10. Hexapod robot geometrical model, which describes leg size and step parameters, during neutral stance

Visų pirma buvo nagrinėjami imitacinio roboto modelio judėjimo parametrai. Maksimalus žingsnio ilgis priklauso nuo blauzdos kojos dalies ilgio ir dalinai nuo šlaunies kojos dalies ilgio. Šio parametro neapriboja roboto kūnas, todėl maksimalus imitacinio roboto modelio žingsnio ilgis yra 0,1 m. Žingsnio plotis labiausiai priklauso nuo šlaunies kojos dalies ilgio. Tačiau šis parametras yra mechaniškai ribojamas blauzdos kojos dalies, todėl maksimalus imitacinio roboto modelio žingsnio plotis yra 0,08 m. Žingsnio aukštis labiausiai priklauso nuo blauzdos kojos dalies ilgio, tačiau dalinai yra ribojamas kūno storio. Imitacinio roboto modelio kūnas yra plokščias, todėl toks apribojimas negalioja. Žingsnio aukštis taip pat padidinamas dėl šlaunies kojos dalies, todėl maksimalus imitacinio roboto modelio žingsnio aukštis yra 0,12 m.

Turint šiuos duomenis buvo patikslintos kliūčių skirstymo lygtys (2.29)–(2.32) šešiakojo imitacinio roboto modelio atveju:

- Lygus paviršius:

$$H < 0,01 \text{ m}. \quad (2.33)$$

- Mažos kliūtys:

$$\begin{aligned} L &\in [0,05 \text{ m}; 0,1 \text{ m}], \\ H &\in [0,1 \text{ m}; 0,12 \text{ m}], \\ W &\in [0 \text{ m}; 0,08 \text{ m}]. \end{aligned} \quad (2.34)$$

- Vidutinės kliūtys:

$$\begin{aligned} L &\in [0,1 \text{ m}; \infty], \\ H &\in [0,01 \text{ m}; 0,12 \text{ m}], \\ W &\in [0,08 \text{ m}; \infty]. \end{aligned} \quad (2.35)$$

- Didelės kliūtys:

$$\begin{aligned} L &\in [0,1 \text{ m}; \infty], \\ H &\in [0,12 \text{ m}; \infty], \\ W &\in [0,08 \text{ m}; \infty]. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Fizinio roboto modelio atveju judėjimo parametrai šiek tiek skiriasi nuo imitacinio roboto modelio. Judesiai yra apriboti pavarų galimybėmis, kūno ir kojų storiu. Nors judėjimo parametrai judant lygiu paviršiumi išlieka tokie patys, maksimalūs parametrai šiek tiek skiriasi. Roboto storis apriboja žingsnio aukštį, todėl sumažėja maksimalus fizinio roboto žingsnio aukštis. Jis yra lygus 0,1 m. Žingsnio ilgis ir plotis lieka nepakitę.

Gavus šiuos pakeitimus buvo perrašytos kliūčių skirstymo lygtys (2.29)–(2.32) realaus šešiakojo roboto atveju:

- Lygus paviršius:

$$H < 0,01 \text{ m}. \quad (2.37)$$

- Mažos kliūtys:

$$\begin{aligned} L &\in [0,05 \text{ m}; 0,1 \text{ m}], \\ H &\in [0,01 \text{ m}; 0,1 \text{ m}], \\ W &\in [0 \text{ m}; 0,08 \text{ m}]. \end{aligned} \quad (2.38)$$

- Vidutinės kliūtys:

$$\begin{aligned} L &\in [0,1 \text{ m}; \infty], \\ H &\in [0,01 \text{ m}; 0,1 \text{ m}], \\ W &\in [0,08 \text{ m}; \infty]. \end{aligned} \quad (2.39)$$

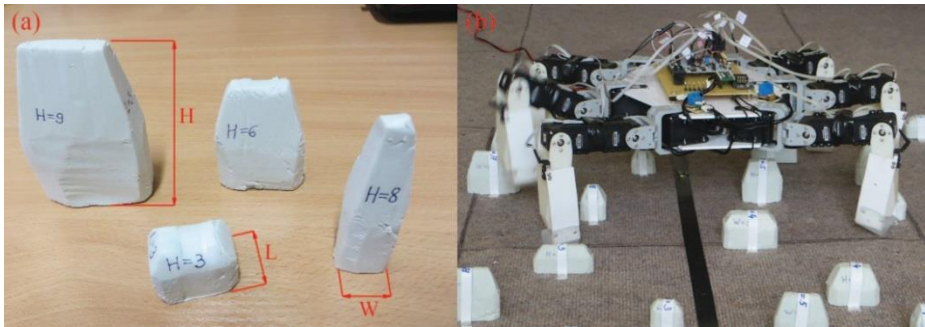
- Didelės kliūtys:

$$\begin{aligned} L &\in [0,1 \text{ m}, \infty], \\ H &\in [0,1 \text{ m}, \infty], \\ W &\in [0,08 \text{ m}, \infty]. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Realūs įvairaus dydžio kliūčių pavyzdžiai su nurodytais matmenimis pateikti 2.11 paveiksle.

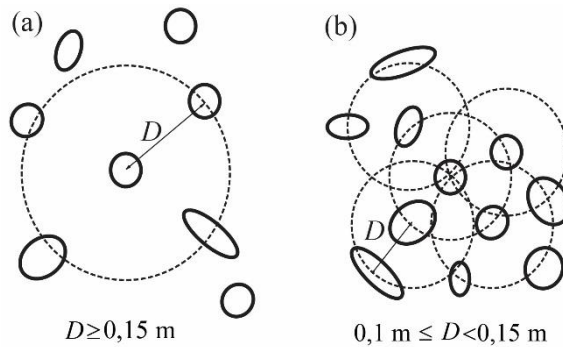
Toliau buvo nagrinėjamas paviršiaus klasifikavimo modelio sudarymas. Šiame darbe paviršius buvo vertinamas pagal du kriterijus: pagal kliūčių tankį aplinkoje ir pagal kliūčių dydį. Kliūčių tankį nusako atstumas tarp kliūčių D . Kliūčių dydį nusako kliūčių aukštis H , ilgis L ir plotis W . Šiuos kriterijus taip pat galima skaidyti į mažesnes kategorijas. Tyrimuose buvo naudojamos dvi kategorijos kiekvienam kriterijui: mažas kliūčių tankis, didelis kliūčių tankis, mažos kliūtys, didelės kliūtys. Mažą kliūčių tankį nusako atstumas tarp kliūčių centrų, kuris yra 0,15 m arba didesnis ($D \geq 0,15 \text{ m}$) (2.12 pav. (a)). Didelį kliūčių tankį nusako atstumas tarp kliūčių centrų, kuris yra nuo 0,1 iki 0,15 m ($0,1 \text{ m} \leq D \leq 0,15 \text{ m}$) (2.12 pav. (b)). Kliūčių dydis nusakomas pagal jų aukštį.

Mažomis kliūtimis vadinamos tos, kurių aukštis yra tarp 0,03 ir 0,05 m ($0,03 \text{ m} \leq H \leq 0,05 \text{ m}$), o didelėmis kliūtimis vadinamos tos, kurių aukštis yra tarp 0,06 ir 0,08 m ($0,06 \text{ m} \leq H \leq 0,08 \text{ m}$). Pastebėtina, kad minimalūs ir maksimalūs kliūčių aukščiai nesutampa su šešiakojo roboto trajektorijos parametrais. Taip yra todėl, kad būtų paliktas judėjimo rezervas (robotas galėtų aptikti ir įveikti įvairaus dydžio kliūtis); taktilinių jutiklių netikslumo kompensavimas.



2.11 pav. Įvairaus dydžio kliūčių pavyzdžiai: (a) kliūčių matmenys; (b) kliūčių dydžių palyginimas su šešiakoju robotu

Fig. 2.11. Examples of real different size obstacles: (a) obstacle parameters; (b) obstacle size comparison with hexapod robot



2.12 pav. Skirtingi kliūčių tankiai: (a) mažas kliūčių tankis; (b) didelis kliūčių tankis

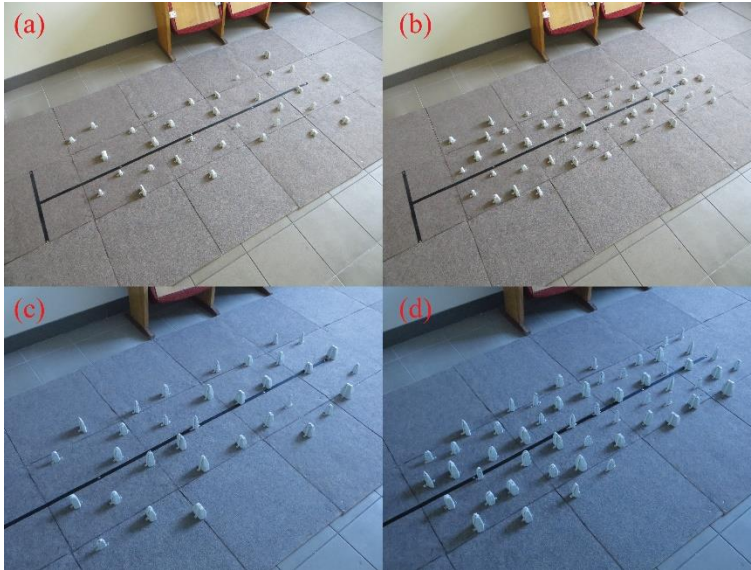
Fig. 2.12. Different obstacle densities: (a) low obstacle density; (b) high obstacle density

Kombinuojant išvardintas kliūčių dydžio ir tankio kategorijas gaunami keturi skirtingi paviršiaus tipai:

- mažas kiekis mažų kliūčių;
- mažas kiekis didelių kliūčių;
- didelis kiekis mažų kliūčių;

- didelis kiekis didelių kliūčių.

Visos paviršiaus kategorijos pavaizduotos 2.13 paveiksle.



2.13 pav. Skirtingos paviršiaus kategorijos: (a) mažas kiekis mažų kliūčių; (b) didelis kiekis mažų kliūčių; (c) mažas kiekis didelių kliūčių; (d) didelis kiekis didelių kliūčių

Fig. 2.13. Different categories of terrain: (a) low density of small obstacles; (b) high density of small obstacles; (c) low density of large obstacles; (d) high density of large obstacles

2.3. Kliūčių aptikimo ir perlipimo metodų sudarymas

Paviršiaus atpažinimui ir įvertinimui dažniausiai naudojamos stereo kameros ar lazerinės sistemos. Tačiau norint, kad robotas žinotų, kada koja yra pastatyta ant paviršiaus ar ant kokio paviršiaus robotas eina, galima naudoti ir įvairius jutiklius, sumontuotus tiesiai ant roboto kojų (U. Asif *et al.* 2011). Tokiu būdu robotui judant tam tikroje aplinkoje jis gauna informaciją iš jutiklių, kurią realiu laiku gali apdoroti ir panaudoti judėjimo koregavimui. Didelis jutiklių skaičius leidžia tiksliai vertinti paviršiaus tipą.

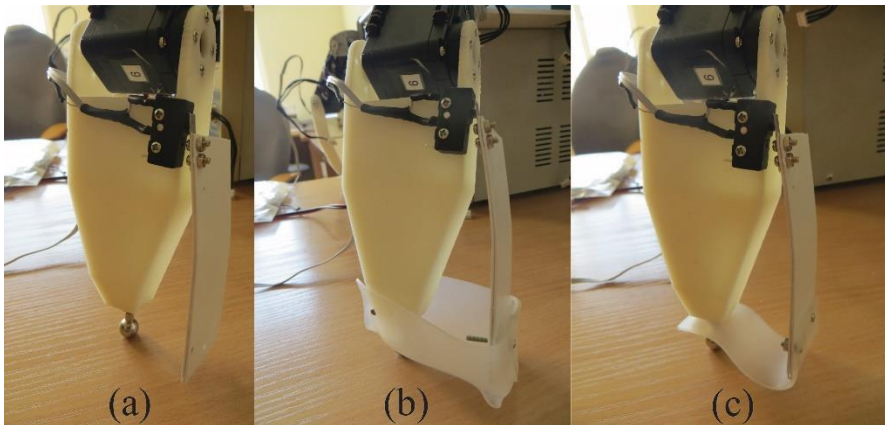
Kitas populiarus paviršiaus atpažinimo būdas yra jėgos jutikliai (T. Zhang *et al.* 2013) arba kojos standumo matavimo metodas (J. C. Arevalo *et al.* 2015). Abu metodai yra gana panašūs, nes yra dinamiški ir naudojantis jais galima nustatyti kojos pastatymo ant paviršiaus momentą, paviršiaus nelygumą bei nustatyti paviršiaus klampumą (paviršiaus tipą). Tokia

informacija apie paviršių padeda robotams tiksliau judėti nežinomoje aplinkoje, geriau prisitaikyti, todėl robotai gali judėti greičiau ir vykdyti jiems pritaikytas užduotis efektyviau.

Šiame poskyryje pateikiamas šešiakojo roboto kliūčių aptikimo, vertinimo bei pėdos trajektorijos generavimo, skirto kliūčių perlipimui metodų sudarymas. Aptariamas kojų jutiklių kūrimas ir tobulinimas, pėdos trajektorijos parametru parinkimas, o taip pat energijos sąnaudų minimizavimas perlipant kliūtis.

2.3.1. Kliūčių aptikimas ir įvertinimas

Kaip jau minėta skyriaus pradžioje, dauguma robotų paviršiaus nelygumams aptikti naudoja jutiklius ant roboto kojų, pritaistytų pėdos apačioje. Šiame darbe tyrimai buvo atliekami robotui perlipant per kliūtis, todėl pėdų jutikliai nėra tinkama priemonė. Kliūčių aptikimui buvo naudojami taktiliniai jutikliai, pritaistyti roboto kojų priekinėje dalyje (2.14 pav.).



2.14 pav. Taktiliniai roboto kojų jutikliai montuojami ant kojų priekio: (a) pirminė versija; (b) antrinė versija; (c) galutinė versija

Fig. 2.14. Tactile robot leg sensors attached on leg front side: (a) primary version; (b) secondary version; (c) final version

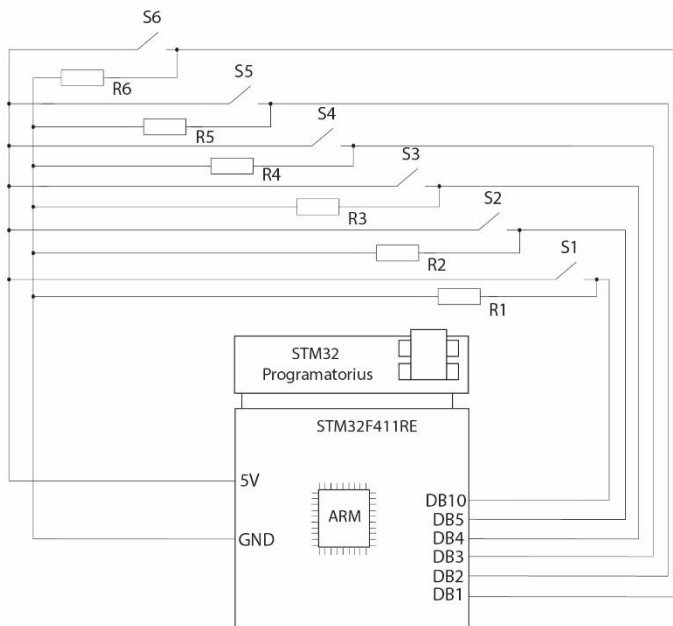
Buvo išbandytos trys jutiklių versijos (2.14 pav.). Pirmoji versija (2.14 pav. (a)) buvo sukurta naudojant tik taktilinį jutiklį ir jautriosios dalies prailginimą. Taktilinis jutiklis yra galinės padėties jungiklis su metaline svirtelė dėl tvirtumo (mikrojungikliai per silpni ir nebuvo galimybės pritvirtinti prailginimų). Prailginimas buvo reikalingas tam, kad robotas bet kuria kojos vieta galėtų aptikti kliūtį. Jutiklis buvo pritvirtintas ant roboto blauzdos kojos dalies viršaus, o prailginimas ant jutiklio spaudžiamosios dalies. Prailginančioji dalis buvo stačiakampio formos, kad uždengtų visą kojos priekį. Šios versijos pagrindinis

trūkumas buvo tai, kad kliūtys užstrigdavo tarp jutiklio prailginančiosios dalies ir kojos, todėl roboto judėjimas buvo sutrukdomas – robotas pradėdavo sukstis.

Pirmoji versija buvo patobulinta papildant jutiklio konstrukciją elastine gumine jungtimi tarp roboto pėdos ir jutiklio prailginančiosios dalies, suformuojant krepšelio formos uždengimą (2.14 pav. (b)). Tačiau taikant šiuos jutiklius, robotas kojas pastatydavo ant kliūtis ne pėda, bet krepšelio dalimi, ir todėl robotas negalėdavo judėti į priekį.

Galutinė jutiklių versija gauta vietoj krepšelio formos guminės jungties panaudojant plokščią guminę jungtį (2.14 pav. (c)). Tokia guminės jungties forma neleisdavo roboto kojoms užstrigti ant kliūčių, o kai kliūtis patekdavo tarp kojos ir jutiklio, koja nuslysdavo nuo kliūtis dėl elastinės gumos formos.

Kliūčių aptikimo metodo naudojant taktilinius kojų jutiklius privalumas yra tai, kad robotui nėra reikalinga išankstinė informacija apie kliūčių vietas aplinkoje, tačiau jutikliai nesuteikia informacijos apie kliūčių dydį: ilgį, aukštį ar plotį. Šio darbo pagrindinis tikslas buvo energijos sąnaudų minimizavimas, todėl ši informacija buvo iš anksto įvedama į roboto programą.



2.15 pav. Taktilinių jutiklių prijungimo schema
Fig. 2.15. The tactile sensor circuit diagram

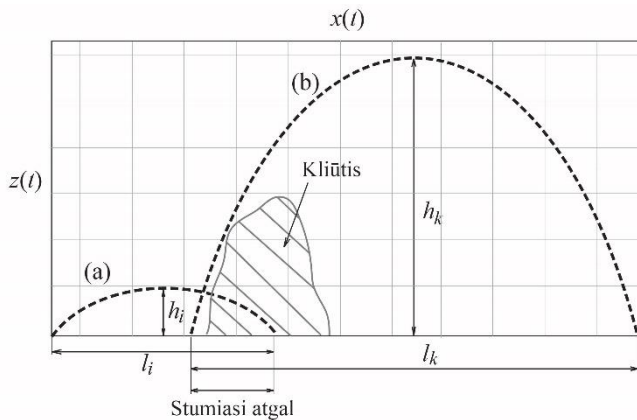
Taktiliniai kojų jutikliai veikia kaip paprasti mygtukai su neutralų loginį lygį žeminančiuoju rezistoriumi, kurio varža 10 kΩ. Robotas turi šešias kojas,

todėl jutikliai taip pat buvo naudojami šeši. Visi jutikliai buvo sujungiami su mikrovaldikliu. Principinė jutiklių jungimo elektrinė schema pavaizduota 2.15 paveiksle.

2.3.2. Pėdos trajektorijos generavimas

Pėdos trajektorijos generavimas buvo nagrinėjamas 2.1 poskyryje. Tačiau jis tinka tik roboto judėjimui lygiu paviršiumi. Norint įveikti kliūtis, pėdos trajektorija turi būti keičiama priklausomai nuo kliūties dydžio. Pėdos trajektorijos parametrai taip pat turi būti atitinkamai parenkami norint, kad robotas suvartotų minimalų energijos kiekį. Šiame darbe pėdų trajektorijos generavimas kliūčių perlipimui buvo išskiriamas dviem atvejais: keliant koją per kliūties viršų ir parenkant pėdos trajektorijos parametrus pagal energijos sąnaudas.

Pirmasis atvejis yra žymiai paprastesnis, nes užtenka keisti roboto žingsnio ilgį ir aukštį, norint gauti kliūties perlipimo trajektoriją. 2.16 paveikslas iliustruoja kliūties perlipimo trajektoriją ir pėdos trajektorijos generavimą judėjimui lygiu paviršiumi.



2.16 pav. Skirtingos pėdų trajektorijos: (a) judėjimui lygiu paviršiumi; (b) kliūčių perlipimui keliant koją per kliūties viršų

Fig. 2.16. Different foot trajectories: (a) for locomotion over even terrain; (b) for stepping over the obstacles

Naudojantis 2.16 paveikslu buvo išvestos lygtys, aprašančios abu pėdos trajektorijos generavimo būdus. Kaip jau buvo minėta šio skyriaus pradžioje, norint perlipti kliūtis, reikia keisti žingsnio ilgį ir aukštį. Tai reiškia, kad šie parametrai gali įgyti dvi vertes, todėl juos galima išreikšti taip:

$$l = \begin{cases} l_i, \\ l_k, \end{cases} \quad (2.41)$$

$$h = \begin{cases} h_i, \\ h_k, \end{cases} \quad (2.42)$$

čia l_k ir h_k – kliūtis perlipimo žingsnio ilgis ir aukštis atitinkamai. Jie priklauso nuo kliūtis dydžio, tačiau nėra lygūs kliūtis ilgiui ir aukščiui, nes tuo atveju roboto kojos atsitrenktų į kliūtis. Tiek žingsnio ilgis, tiek aukštis turi būti didesni, nei priekyje esanti kliūtis. Norint, kad robotas pilnai peržengtų per kliūtis viršų į ją neatsitrenkiant, žingsnio ilgis ir aukštis turi būti išreiškiami taip:

$$l_k = 2 \cdot l_i, \quad (2.43)$$

$$h_k = H + 0,02. \quad (2.44)$$

Kaip matome, kliūtis įveikimui žingsnio ilgis turi būti dvigubai didesnis nei pradinis žingsnio ilgis, nes esant mažesniai žingsnio ilgiui, roboto koja užstringa ant kliūtis, o žingsnio aukštis turi būti padidintas 0,02 m. Tokie pėdos trajektorijos parametrai kliūtis perlipimui buvo gauti po keleto bandymų su šešiakoju robotu, pastebėjus, kad esant mažesniai pridėtiniam aukščiui, roboto pėda užkliūna už kliūtis. Taigi įstačius lygtis (2.43) ir (2.44) į (2.41) ir (2.42) galima gauti galutines pėdos trajektorijos generavimo lygtis kliūčių perlipimui keliant koją per kliūtį:

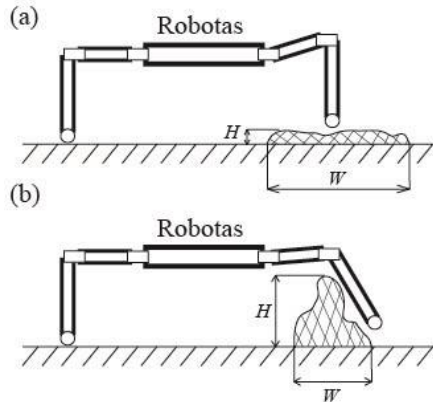
$$l = \begin{cases} l_i, \\ 2 \cdot l_i, \end{cases} \quad (2.45)$$

$$h = \begin{cases} h_i, \\ H + 0,02. \end{cases} \quad (2.46)$$

Pėdos trajektorijos pakeitimas atliekamas judėjimo ciklo pradžioje, nes tik tokiu būdu kliūčių perlipimo metodas veikia tinkamai. Kitu atveju roboto koja yra pastatoma ant kliūtis ir roboto judėjimas yra sutrukdomas. Jei roboto kojų jutikliai tampa aktyvūs kojos perkėlimo fazės metu, trajektorija nesikeičia ir žingsnis baigiamas įprastai. Kai viena ar kelios kojos yra kliūtis perlipimo fazėje, kitų kojų elgesys nesikeičia. Kliūčių perlipimas nepakeičia kojų perkėlimo cikliškumo, todėl eisenos nepakinta.

Norint įveikti kliūtį efektyviai, reikia tinkamai parinkti pėdos trajektorijos parametrus. Keliant koją per kliūtis viršų ne visada gali reikšti, kad bus suvartojamas minimalus energijos kiekis. Kartais kliūtys gali būti siauresnės ir labai aukštos, todėl koją kelti gali būti patogiau per šoną, nekeliant kojos į visą kliūtis aukštį. Kitais atvejais kliūtys gali būti labai žemos ir labai plačios, todėl koją gali būti patogiau kelti per viršų, nekreipiant kojos į šoną (2.17 pav.). Tai

rodo, kad robotas turi galėti keisti pėdos trajektorijos parametrus priklausomai nuo kliūtis dydžio. Pėdos trajektorijos generavimą aprašančios (2.24)–(2.26) lygtys nėra tam tinkamas metodas, nes naudodamas tokį metodą robotas gali kojas kilnoti tik zx plokštumoje (aukštyn, žemyn ir pirmyn, atgal).



2.17 pav. Skirtingi būdai, naudojami kliūčių perlipimui: (a) keliant koją per kliūtis viršų; (b) keliant koją aplink kliūtį

Fig. 2.17. Different ways, used to overcome obstacles: (a) stepping over the obstacle; (b) stepping around the obstacle

Siekiant pagerinti turimas pėdos trajektorijos generavimo lygtis buvo pridėtas kojos judesys zy plokštumoje. Tam buvo keičiama $y(t)$ priklausomybė. Naują $y(t)$ lygtį galima išreikšti taip:

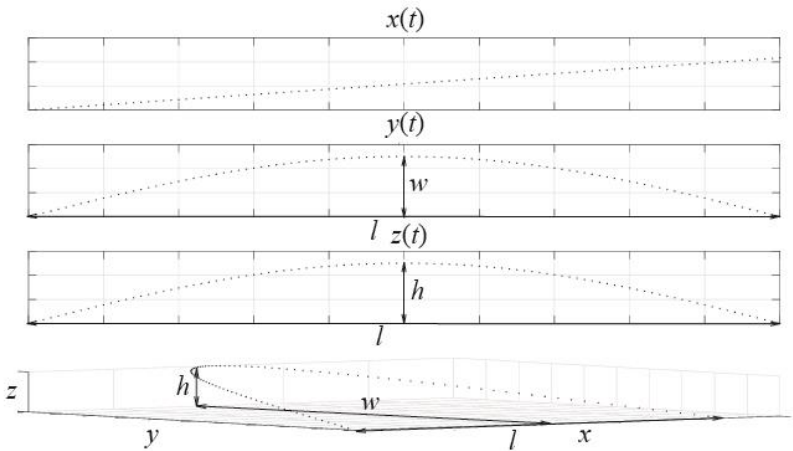
$$y(t) = \begin{cases} -\sin(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T - 2 \cdot \varphi_i + 2 \cdot t - 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t \leq \varphi_i, \\ \sin(\varepsilon) \cdot (l \cdot (t - \varphi_i)) + w \cdot \sin((t - \varphi_i) \cdot \pi), & \text{kai } \varphi_i < t \leq \varphi_i + 1, \\ \sin(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T + 2 \cdot \varphi_i - 2 \cdot t + 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t > \varphi_i + 1, \end{cases} \quad (2.47)$$

čia w – žingsnio plotis.

Iš lygčių (2.24), (2.47) ir (2.26) sudaromas pėdų trajektorijų generavimo metodas, skirtas kliūčių perlipimui. Grafiškai priklausomybes nuo laiko atvaizduoti galima taip, kaip parodyta 2.18 paveiksle. Kaip matyti iš paveikslo, tiek $z(t)$, tiek $y(t)$ kinta sinuso dėsnium. Tokiu būdu robotas gali daryti lanką, keldamas koją ne tik per kliūtis viršų, bet ir šoną.

Taikant kliūčių perlipimo pėdos trajektorijos generavimo metodą, nėra aišku, kuriuo atveju reikia parinkti kurį generavimo variantą, nes pati trajektorija

nesuteikia jokios informacijos apie energijos sąnaudas. Todėl darbe taip pat buvo atsižvelgiama į roboto kojai tenkantį elektros srovės stiprį.

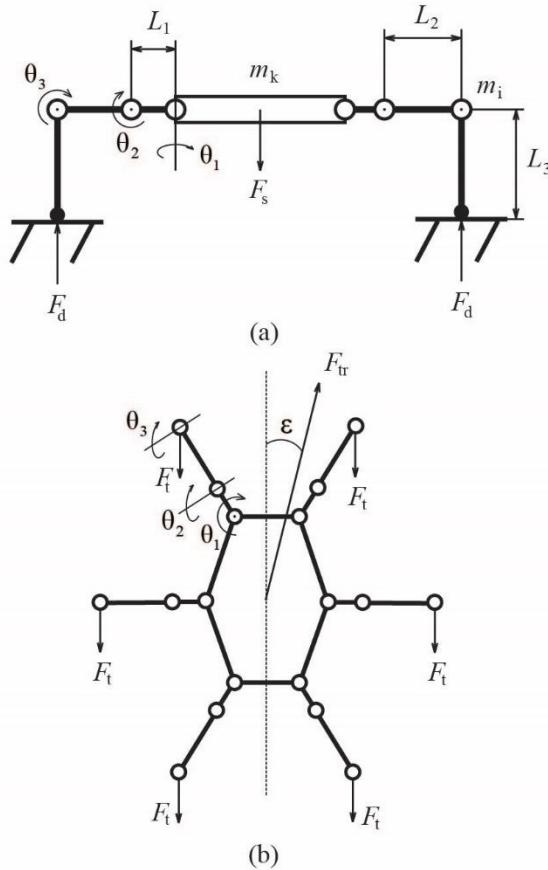


2.18 pav. Pėdos trajektorijos generavimas energetiškai efektyviam kliūčių perlipimui
Fig. 2.18. Foot trajectory generation for energy efficient obstacle avoidance

2.4. Energijos sąnaudų matematinis modelis

Norint tinkamai įvertinti roboto energijos sąnaudas, reikia sudaryti energijos sąnaudų matematinį modelį, kuris leistų nustatyti, kam yra sunaudojama energija ir kokią energiją reikia matuoti. Daugumai robotų naudojamos sukamojo judesio pavaros, todėl išjungus maitinimą jos nelaiko roboto masės, todėl robotas negali stovėti. Taigi energiją robotas naudoja tiek stovėdamas, tiek judėdamas, tačiau abiem atvejais jį veikia skirtingos jėgos, kurios ir nusako, kur sunaudojama energija (2.19 pav.).

Kaip matyti iš 2.19 paveikslo, robotą veikiančios jėgos stovėjimo metu yra svorio jėga F_s ir standumo jėga F_d , kuri veikia kiekvieną roboto koją. Judėjimo metu robotą taip pat veikia svorio ir standumo jėgos, tačiau atsiranda ir kitos jėgos, tokios kaip traukos jėga F_{tr} , trinties jėga F_t , inercijos momentas. Oro pasipriešinimas neturi įtakos, nes robotas juda lėtai. Dar viena priežastis, dėl kurios galėtų didėti energijos sąnaudos roboto judėjimo metu, yra roboto pėdų smūgiai į paviršius, kojos pastatymo metu. Tai, žinoma, priklauso nuo daug sąlygų (pvz. paviršiaus, judėjimo greičio, pėdos konstrukcijos), tačiau nustatyta, kad smūgio metu jėga gali siekti iki ~ 25 N, kai roboto masė yra $\sim 1,5$ kg (M. Luneckas *et. al.* 2018).



2.19 pav. Vaikščiojančią robotą veikiančių jėgų kinematinis modelis: (a) neutralaus stovėjimo metu; (b) judėjimo metu

Fig. 2.19. Walking robot force kinematic model: (a) during neutral stance; (b) during movement

Visoms robotą veikiančioms jėgoms įveikti, reikalinga energija, kad robotas galėtų stovėti ir judėti. Pilnutinė sistemos mechaninė energija yra lygi potencinės ir kinetinės energijų sumai:

$$E_p = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} \quad , \quad (2.48)$$

čia E_p – pilnutinė sistemos (mechaninė) energija, E_{kin} – kinetinė sistemos energija, E_{pot} – potencinė sistemos energija. Kinetinę sistemos energiją išreikšti galima taip:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad , \quad (2.49)$$

čia m – sistemos kūno masė, v – kūno tiesinis greitis, I – kūno inercijos momentas, ω – kūno kampinis greitis. Potencinę sistemos energiją išreikšti galima taip:

$$E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} kx^2 + mgh, \quad (2.50)$$

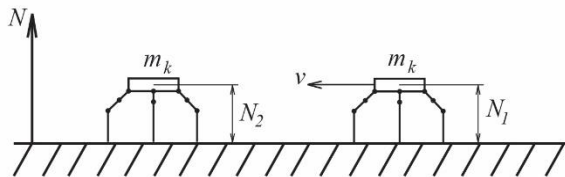
čia k – sistemos standumo koeficientas, x – kūno pailgėjimas, g – laisvojo kritimo pagreitis, h – kūno aukštis.

Daugumai vaikščiojančių robotų energija reikalinga pavaroms, kurios konstruojamos ant roboto kojų, todėl (2.49) ir (2.50) lygtis galima perrašyti išskaidant energiją atskiroms roboto kojoms:

$$E_{\text{kin}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2, \quad (2.51)$$

$$E_{\text{pot}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} k_i x_i^2 + m_i g h_i, \quad (2.52)$$

čia m_i – i -osios roboto kojos masė, v_i – i -osios roboto kojos tiesinis greitis, I_i – i -osios roboto kojos inercijos momentas, ω_i – i -osios roboto kojos kampinis greitis, k_i – i -osios roboto kojos standumo koeficientas, x_i – i -osios roboto kojos pailgėjimas, h_i – i -osios roboto kojos aukštis, n – roboto kojų skaičius.



2.20 pav. Vaikščiojančio roboto judėjimas neutralioje padėtyje, kai kūno pakėlimo aukštis nekinta

Fig. 2.20. Walking robot locomotion in neutral stance when body elevation is constant

(2.51) ir (2.52) išraiškos nėra tinkamos vaikščiojančio roboto energijos sąnaudoms įvertinti, nes sistemoje nėra visų sudedamųjų, kurios įeina į lygtis. Visų pirma, darbe naudojamam šešiakojui robotui nėra pritaikyti standumo elementai (pvz. spyruoklės), o ir pačių roboto kojų standumas galima laikyti yra labai didelis, nes naudojamos netamprios konstrukcinės detalės, todėl pirmasis potencinės energijos narys nėra reikalingas. Taip pat ir antrasis narys nėra reikalingas, nes visuose eksperimentuose roboto judėjimo metu jo kūnas yra visada iškeltas į tą patį aukštį (2.20 pav.). Tarkime, kad roboto kūno aukštis pradiniam taške yra N_1 , o galiniame taške – N_2 . Potencinės energijos,

skaičiuojamos pagal išraišką $E_{\text{pot}} = mg(N_2 - N_1)$, vertė yra lygi 0. Nors visų 3 skyriuje aprašytų eksperimentų metu roboto kūnas šiek tiek nukrypavo nuo idealiai horizontalios padėties, šie nukrypimai būdavo tokie maži, kad kūno pakėlimo aukštį buvo galima laikyti nepakitusiu (A. Skaburskytė *et. al.* 2016).

Taigi matyti, kad vaikščiojančio roboto pilnutinę energiją galima skaičiuoti tik kaip kinetinę energiją:

$$E_p = E_{\text{kin}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2. \quad (2.53)$$

Pamatuoti roboto kojų tiesinį ar sukamąjį greičius ir inercijos momentus nėra paprasta, nes, kaip minėta 2.1 poskyryje, šiame darbe naudojamo šešiakojo roboto pėdos trajektorijos nėra tiesinės. Tarp kiekvienų dviejų pėdos trajektorijos taškų šie parametrai kinta ir tai komplikuoja jų įvertinimą darbo metu. Pilnutinę suvartojamą roboto energiją galima įvertinti ir taikant paprastesnį metodą, kuris yra tiek pat tikslus, kaip ir kiti energijos sąnaudų matavimo metodai. Toliau pateikiamas paaiškinimas.

HexaV4 robotui naudojamos tik elektrinės pavaros ir yra naudojamas įtampos šaltinis, todėl pilnutinę mechaninę energiją atitinka elektros energija. HexaV4 robotas yra savo gamybos šešiakojis robotas, todėl elektros energijos matavimas ir skaičiavimas buvo paprasčiausias iš visų energijos matavimo metodų, nes elektros srovės stiprio matavimo schemą buvo galima jungti bet kurioje roboto vietoje.

Zinant, kad robotui reikalinga elektros energija tiek pavaroms, tiek valdymo sistemai, pilnutinę roboto suvartojamos energijos kiekio išraišką galima užrašyti taip:

$$E_c = E_v + \sum_{i=1}^n E_{ki}, \quad (2.54)$$

čia E_c – vieno roboto judėjimo ciklo pilnutinė energija, E_v – roboto valdymo sistemos suvartojamas energijos kiekis, E_{ki} – vienos roboto kojos visų pavarų suvartojamas energijos kiekis, n – kojų skaičius. Tai yra daug paprastesnis būdas tinkamai įvertinti vaikščiojančio roboto energijos sąnaudas, todėl darbe ir buvo taikomas šis metodas.

Kaip jau buvo minėta 2.1 poskyryje, šešiakojo roboto valdymo sistemai tenkantis elektros srovės stipris yra pakankamai mažas, kad būtų neįskaičiuojamas tyrimuose, todėl pilnutinė šešiakojo roboto suvartojamos energijos vertė buvo supaprastinta iki tokios išraiškos:

$$E_c = \sum_{i=1}^6 E_{ki}. \quad (2.55)$$

Kaip matoma iš išraiškos (2.55), roboto suvartojamas energijos kiekis labiausiai priklauso tik nuo kojų suvartojamos energijos kiekio, kas prilygsta pavarų suvartojamai energijai.

Vienos kojos suvartojamos energijos kiekis išreiškiamas taip:

$$E_k = P_k \cdot t_k, \quad (2.56)$$

čia P_k – vienos roboto kojos naudojamos galios kiekis, t_k – vienos roboto kojos perkėlimo ciklo laikas. Naudojamos galios kiekis gali būti išreikštas taip:

$$P_k = U \cdot I_k, \quad (2.57)$$

čia U – šaltinio įtampos vertė, I_k – vidutinis roboto kojai tenkantis elektros srovės stipris. Kojos darbo laikas išreiškiamas taip:

$$t_k = \frac{d_k}{v_{\text{vid}}}, \quad (2.58)$$

čia d_k – kojos nueitas kelias vieno žingsnio metu, v_{vid} – vidutinis kojos judėjimo greitis. Vidutinis greitis naudojamas dėl paprastumo, nes, iš tikrųjų, kojos judėjimo greitis nėra visada vienodas. Pėdos trajektorija nėra tiesinė visuose taškuose, todėl ir greitis kiekviename taške yra skirtingas.

Ištačius lygtis (2.56)–(2.58) į lygtį (2.55) gaunama galutinė šešiakojo roboto suvartojamos energijos kiekio išraiška vieno žingsnio metu:

$$E_c = \sum_{i=1}^6 U \cdot I_k \cdot \frac{d_k}{v_{\text{vid}}}. \quad (2.59)$$

Prieš parenkant judėjimo parametrus, buvo išskirti du atvejai. Kojos perkėlimo laikas priklauso nuo roboto judėjimo metodo: roboto kojų judesiai gali būti sinchronizuoti laiko atžvilgiu, kai kiekvienas žingsnis trunka tiek pat laiko, arba kojų judesiai gali būti nesinchronizuoti laiko atžvilgiu, kai kiekvienas žingsnis trunka skirtingą laiko tarpą, priklausomai nuo žingsnio trajektorijos ilgio. Jeigu kojų judesiai nėra sinchronizuoti laiko atžvilgiu, (2.59) išraiška lieka nepakitusi. Tačiau jei kojų judesiai yra sinchronizuoti laiko atžvilgiu, trajektorijos ilgio ir kojos judėjimo greičio santykis tampa pastovus:

$$\frac{d_k}{v_{\text{vid}}} = \text{const}. \quad (2.60)$$

Abiem atvejais buvo ieškomi žingsnio parametrai, kuriais judėdamas robotas suvartoja mažiausią energijos kiekį. Pirmuoju atveju roboto judėjimo metu kito tik pėdos nueitas kelias žingsnio metu d_k . Buvo siekiama rasti mažiausią parametro vertę, kad roboto energijos sąnaudos būtų mažiausios. Todėl buvo ieškoma trumpiausia žingsnio trajektorijos ilgio vertė:

$$\arg \min_{w, h, t_k} (d_k). \quad (2.61)$$

Šiuo atveju vienos kojos energijos sąnaudos priklauso nuo roboto žingsnio aukščio h , žingsnio pločio w , ir nuo elektros srovės stiprio I . Žingsnio aukščio ir pločio apribojimai yra tokie: $w \in [0; 0,06]$ m ir $h \in [0,01; 0,1]$ m. Elektros srovės stipris priklauso nuo žingsnio parametrų, todėl jį galima išreikšti kaip funkciją nuo žingsnio aukščio ir pločio:

$$I_k = f(w, h). \quad (2.62)$$

Siekiant rasti mažiausias judėjimo parametrų vertes pirmuoju atveju, buvo išreikštas pėdos trajektorijos ilgis d_k . Žinoma, kad roboto judėjimo ciklo metu yra dvi fazės: palaikymo fazė ir perkėlimo fazė. Kiekvienos fazės metu pėdos trajektorijos forma yra skirtinga. Palaikymo fazės metu roboto koja yra pastatyta ant paviršiaus ir juda atgal, todėl palaikymo fazės metu pėdos trajektorijos forma yra tiesė. Perkėlimo fazės metu roboto koja juda sinuso formos lanku. Taigi pėdos trajektorijos ilgį galima išreikšti kaip šių kreivių sumą:

$$d = l + s, \quad (2.63)$$

čia l – tiesės ilgis, s – sinuso lanko ilgis. Tiesės ilgis prilygsta roboto žingsnio ilgiui, kuris yra žinomas dydis, todėl jo išreikšti nereikia. Tačiau sinuso lanko ilgis gali kisti priklausomai nuo kliūčių dydžių. Standartinė sinuso lanko ilgio išraiška yra tokia:

$$s = \int_a^b \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2} dx, \quad (2.64)$$

čia dx , dy ir dz – erdvės koordinatinių kitimas pagal laiką t .

Žinant, kad kojos perkėlimui reikalingas tik pusės periodo sinusas, integravimas buvo atliekamas nuo 0 iki π intervale. Taip pat žinant, kad kojos perkėlimas vyksta zy plokštumoje, todėl x koordinatė išnykta, o integravimas turi būti atliekamas pagal žingsnio ilgį l , nes robotas juda x koordinatės kryptimi. Todėl (2.58) lygtis buvo perrašyta atitinkamai:

$$s = \int_0^\pi \sqrt{1 + (dy)^2 + (dz)^2} dl. \quad (2.65)$$

Reikiamos y ir z išraiškos tiesiam judėjimui buvo gautos iš (2.25) ir (2.26) lygčių. Tačiau reikia imti tik tas išraiškas, kai $\varphi_i < t \leq \varphi_i + 1$ nes tada vyksta kojos perkėlimo fazė:

$$y = w \cdot \sin((t - \varphi_i) \cdot \pi), \quad (2.66)$$

$$z = h \cdot \sin((t - \varphi_i) \cdot \pi). \quad (2.67)$$

Išvestinių dy ir dz vertės gaunamos diferencijuojant lygtis (2.58) ir (2.59):

$$y'(t) = (\pi \cdot w \cdot \cos((\pi \cdot (\varphi_i - t)) / 2)) / 2, \quad (2.68)$$

$$z'(t) = (\pi \cdot h \cdot \cos((\pi \cdot (\varphi_i - t)) / 2)) / 2. \quad (2.69)$$

Ištačius išraiškas (2.68) ir (2.69) į lygtį (2.65) ir pakėlus kvadratu gaunama tokia išraiška:

$$s = \int_0^{\pi} \sqrt{1 + \frac{\pi^2 \cdot w^2 \cdot \cos^2((\varphi_i - t) \cdot \pi / 2)}{4} + \frac{\pi^2 \cdot h^2 \cdot \cos^2((\varphi_i - t) \cdot \pi / 2)}{4}} dl. \quad (2.70)$$

Sutraukus bendruosius narius ir įstačius išraišką į (2.55) lygtį:

$$d = l + \int_0^{\pi} \sqrt{\frac{4 + \pi^2 \cdot w^2 \cdot \cos^2((\varphi_i - t) \cdot \pi / 2) + \pi^2 \cdot h^2 \cdot \cos^2((\varphi_i - t) \cdot \pi / 2)}{4}} dl. \quad (2.71)$$

(2.71) lygtis yra tikslo funkcija (2.61) lygtimi išreikštam uždaviniui spręsti. Kaip matyti iš tikslo funkcijos, šiam atvejui reikalingi parametrai yra žingsnio ilgis l , aukštis h , plotis w , kojos perkėlimo fazė φ_i ir laikas t . Ši lygtis yra galutinė roboto pėdos trajektorijos ilgio išraiška, kuri buvo naudojama parenkant žingsnio parametrus energijos sąnaudų minimizavimui.

Antruoju atveju parametų parinkimas yra paprastesnis, nes kinta tik kojai tenkantis elektros srovės stipris I_k . Todėl energijos sąnaudų minimizavimui buvo naudojama tokia išraiška:

$$\arg \min_{w, h} (I_k). \quad (2.72)$$

(2.72) lygtimi išreikšto parametų parinkimo uždavinio tikslo funkcijos negalima nusakyti lygtimi, nes nėra žinomas elektros srovės stiprio kitimo dėsnis. Tačiau kaip ir pirmuoju atveju, yra žinoma, kad elektros srovės stipris priklauso nuo žingsnio parametų ((2.62) lygtis), todėl šio parametų parinkimo apribojimais išlieka tokie patys. Tikslo funkciją (2.72) lygtimi išreikšto parametų parinkimo uždaviniui atitinka elektros srovės stiprių matrica, padaryta pagal 3.5 lentelę, kuri pateikta 3.3 poskyryje. Kintamieji, kurie įvedami į šį parametų parinkimo uždavinį yra kliūčių aukštis H ir plotis W .

Imitacinio šešiakojo roboto modelio atveju šie parametų parinkimo atvejai tinka be papildomų sąlygų, nes nėra įskaičiuojami kojų atsitrenkimai į kliūtis. Atliekant tyrimus su fiziniu modeliu, roboto kojoms atsitrenkiant į kliūtis, roboto judėjimas buvo vėlinamas tam tikrą laiką, nes pėdos trajektorijos pakeitimas vyksta tik žingsnio pradžioje. Lygtis (2.55) tampa nebetinkama roboto energijos sąnaudoms įvertinti, nes į laiką, per kurį koja atlieka vieną žingsnį, nėra įskaičiuotas vėlinimas atsitrenkus į kliūtį. Siekiant tinkamai įvertinti suvartojamos energijos kiekį, buvo nagrinėjamas energijos kiekis, kurį robotas suvartoja nueidamas visą jam duotą atstumą.

Idealiu atveju, pilnutinę energiją galima išreikšti taip:

$$E_p = P_{\text{vid}} \cdot t_p, \quad (2.73)$$

čia E_p – pilnutinė energija, P_{vid} – vidutinė naudojamos galios vertė, t_p – pilnutinis roboto veikimo laikas, kuris išreiškiamas taip:

$$t_p = \frac{s_p}{v}, \quad (2.74)$$

čia s_p – pilnas roboto nueitas kelias, v – roboto judėjimo greitis. Visam atstumui nueiti robotas turi atlikti tam tikrą judėjimo ciklą skaičių, todėl išraišką (2.74) galima perrašyti taip:

$$t_p = S \cdot \frac{l}{v}, \quad (2.75)$$

čia S – judėjimo ciklą skaičius, l – žingsnio ilgis. Įstačius (2.75) lygtį į (2.73) gaunamas pilnutinės energijos išraiška idealiu atveju (kai robotui atsitrenkiant į kliūtis nėra sugaištama papildomai laiko):

$$E_p = P_{\text{vid}} \cdot S \cdot \frac{l}{v}. \quad (2.76)$$

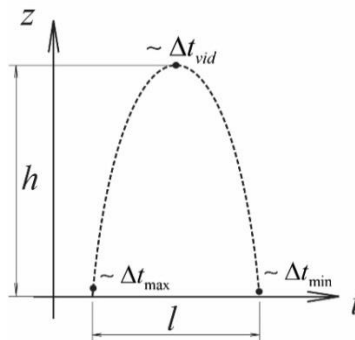
Tačiau lygtis (2.76) nėra tinkama realioms energijos sąnaudoms įvertinti. Žinant, kad robotas sugaišta tam tikrą laiką atsitrenkdamas į kliūtis, šią lygtį reikia pakeisti taip:

$$E_p = P_{\text{vid}} \cdot \left(S \cdot \frac{l}{v} + \Delta t \right), \quad (2.77)$$

čia Δt – laiko vėlinimas dėl atsitrenkimo į kliūtis. Šis parametras priklauso nuo judėjimo ciklą skaičiaus su kliūtimis ir roboto kojų skaičiaus, nes vieną kliūtį robotas turės įveikti tiek kartų, kiek jo viename šone yra kojų. Remiantis tuo, laiko užvėlinimo išraišką galima išreikšti taip:

$$\Delta t = \bar{S} \cdot (\Delta t_1 + \dots + \Delta t_{n/2}), \quad (2.78)$$

čia \bar{S} – judėjimo ciklą skaičius su kliūtimis, $\Delta t_1 + \dots + \Delta t_{n/2}$ – atskirų roboto kojų laiko vėlinimas atsitrenkiant į kiekvieną kliūtį, n – roboto kojų skaičius. $\Delta t_1 + \dots$ narius išreikšti galima tik panagrinęjus 2.21 paveikslą.



2.21 pav. Pėdos trajektorijos perkėlimo fazės vėlinimo laikai
Fig. 2.21. Foot trajectory transfer phase time delays

Vėlinimo laikas Δt kiekvienai kojai priklauso nuo to, kuriuo metu koja atsitrenks į kliūtį. Į vieną kliūtį koja gali atsitrenkti žingsnio pradžioje ir vėlinimo laikas bus maksimalus, nes reikės laukti visą kojos perstatymo laiką, kol bus daromas naujas žingsnis. Kitu atveju koja gali atsitrenkti žingsnio gale ir šiuo atveju vėlinimo laikas bus minimalus, nes iš karto bus atliekamas naujas žingsnis. Tačiau pasakyti tikslų kojos atsitrenkimo į kliūtį momentą yra neįmanoma, nes tai priklauso nuo įvairių sąlygų roboto judėjimo metu (pvz. praslydimas, trintis ir t.t.). Todėl norint išreikšti, kam lygus vėlinimo laikas kiekvienai kojai atskirai, reikia įvesti kintamąjį, kuris sugeneruotų atsitiktinį skaičių tarp 0 ir maksimalaus kojos perkėlimo laiko, tokiu būdu imituojant realų roboto judėjimą. Tada vėlinimo laiko išraiška kiekvienai kojai atrodo taip:

$$\Delta t_i = \text{rand}\left(\frac{l}{v_{\text{vid}}}\right), \quad (2.79)$$

čia Δt_i – kojos vėlinimo laikas, $\text{rand}()$ – atsitiktinį skaičių generuojanti funkcija nuo 0 iki nurodytos vertės. Kaip matoma iš lygties (2.79), maksimali vėlinimo laiko vertė yra pilnas žingsnio atlikimo laikas, kuris randamas padalinant žingsnio ilgį l iš vidutinio kojos judėjimo greičio v_{vid} .

Šešiakojo roboto atveju vienoje roboto pusėje yra trys kojos, todėl lygtį (2.78) galima išreikšti taip:

$$\Delta t = \bar{S} \cdot (\Delta t_p + \Delta t_v + \Delta t_G), \quad (2.80)$$

čia Δt_p – priekinės kojos vėlinimo laikas, Δt_v – vidurinės kojos vėlinimo laikas, Δt_G – galinės kojos vėlinimo laikas. Įstačius (2.79) į (2.80) gaunama:

$$\Delta t = \bar{S} \cdot \left(\text{rand}\left(\frac{l}{v_{\text{vid}}}\right) + \text{rand}\left(\frac{l}{v_{\text{vid}}}\right) + \text{rand}\left(\frac{l}{v_{\text{vid}}}\right) \right). \quad (2.81)$$

Nors lygties (2.81) nariai yra vienodi, sutraukti jų negalima, nes kiekvienos kliūties atveju visoms kojos bus generuojamas visiškai kitas vėlinimo laikas, todėl daugyba iš 3 reikštų, kad visos kojos atsitrenkia į kliūtį tokiu pačiu perkėlimo fazės metu, o to tikimybė yra labai maža. Įstačius (2.81) į lygtį (2.77) gaunama galutinė pilnutinės suvartojamos energijos kiekio išraiška šešiakojo roboto atveju:

$$E_p = P_{\text{vid}} \cdot \left(S \cdot \frac{l}{v} + \bar{S} \cdot \left(\text{rand}\left(\frac{l}{v_{\text{vid}}}\right) + \text{rand}\left(\frac{l}{v_{\text{vid}}}\right) + \text{rand}\left(\frac{l}{v_{\text{vid}}}\right) \right) \right). \quad (2.82)$$

Darbe taip pat buvo vertinamas šešiakojo roboto energetinis efektyvumas skaičiuojant transportavimo kaštus pagal šią išraišką:

$$COT = \frac{P}{mgv}. \quad (2.83)$$

Ši informacija buvo vertinga nustatant bendrą vaikščiojančio roboto efektyvumą ir lyginti gautus rezultatus su kitais šešiakojais vaikščiojančiais robotais ir mikro robotais. Tai leido tinkamai įvertinti sukurtų metodų efektyvumą.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Šešiakojo vaikščiojančio roboto kinematinis modelis sudarytas taikant Denavito-Hartenbergo ir atvirkštinės kinematikos skaičiavimo geometrinio būdu vienai kojai metodus. Taikant kelis skirtingus metodus roboto kinematinio modelio sudarymui galima patikrinti sudaryto modelio adekvatumą.
2. Šešiakojo roboto imitacinis modelis sudarytas MATLAB® programos aplinkoje. Naudojant sudarytą modelį galima patikrinti roboto judėjimą įvairiose aplinkose, o taip pat galima patikrinti visų sukurtų metodų veikimą įvairiomis sąlygomis.
3. Patobulinti pėdų trajektorijų generavimo ir eisenų metodai leidžia realiu laiku valdyti vaikščiojantį robotą jam judant lygiu paviršiumi. Šie metodai gali būti naudojami roboto žingsnio ilgiui, aukščiui, judėjimo greičiui bei kryptčiai keisti.
4. Sudarytas kliūčių ir paviršiaus tipo klasifikavimo modelis gali būti naudojamas atskirti paviršiaus nelygumus nuo kliūčių ir suskirstyti kliūtis į atskiras kategorijas atsižvelgiant į kliūčių dydį pagal roboto galimybes bei kliūčių dydį ir tankį aplinkoje. Kliūčių skirstymas į kategorijas pagal jų dydį leidžia parinkti metodus jų įveikimui.
5. Kliūčių aptikimo ir vertinimo metodas sudarytas naudojant taktilinius jutiklius ir elastinius prailginimus ant roboto kojų priekiu. Šis metodas gali būti naudojamas robotui atpažinti priekyje esančias kliūtis kojomis prisilietus prie jų.
6. Sudarytas kliūčių perlipimo metodas keičiant pėdų trajektorijos generavimo metodą. Trajektorijos generavimo metodas yra naujas būdas robotui perlipti per įvairaus žinomo dydžio kliūtis keičiant žingsnio parametrus, tokius kaip žingsnio aukštis ir ilgis. Naudojant šį

metodą vaikščiojantis robotas gali efektyviai įveikti visas prieš jį esančias mažo dydžio kliūtis. Sukurtas metodas yra bendras ir todėl tinkamas bet kokiems vaikščiojantiems robotams.

7. Efektyviam kliūčių perlipimui pėdos trajektorijos generavimo metodas buvo papildytas žingsnio pločio parametru, naudojant kurį robotas gali kelti koją ne tik per kliūties viršų, bet ir per šoną. Šis pėdos trajektorijos generavimo metodas gali būti naudojamas parinkti energetiškai efektyviausius kojos perkėlimo parametrus.

8. Sudarytas matematinis modelis energijos sąnaudų skaičiavimui robotui judant paviršiumi su skirtingo dydžio ir tankio kliūtimis. Modelyje įvertinamas vėlinimo laikas, kuris atsiranda robotui atsitrenkiant į kliūtis. Šis modelis gali būti naudojamas įvertinti pilną roboto suvartojamą energijos kiekį ir patikrinti energijos sąnaudų priklausomybę nuo kliūčių dydžių ir tankio aplinkoje.

Šešiakojo roboto energetinio efektyvumo tyrimai

Šio tyrimo tikslas yra ištirti vaikščiojančio roboto energetinį efektyvumą judant lygiu paviršiumi skirtingomis eisenomis, įvertinti energijos sąnaudų minimizavimo metodo efektyvumą robotui judant per kliūtis, ištirti energijos sąnaudų priklausomybę nuo kliūčių dydžio ir tankio.

Šiame skyriuje pateikiami vaikščiojančio roboto judėjimo lygiu paviršiumi be kliūčių ir su kliūtimis energetinio efektyvumo tyrimų rezultatai. Energetinis efektyvumas judant lygiu paviršiumi nustatomas keičiant eisenas bei judėjimo greitį. Roboto judėjimas per kliūtis vertinamas pagal nuokrypius nuo numatytos judėjimo trajektorijos bei kaip tiksliai robotas pasiekia galinį tašką. Taip pat pateikiamas šešiakojo roboto energetinio efektyvumo tyrimų rezultatai taikant pėdos trajektorijos keitimo metodą ir energijos sąnaudų priklausomybę nuo kliūčių dydžio ir tankio.

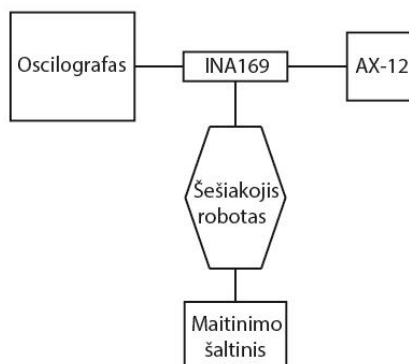
Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (M. Luneckas, T. Luneckas 2014; M. Luneckas, T. Luneckas, V. Gavelis, V. Valaitis, D. Udris 2015; M. Luneckas, T. Luneckas, D. Udris 2018).

3.1. Šešiakojo roboto energetinio efektyvumo judant lygiu paviršiumi tyrimas

Prieš tiriant roboto energijos sąnaudas judėjimo metu, svarbu įvertinti, kiek energijos robotas suvartoja stovėdamas vietoje. Tai leis nustatyti, roboto sunaudojamą energijos kiekį vaikščiojimui. Šis tyrimas plačiau aprašytas šaltinyje (M. Luneckas *et. al.* 2013). Buvo nustatyta, kad robotui stovint ant visų šešių kojų, vidutinis elektros srovės stipris lygus 734 mA, o stovint ant trijų kojų – 792 mA. Žinant, kad roboto maitinimo įtampa lygi 11 V, gaunama, kad šešiakojo roboto vartojama galia stovint ant šešių ir trijų kojų yra ~8 W ir ~9 W. Šie rezultatai įrodo, kad roboto išlaikymui stacionarioje padėtyje, reikalinga energija.

Ankstesniuose vaikščiojančio roboto judėjimo lygiu paviršiumi tyrimuose pastebėta, kad roboto energetinį efektyvumą stipriai įtakoja eisenos bei judėjimo greitis (M. Luneckas *et. al.* 2014). Šiame skyriuje aprašomas tyrimas, kurio tikslas yra nustatyti, kiek padidėja roboto energijos sąnaudos lyginant energijos sąnaudas stovėjimo ir judėjimo metu. Taip pat svarbu yra surasti sąryšį tarp energijos sąnaudų ir roboto judėjimo greičio bei eisenos, o taip pat sukurti algoritmą, naudojant kurį būtų galima parinkti esamomis sąlygomis minimalų energijos kiekį suvartojančią roboto eisena.

Šešiakojo roboto energetinio efektyvumo tyrimui atlikti buvo naudojamas oscilografas, prijungtas prie elektros srovės stiprio matavimo schemos. Robotu pavaroms tenkančio elektros srovės stiprio matavimo funkcinė schema parodyta 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Šešiakojui robotui tenkančio elektros srovės stiprio matavimo funkcinė schema
Fig. 3.1. Hexapod robot current consumption measurement diagram

Siekiant užtikrinti roboto stabilų judėjimą ir išvengti kojų praslydimų ant paviršiaus, visi eksperimentai buvo atlikti ant minkšto paviršiaus (3.2 pav.).

Tokiu būdu robotas visada nueidavo numatytą atstumą per tą patį laiką, ir taip būdavo užtikrinamas matavimų vienodumas.

Norint apskaičiuoti roboto vidutinę galios vertę naudojant (2.49) lygtį, reikia įvertinti roboto pavarų vidutinį elektros srovės stiprį I_{vid} . Įprastai vidutinis elektros srovės stipris gali būti apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

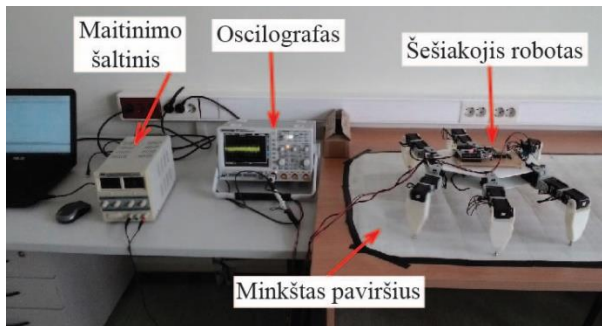
$$I_{\text{vid}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt, \quad (3.1)$$

čia t_1 ir t_2 – elektros srovės stiprio matavimo laiko intervalo vertės, $I(t)$ – elektros srovės stiprio kitimo dėsnis laiko atžvilgiu.

Matuojant robotui tenkančią elektros srovės stiprį elektros srovės stiprio kitimo dėsnis nėra žinomas, todėl vidutinis elektros srovės stipris apskaičiuojama taip:

$$I_{\text{vid}} = \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_j}{j}, \quad (3.2)$$

čia I_1, I_2, \dots, I_j – momentinės elektros srovės stiprio vertės, j – momentinių verčių skaičius.

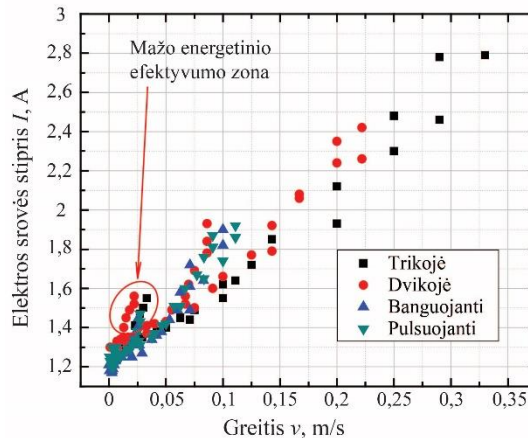


3.2 pav. Šešiakojui robotui tenkančio elektros srovės stiprio matavimo įranga
Fig. 3.2. Hexapod robot current consumption measurement equipment

Kiekvieno matavimo trukmė buvo 3 s. Toks trumpas laikas buvo pasirinktas dėl kelių priežasčių. Visų pirma, buvo naudojamos įtampos šaltinis, kuris prie roboto buvo prijungtas laidu. Laido ilgis turėjo būti mažas, nes kuo ilgesnis laidas, tuo didesnė jo varža. Per didelė laido varža galėtų stipriai įtakoti elektros srovės stiprio matavimus ir būtų nustatytos neteisingos roboto energijos sąnaudos. Kita priežastis buvo tai, kad robotui judant didesniu greičiu, robotas nukrypdydavo į šoną ir nulipdavo nuo minkšto paviršiaus, o judant skirtingais paviršiaus tipais, roboto kojos remiasi į paviršių skirtinga jėga, ko pasėkoje taipogi būtų nustatytos neteisingos roboto energijos sąnaudos. Per 3 s oscilografas išmatuodavo 6000 robotui tenkančių elektros srovės stiprio verčių.

Taigi šių eksperimentų metu tarp kiekvienos išmatuotos momentinės elektros srovės stiprio vertės buvo 0,5 ms. Toks laikas tarp elektros srovės stiprio verčių yra adekvatus, todėl galima teigti, kad robotui tenkantis elektros srovės stipris buvo matuojamas tinkamai. Kiekvienas matavimas buvo kartojamas 3 kartus, kad užtikrinti vidutinės vertės stabilumą. Kai kuriais atvejais tekdavo matuoti ir 4 ar 5 kartus, kad būtų gaunami tik tinkamiausi matavimai, o blogi rezultatai buvo atmetami ir skaičiavimuose nenaudojami.

Visų pirma buvo atlikti robotui tenkančio elektros srovės stiprio matavimai prie įvairių judėjimo greičių naudojant keturias pagrindines šešiakojo eisenas: trikoję, dvikoję, banguojančią ir pulsuojančią. Šie matavimai buvo skirti tam, kad nustatyti, prie kokio judėjimo greičio ir eisenos robotui tenka mažiausias elektros srovės stipris, nes būtent nuo šio parametro priklauso energijos sąnaudos (2.4 poskyris). Skirtingos eisenos pasižymi skirtingais greičių diapazonais, todėl buvo matuojami roboto judėjimo greičiai. Roboto greitis buvo keičiamas keičiant servo pavarų greičius bei žingsnio trajektorijos ilgį. Greičio nustatymas buvo atliekamas matuojant laiką, per kurį robotas nukeliauja duodą atstumą; atstumas buvo užduodamas skirtingas ir priklausė nuo roboto eisenos bei judėjimo greičio. Atlikus greičio matavimus, toliau buvo atliekami robotui tenkančio elektros srovės stiprio eksperimentai pagal 3.1 paveiksle pateiktą schemą. Robotui tenkančio elektros srovės stiprio priklausomybė nuo judėjimo greičio pavaizduota 3.3 paveiksle. Nors, kaip matyti iš 3.3 paveikslo, kai kuriomis eisenomis judant, roboto greitis yra labai mažas, jis vis tiek buvo tinkamas eksperimentuose, nes mažas greitis leido patikrinti sąryšį tarp roboto energijos sąnaudų stovint ir žingsniuojant.

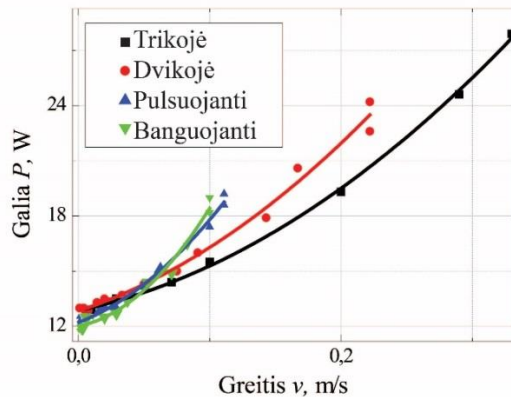


3.3 pav. Robotui tenkančios elektros srovės stiprio priklausomybė nuo judėjimo greičio ir eisenos

Fig. 3.3. Robot current consumption dependence on movement speed and gait

Iš rezultatų, kurie pavaizduoti 3.3 paveiksle, buvo nustatyta, kad visos eisenos skiriasi greičio diapazonu, kuris priklauso nuo žingsnio trajektorijos ilgio bei servo pavarų sukimosi greičio. Trikojė eiseną pasižymi didžiausiu greičiu, kuris siekia 0,33 m/s, tuo tarpu mažiausią judėjimo greitį pasiekti robotas gali judėdamas banguojančia eiseną. Nors banguojanti ir pulsuojanči eisenos turi labai panašų greičių diapazoną, šios eisenos vis tiek buvo pasirinktos taikyti eksperimentų metu dėl didesnio duomenų kiekio. Elektros srovės stiprio priklausomybės nuo judėjimo greičio rezultatai taip pat parodo, kad ne visos žingsnio ilgio ir pavarų greičių kombinacijos duoda energetiškai efektyvų rezultatą, nes elektros srovės stipris staigiai išauga. Dėl šios priežasties darbe buvo naudojamos tik tos kombinacijos, kurias naudojant buvo gaunamos mažiausios elektros srovės stiprio vertės.

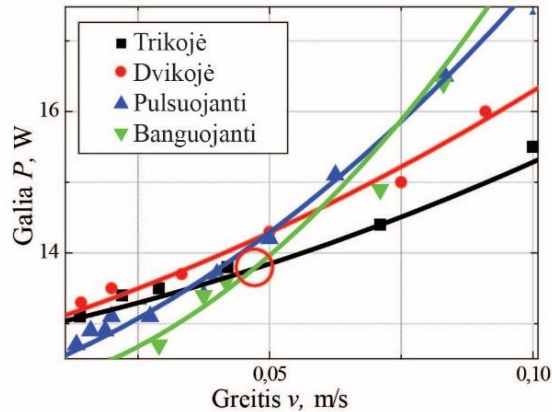
Vidutinės galios priklausomybė nuo roboto eisenos ir greičio buvo perskaičiuojama naudojant 3.3 paveiksle parodytus duomenis. Rezultatas, kuris yra pateiktas 3.4 paveiksle, parodo, kad nei dvikojė, nei pulsuojanči eisenos nėra energetiškai efektyvios visame greičių diapazone. Tik judant banguojančia eiseną mažais greičiais (nuo 0 iki 0,046 m/s) ir judant trikojė eiseną dideliais greičiais (nuo 0,046 iki 0,33 m/s) robotas suvartoja mažiausią energijos kiekį.



3.4 pav. Šešiakojo roboto vidutinės galios priklausomybė nuo eisenos ir greičio
Fig. 3.4. Hexapod robot average power consumption dependence on gait and speed

Iš 3.5 paveiksle pateikto grafiko buvo nustatytas eisenos keitimo greitis, pritaikius eksponentinį aproksimavimą. Toks aproksimavimo būdas grindžiamas tuo, kad esant dideliems roboto judėjimo greičiams, servo pavaros taip pat juda dideliais greičiais. Pavaroms judant greičiais artimais maksimaliems, stipriai padidėja elektros srovės stipris. Iš gautų rezultatų nustatyta, kad eisenos keitimo

greitis yra 0,046 m/s, pasiekus kuri, robotas turi pakeisti banguojančią eiseną į trikoję, norint išlaikyti minimalų suvartojamos energijos kiekį.



3.5 pav. Šešiakojo roboto vidutinės galios priklausomybė nuo eisenos ir greičio; išdidinta kreivių susikirtimo zona

Fig. 3.5. Hexapod robot average power consumption dependence on gait and speed; enlarged curve intersection zone

Siekiant įvertinti roboto energetinį efektyvumą, buvo apskaičiuotos teorinės energijos sąnaudos pagal lygtis (2.47) ir (2.48). Buvo pasirinkta, kad roboto veikimo laikas yra 1 h (3600 s). Judėjimo greitis iš pradžių parinktas $v = 0,02$ m/s, o vėliau – $v = 0,1$ m/s. Naudojantis gautais duomenimis buvo apskaičiuotos šešiakojo roboto energijos sąnaudos visoms eisenoms. Rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Teorinės šešiakojo roboto energijos sąnaudos skirtingoms eisenoms, kai darbo laikas 1 val.

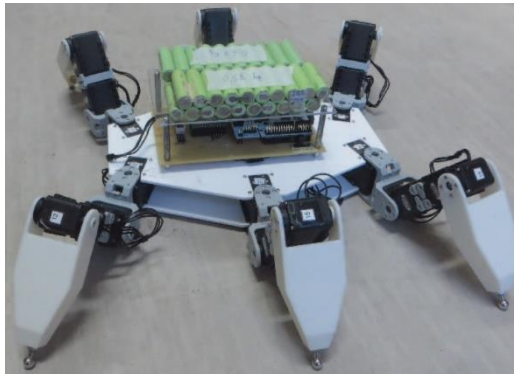
Table 3.1. Theoretical hexapod robot energy consumption for different gaits, when working time 1 h

Greitis, m/s	Eisenos			
	Trikojė	Dvikojė	Pulsuojanti	Banguojanti
	<i>E, kJ</i>			
0,02	47,5	54	47,2	45
0,1	55,8	59,8	62,6	65,5

Energijos sąnaudų skirtumai tarp trikojės ir dvikojės eisenų ir skirtumai tarp banguojančios ir trikojės eisenų gali kisti nuo 2,5 iki 9,7 kJ šiam atvejui (3.1 lentelė). Tačiau atsižvelgus į 3.5 paveikslą, skirtumai tarp šių eisenų gali būti nuo 1 iki 4 W. Tai parodo, kad parenkant tinkamą eiseną priklausomai nuo roboto judėjimo greičio, galima pasiekti, kad robotas suvartos 7,7–21% mažesnę

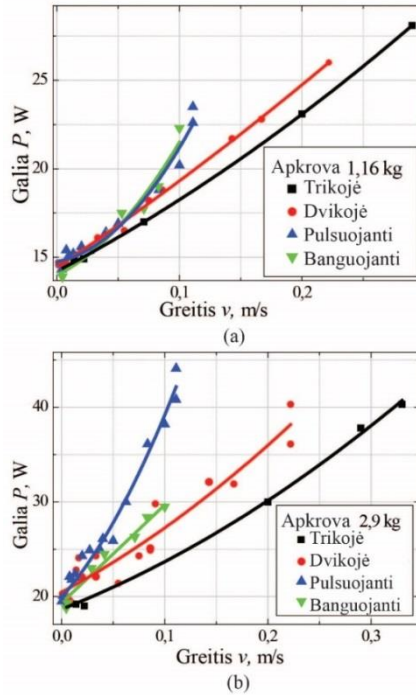
energijos kiekį. Nors toks efektyvumas gali atrodyti mažas, tačiau jei roboto veikimo laikas būtų didesnis, šis skirtumas turėtų didesnę įtaką roboto veikimui.

Siekiant užtikrinti, kad toks skirtingų eisenų efektyvumas yra teisingas, eksperimentas buvo pakartotas su papildoma apkrova ant roboto (3.6 pav.). Buvo naudojamos papildomos 1,16 kg ir 2,9 kg masės apkrovos. Pirmosios apkrovos santykis su roboto mase yra $\sim 0,77$, o antrosios – $\sim 1,93$. Gauti rezultatai pavaizduoti 3.7 paveiksle. Kaip matyti, visos skirtingų eisenų kreivės yra išsidėsčiusios taip pat, kaip be apkrovos, tačiau eisenos keitimo greitis pasislenka į kairę pusę prie 1,16 kg apkrovos ($v = 0,028$ m/s). Tik esant 2,9 kg apkrovai kreivių padėtis pradeda kisti ir kreivių susikirtimo taškas pradingsta. Tačiau visais atvejais tiek dvikojė, tiek pulsuojanči eisenos nėra energetiškai efektyvios. Tai įrodo, kad banguojanti ir trikojė eisenos išlieka tinkamiausios eisenos prie mažų ir didelių greičių esant skirtingoms sąlygoms, kad robotas suvartotų mažiausią energijos kiekį (3.7 pav.).



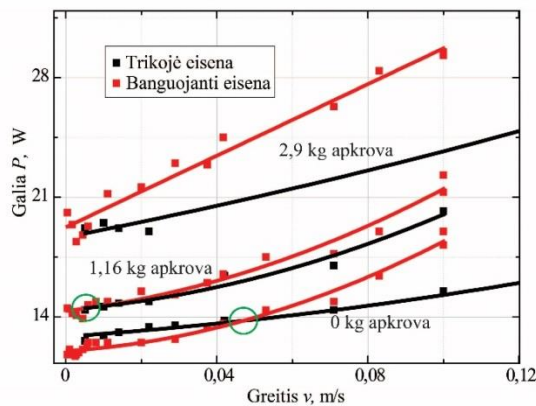
3.6 pav. Šešiakojis robotas su papildoma apkrova
Fig. 3.6. Hexapod robot with additional load

Norint tinkamai įvertinti roboto energetinį efektyvumą, o taip pat nustatyti darbo zoną bei palyginti energijos sąnaudas su kitų esamų vaikščiojančių robotų energetiniu efektyvumu, transportavimo kaštai buvo apskaičiuoti pagal (2.75) lygtį. Transportavimo kaštai parodo, koks energijos kiekis yra reikalingas, norint perkelti tam tikros masės kūną tam tikru atstumu. Vien vidutinė galios vertė neparodo nieko apie roboto judėjimą skirtingais atstumais esant skirtingiems greičiams. Nėra žinoma, ar nukeliauti mažą atstumą efektyviau dideliu greičiu, ar mažu, taip pat nėra žinoma, koku greičiu yra efektyviau nukeliauti didelį atstumą. Į transportavimo kaštus taip pat įskaiciuojama roboto masė, kuri turi didelę įtaką bendram roboto energetiniam efektyvumui.



3.7 pav. Šešiakojo roboto vidutinės galios priklausomybė nuo eisenos ir greičio esant skirtingoms apkrovoms: (a) 1,16 kg apkrovai; (b) 2,9 kg apkrovai

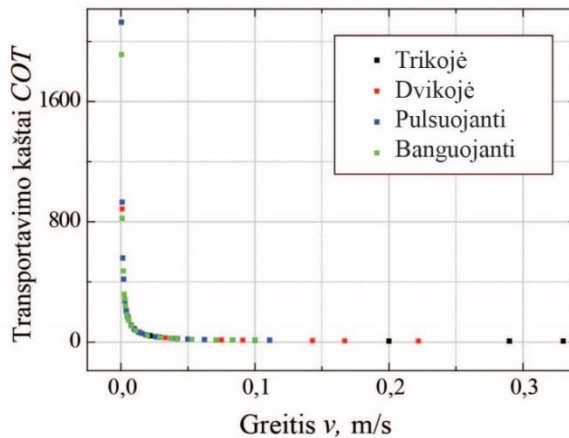
Fig.3.7. Hexapod robot average power consumption dependence on gait and speed at different loads: (a) 1.16 kg load; (b) 2.9 kg load



3.8 pav. Šešiakojo roboto vidutinės galios priklausomybės nuo trikojės ir banguojančios eisenos bei greičių prie skirtingų apkrovų

Fig. 3.8. Hexapod robot average power consumption dependence on tripod and wave gaits and speed at different loads

Gauti šešiakojo roboto transportavimo kaštų priklausomybės nuo greičio rezultatai pavaizduoti 3.9 paveiksle. Iš 3.9 paveikslo matyti, kad transportavimo kaštai skirtingoms eisenoms keičiasi vienodai keičiantis roboto eisenoms ir greičiams. Vienintelis skirtumas yra tai, kad skirtingomis eisenomis galima pasiekti skirtingus greičius. Iš gauto rezultato buvo nustatyta, kad šešiakojo roboto judėjimas tampa energetiškai efektyvus, kai robotas juda ne mažesniu kaip 0,04 m/s greičiu. Taip yra dėl to, kad tame intervale transportavimo kaštų vertės yra mažiausios. Tarp greičių 0,04 m/s ir 0,33 m/s transportavimo kaštų vertė nukrenta nuo ~25 iki ~5,75. Tuo tarpu tarp greičių 0,04 m/s ir 0,00042 m/s transportavimo kaštų vertė pakyla nuo ~25 iki ~2000. Taip yra dėl to, kad robotas vartoja energiją ir stovėdamas vietoje. Taip pat buvo nustatyta, kad trikojė eiseną yra efektyviausia ne vien dėl to, kad robotas judėdamas trikojė eiseną suvartoja mažiausią energijos kiekį, tačiau ir dėl to, kad robotas gali pasiekti plačiausią greičių diapazoną šia eiseną.



3.9 pav. Šešiakojo roboto transportavimo kaštų priklausomybė nuo greičio

Fig. 3.9. Hexapod robot cost of transport dependence on speed

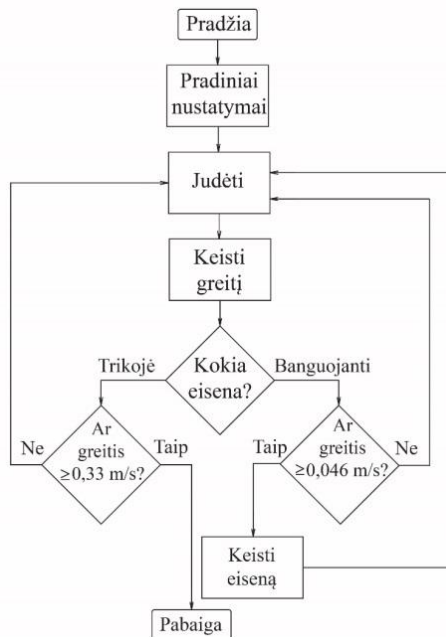
Gauti transportavimo kaštų rezultatai buvo palyginti su kitų vaikščiojančių robotų transportavimo kaštais. Palyginimas pateiktas 3.2 lentelėje. Nors visų mikro robotų masė yra labai maža (0,002–0,3 kg), tačiau transportavimo kaštų vertės yra didelės (~9–130), o tai rodo šių robotų didelį trūkumą. Didesnių robotų, tokių kaip „RHex“, „Gregor I“ ir „AMOS“, masės yra didesnės ir transportavimo kaštų vertės yra palyginti žemos. Tyrimuose naudojamo šešiakojo roboto HexaV4 transportavimo kaštų vertė išlieka mažiausia, nepriklausomai nuo roboto masės. Lyginant su kitais panašios masės robotais, HexaV4 yra vienas iš energetiškai efektyviausių vaikščiojančių robotų.

3.2 lentelė. Skirtingų vaikščiojančių robotų masės ir transportavimo kaštų vertės (A. T. Baisch *et. al.* 2010, P. Arena *et. al.* 2006, X. Xiong *et. al.* 2015)

Table 3.2. Mass and cost of transport values of different walking robots (A. T. Baisch *et. al.* 2010, P. Arena *et. al.* 2006, X. Xiong *et. al.* 2015)

Robotas	Masė, kg	COT
„Mini-Whegs“	0,146	8,9
„DASH“	0,0162	14,7
„iSprawl“	0,3	17,4
„HAMR2“	0,002	128
„RHex“	7,5	20
Gregor I	1,2	70
AMOS	5,4	11,7
HexaV4	1,5	5,75

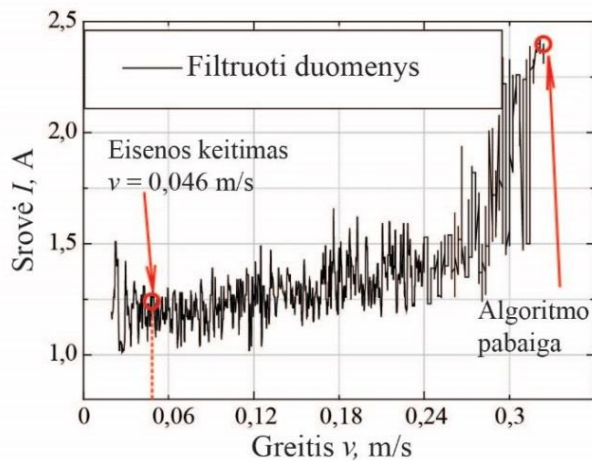
Siekiant minimizuoti šešiakojo roboto energijos sąnaudas buvo sukurtas specialus algoritmas (3.10 pav.). Šis algoritmas yra programa, valdoma aukšto lygio komandomis. Programos tikslas – parinkti tinkamą eisena priklausomai nuo roboto judėjimo greičio. Algoritmas sudarytas roboto judėjimui be papildomos apkrovos.



3.10 pav. Eosenos keitimo algoritmas
Fig. 3.10. Gait switching algorithm

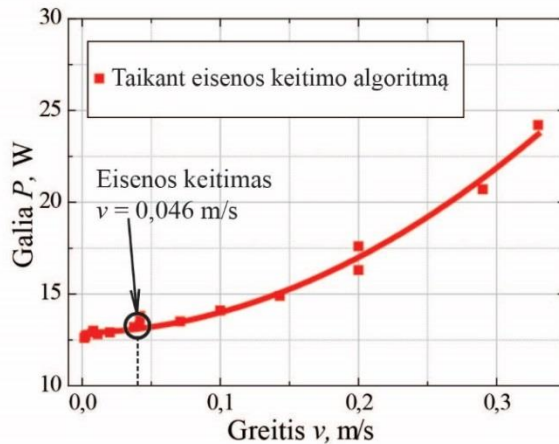
Algoritmo pradžioje yra nustatomi pradiniai parametrai: pradinis greitis, banguojanti eisena, žingsnio trajektorijos aukštis 0,01 m. Tada robotas juda į priekį tol, kol atliekami pilni 4 judėjimo ciklai ir didinamas greitis keičiant arba žingsnio trajektorijos ilgį, arba servo pavarų greitį; greičio keitimas yra įprogramuotas į roboto valdymo programą. Toliau tikrinama, kokia eisena yra parinkta. Jeigu robotas juda mažu greičiu banguojančia eisena, tikrinama, ar greitis yra mažesnis arba lygus 0,046 m/s. Tokiu atveju tęsiamas judėjimas ir greičio didinimas. Jeigu robotas juda banguojančia eisena ir yra pasiektas 0,046 m/s greitis, inicijuojamas eisenos keitimas ir pereinama į trikoję eisena. Eisenos pakeitimas reikalingas, siekiant išlaikyti minimalų suvartojamos energijos kiekį. Toliau roboto greitis didinamas iki tol, kol pasiekiamas 0,33 m/s greitis. Tai yra maksimalus galimas HexaV4 roboto greitis, todėl pasiekus jį, programa stabdoma.

Eisenos keitimo algoritmas buvo įrašytas į šešiakojo roboto valdymo programą ir patikrintas keletą kartų su ir be papildomo vėlinimo tarp greičio keitimų. Vėlinimo laikas taip pat buvo keičiamas, norint gauti geresnius rezultatus vidutinio elektros srovės stiprio skaičiavimams. Vieno nuoseklaus matavimo elektros srovės stiprio rezultatai be papildomo vėlinimo pateikti 3.11 paveiksle. Aukštas triukšmų lygis buvo mažinamas naudojamas procentinį filtrą (50 %).



3.11 pav. Šešiakojo roboto pavarų elektros srovės stiprio priklausomybė nuo greičio, gauta keičiant roboto judėjimo greitį ir eisena

Fig. 3.11. Hexapod robot current consumption dependence on speed, achieved by varying robots movement speed and gait



3.12 pav. Roboto vartojamos vidutinės galios priklausomybės nuo judėjimo greičio taikant eisenos keitimo algoritmą

Fig. 3.12. Robots average power consumption dependence on speed using gait switching algorithm

Naudojantis gautais rezultatais buvo skaičiuojamos vidutinės elektros srovės stiprio vertės kiekvienam intervalui. Tokiu būdu buvo gautos roboto vartojamos galios vertės. Kaip matyti iš 3.12 paveikslo, kitimo dėsnis išlieka tas pats ir vertės paklaidų ribose yra tokios pačios kaip 3.4 paveiksle. Toks rezultatas įrodo, kad naudojant sukurtą eisenos keitimo algoritmą, galima išlaikyti suvartojamos energijos minimumą. Todėl galima teigti, kad šis algoritmas yra tinkamas vaikščiojančių šešiakojų robotų energijos sąnaudų minimizavimui judant lygiu paviršiumi, nes visiems šešiakojams taikomos tokios pačios eisenos.

3.2. Roboto judėjimo per kliūtis tyrimas

Čia pateikiami roboto judėjimo per kliūtis tyrimo rezultatai. Tyrimo tikslas – ištirti vaikščiojančio roboto gebėjimą įveikti įvairaus dydžio ir tankio kliūtis įvertinant nuokrypius nuo numatytos judėjimo trajektorijos. Eksperimentai atlikti taikant kliūčių aptikimo ir perlipimo metodą, kuris plačiau aprašytas 2.2 poskyryje.

Visų pirma buvo atlikti kalibravimo tyrimai ir roboto judėjimo įvertinimas netaikant minėto metodo. Neturint tokios informacijos būtų sunku vertinti santykinus nuokrypius nuo numatytos trajektorijos bei neįmanoma pateikti palyginimo tarp roboto judėjimo parametrų siekiant nustatyti pasiūlyto metodo veiksmingumą.

Visuose sekančiuose eksperimentuose buvo naudojamos dvi pagrindinės šešiakojų robotų eisenos su joms būdingais greičiais: banguojanti eiseną, kurios

greitis buvo nustatytas 0,013 m/s bei trikojė eiseną, kurios greitis – 0,036 m/s. Kiekvienas paviršius buvo išskaidytas į du atstumus: 1 m ir 2 m. Tada buvo atlikti tyrimai siekiant nustatyti kiekvienai eisenai reikalingą judėjimo ciklų skaičių, norint nukeliauti numatytus atstumus. Robotas judėjimui banguojančia eiseną reikalingi 20 ciklų, kad nukeliautų 1 m atstumą ir 40 ciklų, kad nukeliautų 2 m atstumą. Robotas judėjimui trikoje eiseną reikalingi 13 ciklų nukeliauti 1 m atstumą ir 26 ciklai nukeliauti 2 m atstumą.

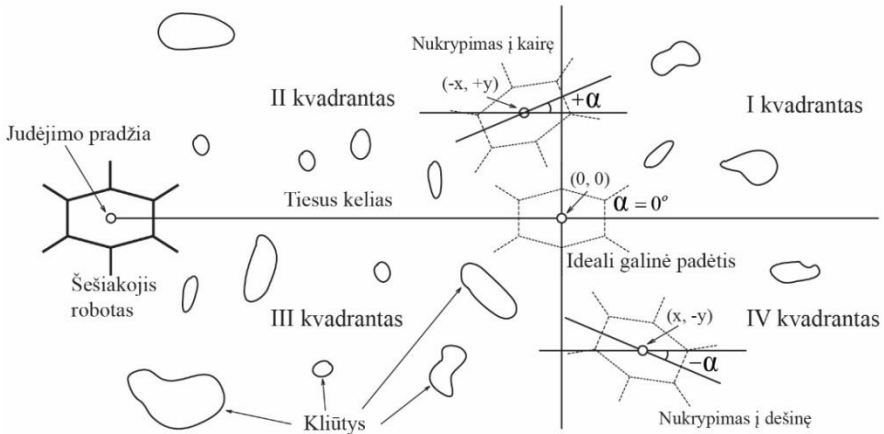
Kalibravimo tyrimai buvo sudaryti iš eksperimentų, kai robotas juda lygiu paviršiumi be kliūčių robotas kelyje, ir eksperimentų, kai robotas juda paviršiumi su kliūtimis, tačiau netaikant pasiūlyto kliūčių perlipimo metodo. Eksperimentų be kliūčių metu buvo matuojami x ir y koordinatų nuokrypiai galiniame taške siekiant įvertinti, kaip gerai robotas pasiekia jam numatytą tikslą. Rezultatai pateikti 3.3 lentelėje. Kalibravimo eksperimentų metu su kliūtimis be kliūčių perlipimo metodo buvo naudojamas tik mažo kliūčių tankio paviršius ir numatytas atstumas buvo 1 m. Papildomai galiniame taške buvo matuojamas robotas nukrypimo kampas. Matavimų paaiškinimas pateiktas 3.13 paveiksle. Judėjimo rezultatai be kliūčių perlipimo metodo pateikti 3.14 paveiksle.

3.3 lentelė. Nuokrypiai nuo numatytos trajektorijos judant paviršiumi be kliūčių

Table 3.3. Straight path deviations from given trajectory during locomotion over terrain without obstacles

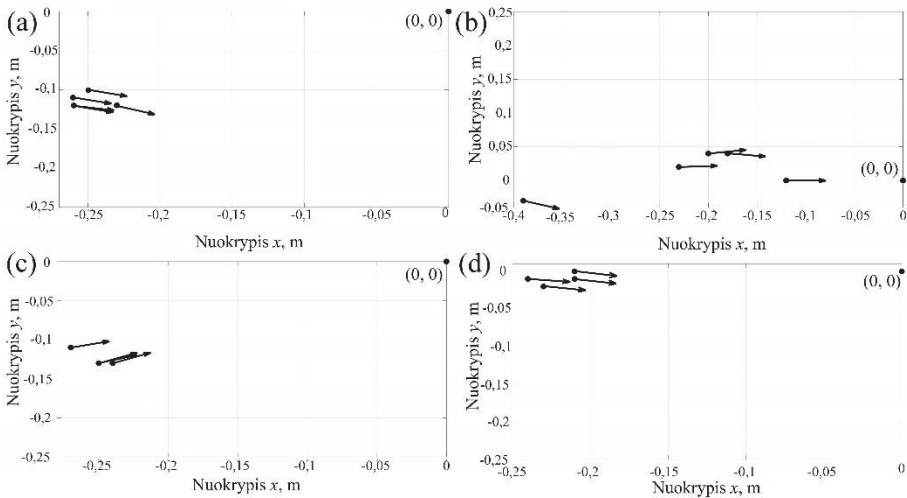
Banguojanti eiseną		Trikojė eiseną	
$d = 1$ m	$d = 2$ m	$d = 1$ m	$d = 2$ m
(x, y) m			
(0,02; -0,01)	(0,03; -0,04)	(0,01; -0,02)	(-0,04; -0,05)
(0,02; -0,01)	(0,02; -0,05)	(0,01; -0,01)	(-0,03; -0,06)
(0,02; -0,01)	(0,02; -0,06)	(0,01; -0,02)	(-0,03; -0,05)
Vidutinės vertės			
(0,02; 0,01)	(0,02; 0,05)	(0,01; 0,02)	(0,03; 0,05)

Mažiausi nuokrypiai nuo tiesaus judėjimo gaunami judant trumpesnę atstumą trikoje eiseną (0,01–0,02 m), tačiau judant 2 m atstumą gaunami didžiausi nuokrypiai (0,03–0,05 m) (3.3 lentelė). Robotui judant banguojančia eiseną nuokrypiai išlieka daugmaž vienodi nepriklausomai nuo kelio ilgio (0,01–0,05 m). Žinant, kad idealus judėjimas būtų 0 m nuokrypiai, galima teigti, kad gauti nuokrypiai judant per paviršius be kliūčių yra maži, atsirandantys daugiausiai dėl mechaninių netikslumų.



3.13 pav. Nuokrypių nuo numatytos trajektorijos ir judėjimo krypties matavimai. I kvadrantas: $(+x, +y)$ ir $+\alpha$; II kvadrantas: $(-x, +y)$ ir $+\alpha$; III kvadrantas: $(-x, -y)$ ir $-\alpha$; IV kvadrantas: $(+x, -y)$ ir $-\alpha$

Fig. 3.13. Measuring straight path deviations and direction angle change. I quadrant: $(+x, +y)$ and $+\alpha$; II quadrant: $(-x, +y)$ and $+\alpha$; III quadrant: $(-x, -y)$ and $-\alpha$; IV quadrant: $(+x, -y)$ and $-\alpha$

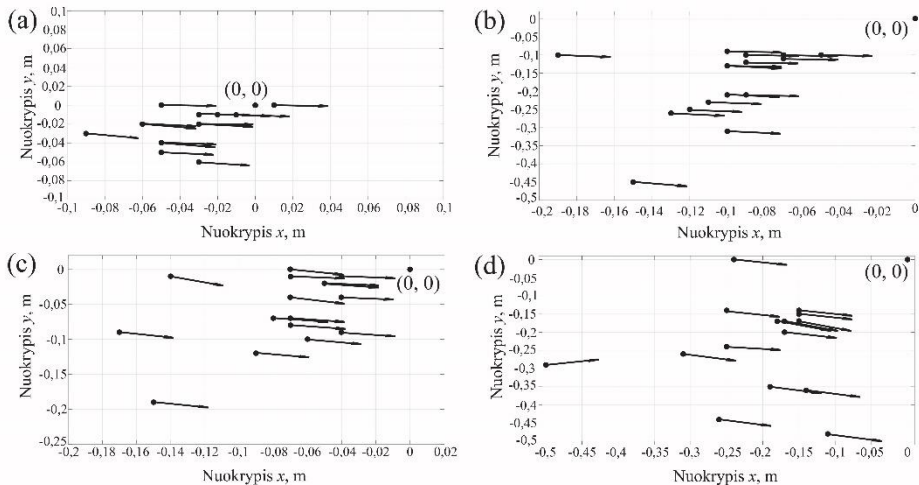


3.14 pav. Nuokrypiai nuo numatytos trajektorijos be kliūčių perlipimo metodo esant mažam kliūčių tankiui: (a) banguojanti eisena, mažas kliūčių aukštis, 1 m atstumas; (b) banguojanti eisena, didelis kliūčių aukštis, 1 m atstumas; (c) trikojė eisena, mažas kliūčių aukštis, 1 m atstumas; (d) trikojė eisena, didelis kliūčių aukštis, 1 m atstumas

Fig. 3.14. Deviations from given trajectory without obstacle avoidance method during locomotion over low density terrain: (a) wave gait, small height obstacles, 1 m distance; (b) wave gait, large height obstacles, 1 m distance; (c) tripod gait, small height obstacles, 1 m distance; (d) tripod gait, large height obstacles, 1 m distance

3.14 paveikslo mastelis pasirinktas taip, kad būtų matomos galinio taško koordinatės. Kitaip nėra įmanoma įvertinti atstumo tarp roboto galinės padėties ir numatyto galinio taško koordinatę. Toks mastelis buvo naudojamas ir pateikiant rezultatus tolimesniuose paveiksluose.

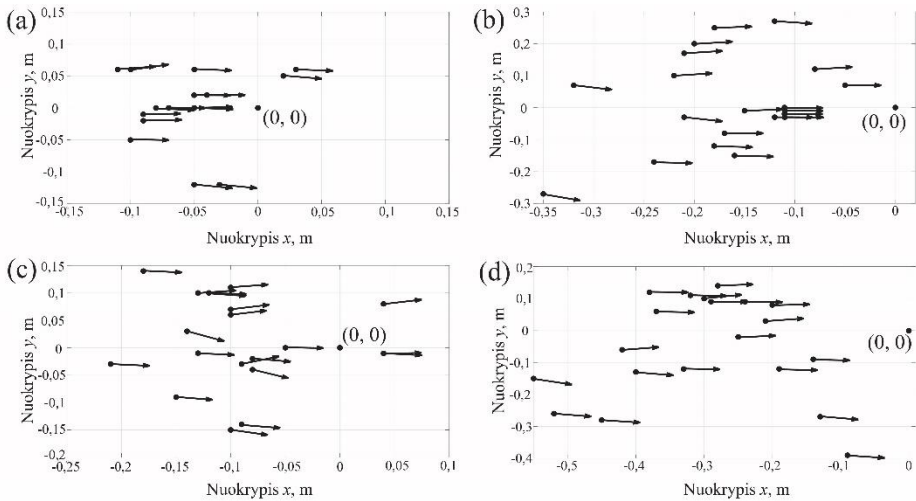
3.15 ir 3.16 paveiksluose vaizduojami judėjimo nuokrypiai nuo numatytos trajektorijos rezultatai trikojei ir banguojančiai eisenai atskirai. Siekiant tiksliai įvertinti kliūčių perlipimo metodo veiksmingumą buvo atlikti 144 eksperimentai su 2 skirtingais kliūčių tankiais, 2 skirtingais atstumais ir 2 skirtingais kliūčių aukščių intervalais. Šešiakojo roboto HexaV4 judėjimo pavyzdys judant banguojančia eiseną per didelio tankio paviršių pavaizduotas 3.17 paveiksle. Paveiksle matyti, kaip robotas judėjimo pradžioje laikosi numatytos judėjimo trajektorijos (3.17 pav. (a)), o judėjimo gale roboto padėtis nukrypsta nuo norimo rezultato (3.17 pav. (b)).



3.15 pav. Roboto judėjimo per kliūtis taikant banguojančią eiseną eksperimentų rezultatai: (a) mažas kliūčių tankis, 1 m atstumas; (b) mažas kliūčių tankis, 2 m atstumas; (c) didelis kliūčių tankis, 1 m atstumas; (d) didelis kliūčių tankis, 2 m atstumas
Fig. 3.15. Results of robot locomotion over obstacles using wave gait: (a) low obstacle density, 1 m distance; (b) low obstacle density, 2 m distance; (c) high obstacle density, 1 m distance; (d) high obstacle density, 2 m distance

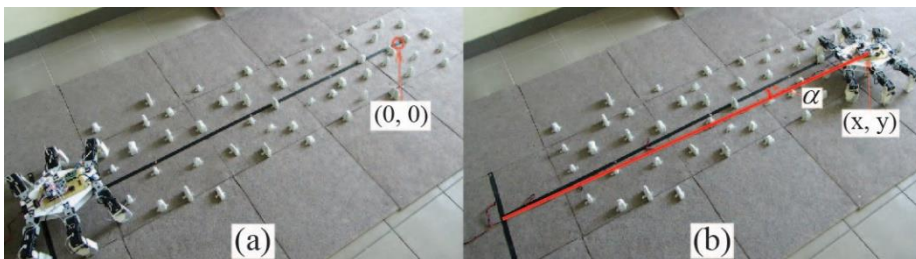
Robotas negali judėti per paviršių su kliūtimis be kliūčių perlipimo metodo, nes roboto kojos atsitrenkia į kliūtis ir robotas stumiasi atgal visą likusį laiką. Tai taip pat paaiškina, kodėl x koordinatės nuokrypiai yra didesni nei y koordinatės. Judėjimo metu netaikant kliūčių perlipimo metodo vidutiniai nuokrypiai buvo suskaičiuoti iš 3.14 paveiksle pateiktų duomenų. Banguojančiai eisenai nuokrypiai yra šie: (0,252; 0,114) m $17,4^\circ$ esant mažo aukščio kliūtimis ir

(0,224; 0,026) m $6,8^\circ$ esant didelio aukščio kliūtims. Vidutiniai nuokrypiai trikojei eisenai: (0,252; 0,126) m $22,8^\circ$ esant mažo aukščio kliūtims ir (0,22; 0,008) m 12° esant didelio aukščio kliūtims. Visos vidutinės nuokrypių vertės apskaičiuotos naudojant absoliutines vertes. Iš gautų rezultatų matyti, kad robotas negali pasiekti galinio taško net 1 m atstumu netaikant kliūčių perlipimo metodo, nes vidutiniai nuokrypiai siekia $\sim 24\%$.



3.16 pav. Roboto judėjimo per kliūtis taikant trikoję eiseną eksperimentų rezultatai: (a) mažas kliūčių tankis, 1 m atstumas; (b) mažas kliūčių tankis, 2 m atstumas; (c) didelis kliūčių tankis, 1 m atstumas; (d) didelis kliūčių tankis, 2 m atstumas

Fig. 3.16. Results of robot locomotion over obstacles using tripod gait: (a) low obstacle density, 1 m distance; (b) low obstacle density, 2 m distance; (c) high obstacle density, 1 m distance; (d) high obstacle density, 2 m distance



3.17 pav. Šešiakojo roboto judėjimas banguojančia eiseną per didelio tankio paviršius su mažo aukščio kliūtims: (a) roboto padėtis pradiniam taške; (b) roboto padėtis galiniame taške

Fig. 3.17. Hexapod robot locomotion over high density terrain with small height obstacles using wave gait: (a) robot position at starting point; (b) robot position at goal position

Vidutinės nuokrypių vertės buvo skaičiuojamos atskirai, priklausomai nuo nueito kelio, nes tuo būdu buvo galima įvertinti, kaip stipriai robotas nukrypsta nuo numatytos trajektorijos didėjant atstumui (nuo 1 m iki 2 m). Gautos vertės pateiktos 3.4 lentelėje.

Šie rezultatai patvirtina, kad naudojant banguojančią eiseną galima pasiekti patenkinamus rezultatus judėjimui per bet kokio tipo paviršių. Netgi nepaisant to, kad kuo didesni atstumą robotui reikia nueiti ir kuo didesnės kliūtys, tuo didesni nuokrypiai, robotas vis tiek sugeba perlipti visas kelyje pasitaikančias kliūtis ir priartėti prie galinio taško. Naudojant trikoję eiseną judėjimas per kliūtis yra taip pat įmanomas, tačiau nuokrypiai yra daugiau atsitiktiniai dėl skirtingo kojų perkėlimo eiliškumo ir didesnio judėjimo greičio. Trikojės eisenos eksperimentų metu kliūtys dažniau užstrigdavo tarp roboto kojos ir kliūčių aptikimo jutiklio. Netgi tokiu atveju roboto koja nuslysdavo nuo kliūties ir robotas tęsdavo judėjimą į priekį. Tokie užstrigimai nulemdavo didesnius x koordinatės nuokrypius, tačiau rezultatai vis tiek yra 50 % geresni nei netaikant kliūčių perlipimo metodo.

3.4 lentelė. Vidutinės nuokrypių nuo numatytos trajektorijos vertės robotui judant skirtingus atstumus

Table 3.4. Average deviations from given trajectory while robot is moving different distances

Banguojanti eisena		Trikojė eisena	
$d = 1$ m	$d = 2$ m	$d = 1$ m	$d = 2$ m
(x, y) m, α°			
(0,057; 0,042), 7°	(0,161; 0,206), 11,7°	(0,083; 0,052), 7,3°	(0,237; 0,127), 6,6°

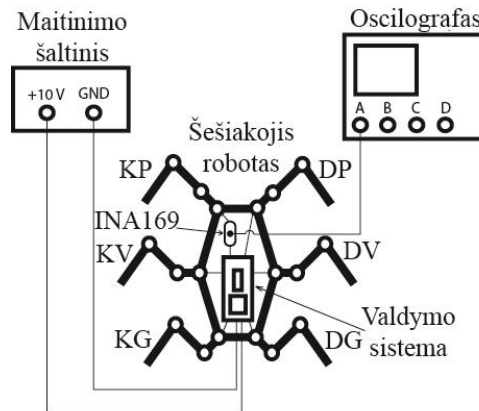
Taip pat reikėtų atkreipti dėmesį ir į tai, kad nuokrypius įtakoja ir kliūčių pozicijos todėl, kad kliūtys buvo išdėstomos atsitiktinai, o ne simetriškai (realios aplinkos imitavimas). Kai kuriais atvejais roboto nuokrypiai y koordinatės ašimi būdavo atstatomi dėl to, kad roboto kojos atsitrenkdavo į skirtingas kliūtis, tarp kurių būdavo atstumas. Nors atstumas tarp kliūčių darbo metu nebuvo matuojamas, tai nulemdavo, kiek bus atstatomi nukrypimai y koordinatės ašimi.

Lyginant nuokrypių dydį su darbe naudojamo šešiakojo roboto dydžiu, nei vienu atveju nebuvo gauti nuokrypiai, didesni nei roboto ilgis, kuris yra 0,25 m. Santykinai visi nuokrypiai yra mažesni nei ~12 %. Toks rezultatas yra dvigubai mažesnis nei be kliūčių perlipimo metodo. Lyginant atskirų eisenų rezultatus galima teigti, kad nors taikant lėtesnes eisenas galima gauti mažesnius nuokrypius bet kokiomis sąlygomis, greitesnės eisenos gali būti naudojamos roboto judėjimui trumpesniais atstumais.

3.3. Energijos sąnaudų minimizavimo judant per kliūtis tyrimas

Šiame poskyryje pateikiami tyrimai, kurie buvo atlikti *MATLAB*[®] matematinio modeliavimo aplinkoje. Tyrimo tikslas: ištirti kliūčių perlipimo efektyvumą robotui judant per skirtingo dydžio kliūtis lyginant gautus energijos sąnaudų rezultatus. Tyrimai susiję su energijos sąnaudų minimizavimu parenkant parametrus dviem atvejais: kai roboto kojų judesiai yra sinchronizuoti laiko atžvilgiu ir kai kojų judesiai nėra sinchronizuoti laiko atžvilgiu.

Norint tinkamai įvertinti energijos sąnaudas atliekant imitacinius tyrimus, buvo atlikti papildomi matavimai su realiu šešiakoju robotu siekiant nustatyti vidutinio elektros srovės stiprio priklausomybę nuo roboto žingsnio trajektorijos aukščio ir pločio. Pėdos trajektorijos generavimas taikant (2.45) lygtį buvo integruotas į roboto valdymo sistemą ir pavarų elektros srovės stipris buvo stebimas naudojant elektros srovės stiprio matavimo schemą. Oscilografu buvo matuojamas priekinės kairės roboto kojos pavarų srovės stipris. (3.18 pav.).



3.18 pav. Elektros srovės stiprio matavimo funkcinė schema. Elektros srovės stiprio matavimo schema prijungta tarp roboto KP kojos pavarų ir įtampos šaltinio

Fig. 3.18. Current consumption measuring function diagram. Current measuring circuit installed on robots LF leg between power supply and servo drives

Visų šių imitacinių tyrimų metu buvo naudojama trikojė eisena, o roboto judėjimo greitis $v = 0,025$ m/s. Kiekviena kojos konfigūracija (žingsnio trajektorijos aukščio ir pločio) buvo matuojama vieną kartą ir vidutinė roboto kojos pavarų elektros srovės stiprio vertė gaunama taikant (3.2) lygtį. Vieno matavimo užtenka todėl, kad rezultate buvo gaunama 5000 elektros srovės stiprio matavimo verčių. Galima teigti, kad tai yra pakankamas kiekis duomenų tinkamai įvertinti vidutinę vertę. Vieno matavimo trukmė buvo 5 s. Taigi

elektros srovės stiprio matavimo intervalas lygus 1 ms. Elektros srovės stiprio priklausomybės nuo žingsnio trajektorijos parametrų rezultatai pateikti 3.5 lentelėje.

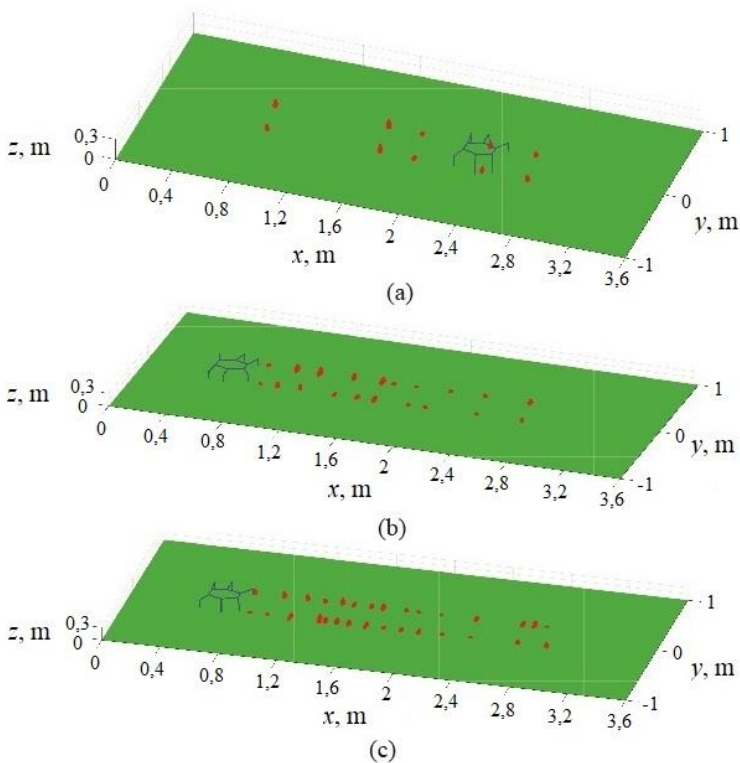
3.5 lentelės duomenys buvo perdaryti į dvimatę matricą ir integruoti į imitacinį modelį. Matricos stulpeliai vaizduoja žingsnio trajektorijos plotį, o matricos eilutės – žingsnio trajektorijos aukštį.

3.5 lentelė. Elektros srovės stiprio priklausomybė nuo roboto žingsnio trajektorijos aukščio ir pločio

Table 3.5. Current consumption dependence on robot step trajectory height and width

w, cm	h, cm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	I_{vid} , mA									
0	194	202	205	208	208	207	219	219	218	224
1	197	203	204	209	207	215	214	216	221	222
2	258	202	205	206	210	208	211	217	219	219
3	256	245	198	203	206	205	213	212	212	214
4	215	244	236	205	208	204	206	208	211	213
5	252	248	230	215	201	207	209	209	209	211
6	252	254	247	234	223	208	203	209	208	208

Imitacinis roboto modelis buvo papildytas roboto judėjimu lygiu paviršiumi ir su kliūtimis, kad atliekami tyrimai būtų kuo realistiškesni. Energijos sąnaudų minimizavimo imitaciniai tyrimai atlikti naudojant tris skirtingų kliūčių tankių paviršius. Buvo naudojami mažo tankio (10 kliūčių per visą duotą atstumą), vidutinio tankio (20 kliūčių) ir didelio tankio (30 kliūčių) paviršiai (3.19 pav.). Visos kliūtys modelyje buvo nusakomos šiais parametrais: ilgiu, pločiu, aukščiu bei x ir y koordinatėmis, kurios nusakė kiekvienos kliūties padėtį aplinkoje bei buvo naudojamos imituoti roboto kliūčių aptikimui. Be šių parametrų robotas judėtų kaip lygiu paviršiumi ir nežinotų, kada keisti kojos trajektoriją. Taip pat, kiekvienos kojos judėjimo greitis buvo nustatytas toks pats, kaip roboto judėjimo greitis, tokiu būdu užtikrinant, kad kojų judesiai nėra sinchronizuoti laiko atžvilgiu. Pradiniai judėjimo parametrai buvo tokie: žingsnio ilgis $l = 0,04$ m, aukštis $h = 0,01$ m. Visų tyrimų metu robotas turėjo nueiti 3,2 m atstumą ir perlipti visas kliūtis. Kliūčių dydžiai buvo parenkami atsitiktinai, todėl kiekvieno matavimo metu kliūčių dydžiai buvo labai įvairūs. Taip daryti pasirinkta siekiant imituoti realų paviršių. Tikrovėje paviršius retai yra apibrėžtas ir kliūčių dydžiai dažniausiai yra skirtingi. Vidutinių suvartojamos energijos verčių rezultatai pateikti 3.5–3.7 lentelėse. Apibendrinti energijos sąnaudų rezultatai pateikti 3.8 lentelėje. Visos suvartojamos energijos sąnaudų vertės buvo skaičiuojamos taikant atitinkamas lygtis aprašytas 2.3.3 poskyryje.



3.19 pav. Šešiakojo roboto žingsniavimo per skirtingų tankių paviršius modeliavimo pavyzdžiai: (a) mažas tankis; (b) vidutinis tankis; (c) didelis tankis

Fig. 3.19. Simulation examples of hexapod robot locomotion over different obstacle density terrains: (a) low density; (b) average density; (c) high density

3.6–3.9 lentelėse E vaizduoja energijos sąnaudas be parametų parinkimo, E_{opt} vaizduoja energijos sąnaudas parenkant tinkamiausius parametrus pagal pėdos trajektorijos ilgį bei tenkančios elektros srovės stiprį, energijos sąnaudų skirtumą tarp su ir be parametų parinkimo vaizduoja $E - E_{opt}$, o η vaizduoja metodo efektyvumą (sutaupyta energijos kiekį). Kuo didesnė η vertė, tuo mažesnis energijos kiekis yra suvartojamas.

Nors 3.6–3.9 lentelėse galima išvelgti nedidelį energijos sąnaudų augimą priklausomai nuo kliūčių skaičiaus robotų kelyje, vidutinis metodo efektyvumas kinta nežymiai (iki ~7–11 %). Toks efektyvumo kitimas priklausė nuo kliūčių dydžių aplinkoje, kurie buvo parenkami atsitiktinai. Iš 3.9 lentelės matyti, kad vidutinis kliūčių perlipimo su parametų parinkimu metodu efektyvumas yra 14,9 %. Nors tai nėra didelis skirtumas, tačiau net mažas energijos kiekis gali turėti didelę įtaką robotų darbo laikui.

3.6 lentelė. HexaV4 šešiakojo roboto energijos sąnaudos judant mažo kliūčių tankio paviršiumi

Table 3.6. Energy consumption of HexaV4 hexapod robot locomotion over low complexity terrain

Mažo tankio paviršius (10 kliūčių)				
Matavimas	E, J	E_{opt}, J	$E-E_{opt}, J$	$\eta, \%$
1	1520	1347	173	11,4
2	1585	1320	265	16,7
3	1531	1367	164	10,7
4	1496	1381	115	7,7
5	1625	1327	298	18,3

3.7 lentelė. HexaV4 šešiakojo roboto energijos sąnaudos judant vidutinio kliūčių tankio paviršiumi

Table 3.7. Energy consumption of HexaV4 hexapod robot locomotion over average complexity terrain

Mažo tankio paviršius (20 kliūčių)				
Matavimas	E, J	E_{opt}, J	$E-E_{opt}, J$	$\eta, \%$
1	1806	1548	258	14,3
2	1735	1502	233	13,4
3	1761	1493	268	15,2
4	1852	1477	375	20,2
5	1832	1516	316	17,2

3.8 lentelė. HexaV4 šešiakojo roboto energijos sąnaudos judant didelio kliūčių tankio paviršiumi

Table 3.8. Energy consumption of HexaV4 hexapod robot locomotion over high complexity terrain

Mažo tankio paviršius (30 kliūčių)				
Matavimas	E, J	E_{opt}, J	$E-E_{opt}, J$	$\eta, \%$
1	1852	1585	267	14,4
2	1839	1586	253	13,8
3	1722	1529	193	11,2
4	1933	1610	323	16,7
5	1910	1510	400	20,9

Toliau buvo nagrinėjamas pėdos trajektorijos generavimas, kai roboto kojų judesiai buvo sinchronizuoti laiko atžvilgiu. Šiuo atveju, nepriklausomai, kokio ilgio buvo pėdos trajektorija, koja visada buvo perkeliama per tą patį laiką. Taigi parametrų parinkimas atsižvelgiant į trajektorijos ilgį nebebuvo taikomas. 2.3.3 poskyryje yra aptariamas parametrų parinkimas pagal pavarų elektros srovės stiprį. Toks metodas ir buvo taikomas tolimesnių imitacinių ir realių eksperimentų metu.

3.9 lentelė. Vidutinės suvartojamos HexaV4 roboto energijos kiekio vertės judant per skirtingus paviršius

Table 3.9. Average energy consumption of HexaV4 robot locomotion over different density terrains

Kliūčių tankiai	E, J	E_{opt}, J	$E-E_{opt}, J$	$\eta, \%$
Mažas tankis	1551	1348	203	13,1
Vidutinis tankis	1797	1507	290	16,1
Didelis tankis	1851	1564	287	15,5

Buvo atliekamas tik vieno parametro parinkimas, todėl ankstesni elektros srovės stiprio priklausomybės nuo roboto žingsnio trajektorijos aukščio ir pločio matavimai nebebuvo tinkami. Duomenys turėjo būti tikslinami. Tai buvo daroma atskiriant palaikymo ir perkėlimo fazių roboto kojai tenkančius elektros srovės stiprius.

Yra žinoma, kad roboto kojos judėjimo greitis palaikymo fazės metu sutampa su roboto pilnu judėjimo greičiu. Tačiau vienos pėdos trajektorijos laikas taip pat priklauso ir nuo eisenos, todėl norint apskaičiuoti pėdos perkėlimo nustatyta trajektorija laiką, reikalingas roboto judėjimo greitis, žingsnio trajektorijos ilgis bei eisenos periodas:

$$t_{traj} = \frac{l}{v \cdot T}, \quad (3.3)$$

čia t_{traj} – kojos perkėlimo laikas, v – roboto judėjimo greitis, l – žingsnio ilgis, T – eisenos periodas.

3.10 lentelė. Robotui tenkančio elektros srovės stiprio priklausomybė nuo roboto žingsnio trajektorijos aukščio ir pločio. Elektros srovės stiprio vidurkiai skaičiuojami atskiriant kojų palaikymo ir perkėlimo fazes

Table 3.10. Robot current consumption dependence on robot step trajectory height and width. Average current values obtained separating leg support and transfer phases

w, cm	h, cm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	I_{vid}, mA									
0	214	216	220	265	269	278	269	259	276	268
1	226	215	251	220	260	272	232	280	236	258
2	249	217	248	229	257	259	226	270	234	270
3	264	249	225	246	252	260	257	265	266	271
4	264	252	239	238	249	253	221	263	224	271
5	279	247	250	245	239	257	256	260	257	261
6	280	262	253	249	242	241	259	260	261	263

Atliekant elektros srovės stiprio nustatymo eksperimentus su realiu robotu buvo pasirinkti šie parametrai: trikojė eisenos ($T = 2$), žingsnio ilgis $l = 0,04$ m,

roboto judėjimo greitis $v = 0,014$ m/s, maitinimo šaltinio įtampa $U = 11$ V. Įstačius turimus dydžius į (3.3) lygtį, gaunama, kad vienos kojos perkėlimo laikas $t_{\text{traj}} = 1,4$ s. Nauji elektros srovės stiprio priklausomybės nuo žingsnio trajektorijos aukščio ir pločio rezultatai pateikti 3.10 lentelėje.

Vienos roboto kojos pavaroms tenkančių elektros srovės stipriai taip pat buvo perdaryti į dvimatę matricą ir integruoti į imitacinį modelį.

Visų pirma buvo atliekami imitaciniai tyrimai *MATLAB*[®] matematinio modeliavimo aplinkoje. Pradiniai nustatymai buvo tokie: naudojama trikojė eisena ($T = 2$), žingsnio ilgis $l = 0,05$ m, įtampa $U = 11$ V, roboto judėjimo greitis $v = 0,013$ m/s, numatytas nueiti atstumas $d = 1$ m. Pagal šiuos duomenis gautas vienos kojos pėdos perkėlimo laikas $t_{\text{traj}} = 1,3$ s.

Prieš atliekant matavimus su kliūtimis roboto kelyje, buvo atliktas vienas bandomasis matavimas be kliūčių. Vieno matavimo modeliavimo aplinkoje užtenka, nes kiekvieną kartą gaunamas tas pats rezultatas (nėra atsitiktinių dydžių). Gauta, kad nueidamas 1 m atstumą be kliūčių robotas suvartoja 559 J energijos ($E_{\text{vid}} = 18,6$ J).

Atliekant tyrimus su kliūtimis, matavimų metu roboto kelyje buvo 10 kliūčių: 5 dešinėje ir 5 kairėje pusėje. Kliūčių dydžiai buvo parenkami atsitiktinai, kaip ir ankstesniuose tyrimuose, siekiant imituoti tikrą paviršių. Matavimai taip pat buvo atliekami dviem etapais: be parametrų parinkimo ir su parametrų parinkimu. Viso buvo atlikta 20 matavimų. Gauti rezultatai pateikti 3.11 lentelėje.

3.11 lentelė. HexaV4 šešiakojo roboto energijos sąnaudos, kai roboto kojų judesiai yra sinchronizuotos laiko atžvilgiu

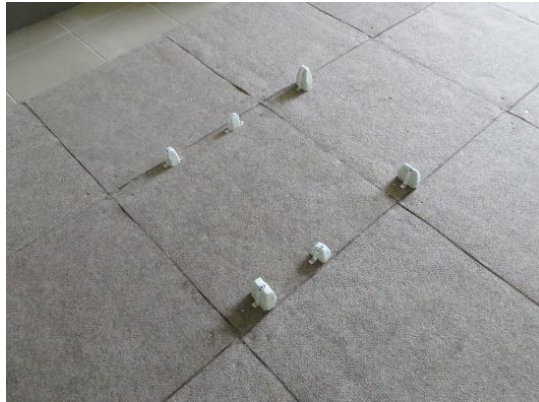
Table 3.11. HexaV4 hexapod robot energy consumption, when robot leg motion is synchronizes by time

Matavimo nr.	E, J	E_{opt}, J	$E - E_{\text{opt}}, J$	$\eta, \%$
1	583	564	19	3,4
2	589	566	23	4,1
3	578	563	15	2,7
4	587	563	24	4,3
5	581	564	17	3
6	586	565	21	3,7
7	574	565	9	1,6
8	582	563	19	3,4
9	578	564	14	2,5
10	585	563	22	3,9
Vidutinės vertės	582	564	18	3,3

Vidutinis kliūčių perlipimo naudojant pasiūlytą metodą efektyvumas yra 3,3 % (3.11 lentelė). Galima teigti, kad tai yra labai mažas efektyvumas, kuris

nesumažina energijos sąnaudų. Kai kuriais atvejais efektyvumas siekia daugiau nei 4 %, tačiau tai vis tiek nėra pakankamas rezultatas.

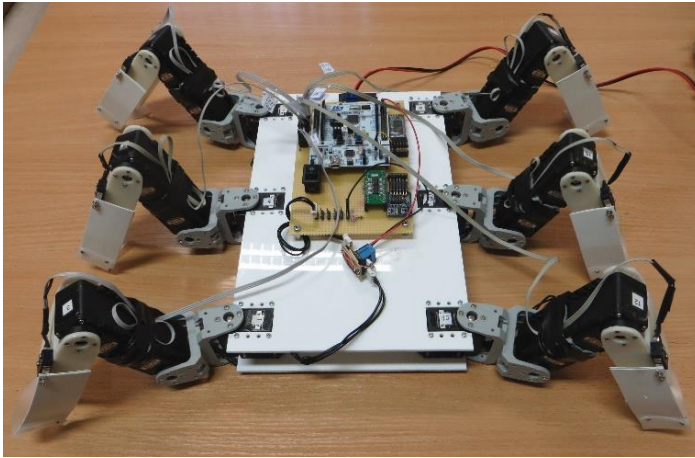
Siekiant įvertinti metodo adekvatumą buvo atlikti trys eksperimentai su realiu robotu taikant pėdos trajektorijos generavimo metodą, kai roboto kojų judesiai yra sinchronizuoti laiko atžvilgiu. Šiems eksperimentams pasirinkta banguojanti eiseną ir judėjimo greitis $v = 0,009$ m/s. Toks pasirinkimas grindžiamas tuo, kad realaus roboto judėjimas nėra idealiai tiesus, todėl banguojanti eiseną ir mažas judėjimo greitis užtikrina tiesesnę ir stabilesnę judėjimą. Taip pat ir kliūčių skaičius roboto kelyje pasirinktas mažesnis: viso 6 kliūtys; po 3 kiekvienoje pusėje (3.20 pav.). Jų išdėstymas parinktas taip, kaip parodyta 2.9 paveiksle: sekant linijas, kuriomis keliaus roboto kojos. Žinant tai, buvo padaryta išvada, kad šešiakampis roboto kūnas buvo nebetinkamas tolimesniems matavimams, nes vidurinės kojos yra išdėstytos didesniu atstumu nuo kūno centro negu kampinės. Tai reiškia, kad roboto kojos ne vienodai užklius už visų kliūčių. Siekiant, kad realūs eksperimentai atitiktų visas ankstesnes sąlygas ir visos roboto kojos atsiremtų į vienodą kliūčių skaičių, roboto kūno forma buvo pakeista. Pasirinkta roboto kūną keisti į stačiakampio formos kūną (3.21 pav.). Tokia kūno forma užtikrina, kad visos roboto kojos būtų išdėstytos vienodais atstumais nuo kūno ir lygiagrečiai viena kitai. Toks robotas buvo naudojamas tik šiuose eksperimentuose. Matavimų rezultatai pateikti 3.12 lentelėje.



3.20 pav. Kliūčių išdėstymas energijos sąnaudų minimizavimo eksperimentams
Fig. 3.20. Obstacle positioning for energy consumption minimization

Reiktų atkreipti dėmesį, kad 3.12 lentelėje pateikiami kitokie energijos dydžiai nei 3.6–3.11 lentelėse. Čia pateikiamos vidutinės energijos vertės, nes nebuvo galimybės įvertinti pilnutinės suvartojamos energijos dėl matavimo priemonių. Šiuose eksperimentuose vietoje oscilografo buvo naudojamas Bluetooth ryšio modulis. Lyginant su ankstesniais matavimais, šių matavimų

metu taip pat buvo gaunama 6000 elektros srovės stiprio verčių, tačiau kiekvieno matavimo trukmė buvo 30 s, todėl intervalas tarp elektros srovės stiprio verčių buvo 5 ms. Tai yra gerokai didesnis intervalas nei ankstesniuose matavimuose, tačiau vis tiek pakankamai mažas norint įvertinti vidutinį elektros srovės stiprį. 3.12 lentelėje E_{vid} yra vidutinė energija be parametrų parinkimo, $E_{vid_{opt}}$ – vidutinė energija su parametrų parinkimu, $E_{vid} - E_{vid_{opt}}$ – skirtumas tarp suvartojamos energijos su ir be parametrų parinkimo. Plačiau šis metodas aprašytas 2.4 poskyryje.



3.21 pav. Stačiakampio formos kūnas HexaV4 šešiakojui robotui
Fig. 3.21. HexaV4 hexapod robot with rectangle shaped body

3.12 lentelė. HexaV4 šešiakojio roboto energijos sąnaudos, kai kojų judesiai yra sinchronizuoti laiko atžvilgiu

Table 3.12. HexaV4 hexapod robot energy consumption, when leg motions are synchronized in time

Matavimo nr.	E_{vid} , J	$E_{vid_{opt}}$, J	$E_{vid} - E_{vid_{opt}}$, J	η , %
1	14,71	14,44	0,27	1,9
2	14,6	14,27	0,33	2,3
3	14,7	14,27	0,43	3

Gautas vidutinis kliūčių perlipimo metodo su parametrų parinkimu yra 2,4 % (3.12 lentelė). Efektyvumo vertė yra panaši į imitacinių tyrimų metu gautą rezultatą. Galima teigti, kad metodo efektyvumas pasitvirtina, tačiau dėl išorinių veiksnių, tokių kaip trintis, praslydimai, atsirėmimai į kliūtis, oro pasipriešinimas, realus metodo efektyvumas yra mažesnis. Tokie rezultatai rodo, kad kliūčių perlipimo metodas su parametrų parinkimu, kai roboto kojų judesiai yra sinchronizuoti laiko atžvilgiu, nėra tinkamas metodas norint, kad robotas

suvartotų mažesnį energijos kiekį. Nėra prasmės keisti kojos perkėlimo parametrų, nes suvartojamas energijos kiekis išlieka beveik nepakitęs arba pakitęs labai mažai. Tačiau iš šiame poskyryje gautų visų rezultatų matyti, kad tiek kojos perkėlimo aukštis, tiek kliūčių kiekis roboto kelyje turi įtakos energijos sąnaudoms. Tik nėra pilnai aišku, kuris parametras turi didesnę įtaką. Tai nagrinėjama kitame poskyryje.

3.4. Energijos sąnaudų priklausomybės nuo kliūčių dydžio ir tankio tyrimas

Kaip jau buvo pastebėta 3.3 poskyryje atliekant energijos sąnaudų minimizavimo judant per kliūtis tyrimo metu, energijos sąnaudos priklauso nuo kliūčių skaičiaus roboto kelyje ir nuo kliūčių dydžio (aukščio). Tačiau nėra žinoma, kaip stipriai šie parametrai įtakoja energijos sąnaudas ir kuris parametras yra svarbesnis. Taigi šiame skyryje pateikti rezultatai tyrimų, kurių tikslas buvo ištirti vaikščiojančio roboto energijos sąnaudų priklausomybę nuo kliūčių dydžio ir tankio. Šiame darbe kliūčių tankis buvo žymimas pagal tai, kiek robotas turės perlipti kliūčių, o ne kiek kliūčių yra iš viso tam tikrame plote. Robotui perlipti reikiamų kliūčių skaičiaus susietumas su kiek iš viso aplinkoje yra kliūčių šiame darbe nebuvo nagrinėjamas, siekiant supaprastinti tyrimus ir užtikrinti žinomas sąlygas.

3.13 lentelė. Elektros srovės stiprio priklausomybės nuo žingsnio trajektorijos aukščio identifikavimo rezultatai

Table 3.13. Current dependence on step trajectory height identification results

Matavimas	<i>h</i> , cm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	<i>I</i> _{vid} , mA									
1	229	227	229	229	231	234	238	240	242	251
2	234	237	233	231	235	239	242	241	241	245
3	242	236	231	235	235	238	240	242	241	243
4	235	232	232	235	240	238	240	241	241	246
5	231	231	228	234	232	238	241	241	239	245
Vidurkis	234	233	231	233	235	238	240	241	241	246
ΔI_{vid-}	5	5	3	3	3	4	2	1	2	3
ΔI_{vid+}	8	4	2	2	5	2	2	1	1	5

Buvo nustatyta, kad energijos sąnaudos beveik nepriklauso nuo kojos perkėlimo pločio, todėl šiuose tyrimuose buvo nustatyta, kad robotas kliūtis perlips keliant kojas tik per viršų. Taip pat buvo pakeistas roboto kūnas, todėl buvo atliktas naujas elektros srovės stiprio priklausomybės nuo žingsnio trajektorijos aukščio identifikavimas. Siekiant gauti tikslesnius rezultatus buvo

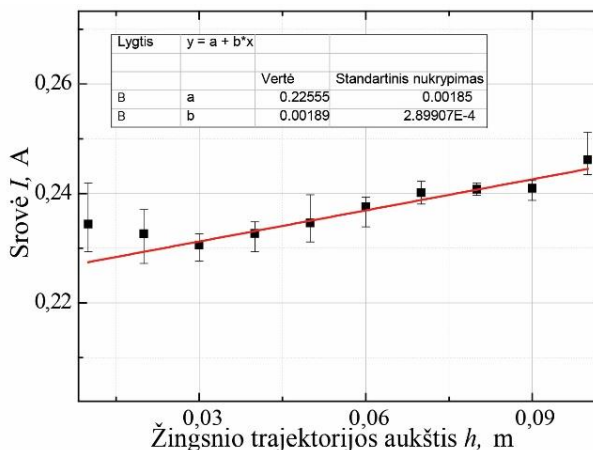
atliktas didesnis matavimų kiekis: po 5 matavimus su kiekvieno žingsnio trajektorijos aukščiu.

Matavimai buvo atliekami naudojant šiuos roboto judėjimo parametrus: žingsnio ilgis $l = 0,05$ m, banguojanti eiseną, roboto greitis $v = 0,013$ m/s. Gauti rezultatai buvo vidurkinami ir skaičiuojamos paklaidos. Rezultatai pateikti 3.13 lentelėje ir galutinė elektros srovės stiprio priklausomybė nuo žingsnio trajektorijos aukščio pavaizduota 3.22 paveiksle.

3.13 lentelėje dydis $\Delta I_{\text{vid-}}$ vaizduoja elektros srovės stiprio nuokrypą nuo vidutinės vertės į žemesnę pusę, o dydis $\Delta I_{\text{vid+}}$ – elektros srovės stiprio nuokrypą nuo vidutinės vertės į didesnę pusę.

Elektros srovės stiprio vertė didėjant žingsnio trajektorijos aukščiui didėja (3.22 pav.). Aproximuojant gautus rezultatus galima nustatyti elektros srovės stiprio priklausomybės nuo žingsnio trajektorijos aukščio lygtį. Iš grafiko matyti, kad elektros srovės stiprio didėjimas paklaidų ribose yra tiesinis, todėl buvo pritaikyta tiesinė aproksimacija. Gauta elektros srovės stiprio priklausomybės nuo žingsnio trajektorijos aukščio lygtis:

$$I = 0,002 \cdot h + 0,226 . \quad (3.4)$$



3.22 pav. Elektros srovės stiprio priklausomybė nuo žingsnio trajektorijos aukščio, kai roboto kūnas yra stačiakampio formos. Raudona linija – tiesinė aproksimacija

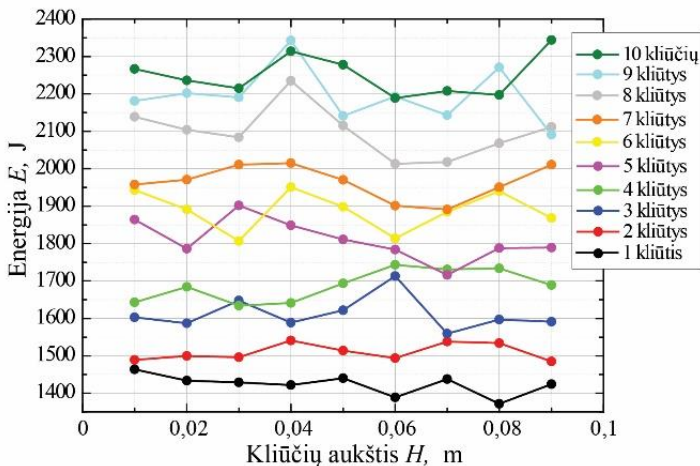
Fig. 3.22. Current dependence on step trajectory height when robot body is rectangle shape. Red line – linear approximation

Gauta (3.4) lygtis buvo integruota į imitacinį roboto modelį ir buvo naudojama robotui tenkančios elektros srovės stiprio vertei gauti pagal judėjimo parametrus kiekvienai kojai atskirai. Žinoma, norint sėkmingai perlipti kliūtis, robotas turi kelti koją į didesnę aukštį, nei yra kliūties aukštis. Todėl imitacinio

modelio programoje buvo nurodyta, kad robotas koją keltų į 0,01 m didesnę aukštį nei kliūtis aukštis. Taigi, žinant kliūtis aukštį H , elektros srovės stiprio vertė parenkama pagal $h = H + 0,01$ kojos perkėlimo aukštį. Taip pat šiuose tyrimuose suvartojamos energijos kiekis buvo vertinamas pagal (2.74) lygtį, kurioje yra įskaičiuotas vėlinimas dėl atsitrenkimų į kliūtis.

Prieš atliekant imitacinius tyrimus su kliūtimis buvo atlikta serija matavimų be kliūčių užduodant robotui nukeliauti skirtingus atstumus. Šie bandomieji matavimai buvo naudingi lyginant energijos sąnaudas judant lygiu paviršiumi ir perlipant kliūtis. Tyrimai buvo atliekami tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir elektros srovės stiprio identifikavimo eksperimentai. Robotui nukeliauti buvo numatyti šie atstumai: 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m, 3,5 m ir 4 m. Buvo matuojama pilnutinė suvartotos energijos vertė E_p ir vidutinė suvartojama energijos vertė per visą nueitą atstumą E_{vid} .

Gauti energijos priklausomybės nuo nueito kelio rezultatai rodo, kad energijos sąnaudos proporcingai didėja didėjant atstumui. Robotas suvartoja ~1235 J energijos nueidamas 1 m atstumą, o nuejęs 4 m – ~4700 J. Energijos sąnaudos padidėja ~3500 J atstumui padidėjus 3 m. Tačiau vidutinė sunaudotos energijos vertė kelio vienetui liko nepakitusi (~80 J). Tai rodo, kad robotui judant lygiu paviršiumi, energijos sąnaudos yra stabilios. Šiuo atveju energijos sąnaudų stabilumas parodo, kad kiekvieno pilno judėjimo ciklo metu pilnutinė energijos vertė padidėja tokiu pačiu energijos kiekiu.



3.23 pav. Energijos sąnaudų priklausomybė nuo kliūčių aukščio esant skirtingiems kliūčių kiekams roboto kelyje

Fig. 3.23. Energy consumption dependence on obstacle height with different number of obstacles along robot's path

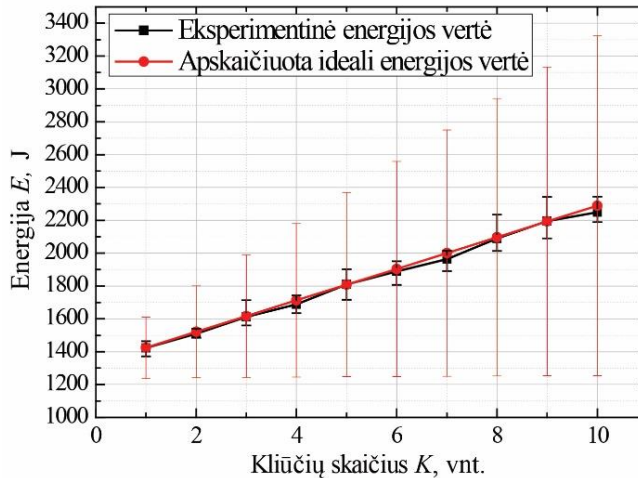
Robotas aukščiausiai kojas gali kelti tik į 0,1 m aukštį, todėl tolimesni tyrimai buvo atlikti tik su kliūtimis, kurių aukštis neviršija šio aukščio (t. y. 0,09 m arba mažesnės). Robotui visada būdavo užduodamas tas pats 1 m atstumas, kurį jis turi įveikti. Kliūčių tankis buvo didinamas nuo 1 kliūtis kelyje iki 10 kliūčių. Visos kliūtys buvo sutalpinamos 1 m kelyje, kad robotas būtinai turėtų jas perlipti, tokiu būdu užtikrinant, kad kliūčių tankis neknitančiame paviršiaus plote didėja. Visų kliūčių aukščiai buvo nustatomi vienodi. Su kiekviena konfigūracija buvo atliekama po tris matavimus, nes kiekvieną kartą robotas gali sugaišti skirtingą laiką prie kiekvienos kliūtis ((2.74) lygtis). Viso buvo atlikta 270 matavimų. Rezultatai vaizduojami 3.23 paveiksle.

3.14 lentelė. Vidutinės energijos sąnaudų vertės neatsižvelgiant į kliūčių aukščius
Table 3.14. Average energy values without taking obstacle heights into account

Kliūčių skaičius K , vnt.	E , J		
	E_{vid}	$\Delta E_{\text{vid-}}$	$\Delta E_{\text{vid+}}$
1	1423	51	41
2	1510	25	31
3	1612	53	101
4	1688	54	55
5	1810	94	92
6	1889	82	62
7	1964	73	51
8	2089	76	146
9	2195	104	148
10	2250	61	94

Nors iš 3.22 paveikslo matyti, kad elektros srovės stipris didėja didėjant kliūčių aukščiui (taip pat turėtų didėti ir suvartojama energija), tačiau iš 3.23 paveikslo akivaizdžiai matyti priešingas rezultatas, kuris rodo, kad pilnutinė suvartojamos energijos vertė nuo kliūčių aukščio nepriklauso. Taip yra dėl to, kad elektros srovės stiprio kitimas didėjant kliūčių aukščiui yra labai mažas. Tuo labiau, kad robotas nueitų jam numatytą atstumą, jis turi atlikti tam tikrą žingsnių skaičių (pvz. 50 ar 100). Iš šių visų žingsnių, tik maža dalis jų bus skirta tam, kad perlipti kliūtis, todėl kliūčių aukštis bendram suvartojamam energijos kiekiui turi mažą įtaką.

Tačiau didėjant kliūčių kiekiui roboto kelyje, energija padidėja nuo ~1460 J iki ~2345 J. Roboto energijos sąnaudos perlipant 10 kliūčių (1 m atstumas) beveik prilygsta energijos sąnaudoms robotui nukeliaujant 2 m atstumą be kliūčių. Taigi norint, kad robotas naudotų mažesnę energijos kiekį reikia parinkti kelią, kuriame yra mažiau kliūčių, tačiau atsižvelgti į kliūčių dydį nėra labai svarbu.



3.24 pav. Energijos sąnaudų priklausomybė nuo kliūčių tankio. Raudonos paklaidų linijos vaizduoja minimalias ir maksimalias galimas energijos vertes

Fig. 3.24. Energy consumption dependence on obstacle density. Red deviation lines represent minimum and maximum possible energy values

Naudojant (2.74) lygtį buvo atlikti teoriniai energijos sąnaudų skaičiavimai, kurie buvo naudojami eksperimentinių rezultatų palyginimui. Visų pirma buvo skaičiuojamos energijos vertės esant vidutinei Δt vertei. Šios vertės turėtų būti palyginamos su vidutinėmis energijų vertėmis, gautomis bandymų metu (3.14 lentelė). Toliau buvo skaičiuojamos minimalios ir maksimalios galimos teorinės energijos vertės įstačius Δt_{\min} ir Δt_{\max} vertes, kurios turi parodyti, kiek robotas suvartos energijos sugaišdamas minimalų ir maksimalų laiko kiekį perlipti visoms kliūtims. Tokios energijos vertės atspindi, kiek mažiausiai ir kiek daugiausiai energijos gali robotas suvartoti perlipdamas tam tikrą kliūčių skaičių. Šios vertės yra pavaizduotos kaip nukrypimai nuo vidutinės vertės 3.24 paveiksle.

Visų pirma matyti, kad imitacinių tyrimų rezultatai sutampa su teoriškai apskaičiuotomis vertėmis. Tai patvirtina, kad esant atsitiktiniam kiekvienos roboto kojos vėlinimui prie kliūties, suvartojamos energijos kiekis didėja tiesiškai, priklausomai nuo kliūčių skaičiaus. Netgi paklaidų vertės niekada nesiekia minimalių ar maksimalių galimų energijos sąnaudų verčių. Tačiau svarbiausia atkreipti dėmesį į apatines teorines energijos sąnaudų vertes. Jos rodo, kad teoriškai yra įmanoma robotui perlipti visas jo kelyje esančias kliūtes suvartojant minimalų energijos kiekį (prilygsta judėjimui lygiu paviršiumi).

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Šešiakojo roboto energijos sąnaudos priklauso nuo eisenos ir greičio. Energetiškai efektyviausios eisenos yra banguojanti, judant mažu greičiu, ir trikojė, judant dideliu greičiu. Parenkant tinkamas eisenas priklausomai nuo roboto judėjimo greičio energijos sąnaudas galima sumažinti iki 21 %.

2. Perskaičiavus energijos sąnaudų vertes į transportavimo kaštus, pastebėta, kad šešiakojo roboto judėjimas yra energetiškai efektyvus tik robotui judant didesniu kaip 0,16 kūno ilgio/s greičiu. Taip pat pastebėta, kad mažiausią transportavimo kaštų vertę šešiakojui robotui pasiekti galima taikant trikoję eiseną ir judant didžiausiu galimu greičiu. Judant 1,32 kūno ilgio/s greičiu, transportavimo kaštų vertė gaunama 5,75. Tai yra vienas iš geriausių rezultatų, lyginant su kitais vaikščiojančiais robotais, kurių transportavimo kaštų vertės kinta nuo 8,9 iki 128.

3. Roboto judėjimo per kliūtis tyrimo rezultatai parodė, kad santykiniai nuokrypiai nuo numatytos trajektorijos gali siekti apie 24 % netaikant kliūčių perlipimo metodo einant 1 m atstumą. Taikant kliūčių perlipimo metodą santykinius nuokrypius galima sumažinti iki 12 %. Mažiausi nuokrypiai robotui perlipant kliūtis gali būti pasiekti naudojant banguojančią eiseną einant trumpesnę atstumą.

4. Atlikus energijos sąnaudų minimizavimo su parametru parinkimu tyrimus pastebėta, kad energijos sąnaudas galima minimizuoti parenkant pėdos trajektorijos generavimo parametrus, priklausomai nuo kliūčių dydžio. Tuo atveju, kai roboto kojų judesiai nėra sinchronizuoti laiko atžvilgiu, galima gauti iki 14,9 % mažesnes energijos sąnaudas. Kai kojų judesiai yra sinchronizuoti laiko atžvilgiu, galima gauti iki 3,3 % mažesnes energijos sąnaudas imitacinio modelio atveju ir iki 2,4 % mažesnes energijos sąnaudas su realiu robotu.

5. Energijos sąnaudų priklausomybės nuo kliūčių dydžio ir tankio tyrimo rezultatai parodė, kad energijos sąnaudos priklauso nuo kliūčių tankio aplinkoje, tačiau nuo kliūčių aukščio priklauso labai mažai (0,00022 J/cm). Kiekviena papildoma kliūtis viename metre, nepriklausomai nuo jos dydžio, šešiakojo roboto kelyje energijos sąnaudas padidina apie 7 %.

Bendrosios išvados

1. Atlikus literatūros analizę buvo pastebėta, kad vaikščiojančių robotų pagrindinis privalumas yra gebėjimas judėti nelygiu paviršiumi ir prisitaikyti prie aplinkos. Taip pat buvo nustatyta, kad didžiausias vaikščiojančių robotų trūkumas, lyginant su važiuojančiais robotais, yra didelės energijos sąnaudos, kurios atsiranda dėl didelio pavarų skaičiaus ir netobulų valdymo metodų.

2. Sudarytas šešiakojo roboto matematinis modelis, kuriame yra galimybė skaičiuoti roboto energijos sąnaudas. Elektros srovės stiprio duomenys gauti atliekant tyrimus su realiu šešiakoju robotu. Modelis yra universalus ir gali būti naudojamas atliekant roboto judėjimo ir energijos sąnaudų tyrimus. Naudojant imitacinį modelį galima atlikti didesnę kiekį matavimų, o tai didina tyrimų tikslumą.

3. Vaikščiojančių robotų energijos sąnaudos priklauso nuo judėjimo greičio bei eisenos. Iki 7,7 % mažesnes šešiakojo roboto energijos sąnaudas galima gauti taikant trikoję eiseną vietoj banguojančios, judant mažais greičiais (0,184 kūno ilgiai/s ar mažiau) ir iki 21 % taikant banguojančią eiseną vietoj trikojės, judant dideliais greičiais (0,184 kūno ilgiai/s ar daugiau). Mažiausia transportavimo kaštų vertė – 5,75 gaunama, kai šešiakojis

robotas juda trikoje eiseną ir didžiausiu greičiu, kuris tirtam modeliui yra lygus 1,32 kūno ilgio/s.

4. Sukurtas kliūčių perlipimo metodas gali būti taikomas vaikščiojantiems robotams. Netaikant kliūčių perlipimo metodo, santykiniai nuokrypiai nuo numatytos trajektorijos gali siekti iki 24 % einant 1 m atstumą, kai tuo tarpu taikant kliūčių perlipimo metodą, santykiniai nuokrypiai nuo numatytos trajektorijos gali būti sumažinti iki 12 %, nepriklausomai nuo numatyto atstumo. Mažiausi nuokrypiai buvo gauti taikant banguojančią eiseną judant per paviršių su mažesniu kliūčių skaičiumi.

5. Energijos sąnaudos priklauso nuo kliūtis dydžio tik tada, kai roboto kojų judesiai nėra sinchronizuoti laiko atžvilgiu. Šiuo atveju galima gauti apie 14,9 % mažesnes energijos sąnaudas parenkant trumpesnę pėdos trajektorijos ilgį. Jei roboto kojų judesiai yra sinchronizuoti laiko atžvilgiu, galima gauti tik apie 3,3 % mažesnes energijos sąnaudas. Šiuo atveju energijos sąnaudos stipriai priklauso nuo kliūčių skaičiaus roboto kelyje. Pastebėta, kad kiekviena papildoma kliūtis viename metre roboto kelio, nepriklausomai nuo jos dydžio, energijos sąnaudas padidina apie 7 %.

Literatūra ir šaltiniai

Ackerman, J.; Seipel, J. 2011. Energetics of bio-inspired legged robot locomotion with elastically-suspended loads, *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*: 203–208.

Ackerman, J.; Seipel, J. 2013. Energy efficiency of legged robot locomotion with elastically suspended loads, *IEEE Transactions on Robotics* 29(2): 321–330.

Agheli, M.; Nestinger, S., S. 2016. Foot force based reactive stability of multi-legged robots to external perturbations, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 81: 287–300.

Ali, F.; Shukor, A., Z., H.; Miskon, M., F.; Nor, M., K., M.; Salim, S., I., M. 2013. 3-D biped robot walking along slope with dual length linear inverted pendulum method (DLLIPM), *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(11): 1–12.

Amran, A., C.; Motoi, N.; Kawamura, A. 2013. Regeneration of LIPM bipedal walking trajectories for minimum energy consumption, *2013 IEEE International Conference on Mechatronics*: 617–622.

Antoska, V.; Jovanovic, K.; Petrovic, V., M.; Bascarevic, N.; Stankovski, M. 2013. Balance analysis of the mobile anthropomimetic robot under disturbances – ZMP approach, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(4): 1–10.

Arena, P.; Fortuna, L.; Frasca, M.; Patane, L.; Pavone, M. 2006. Realization of a CNN-driven cockroach-inspired robot, *2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*: 2649–2652.

Arevalo, J., C.; Cestari, M.; Merodio, D., S.; Garcia, E. 2014. On the necessity of including joint passive dynamics in the impedance control of robotic legs, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11(7): 1–12.

Arevalo, J., C.; Merodio, D., S.; Cestari, M.; Garcia, E. 2015. Identifying ground-robot impedance to improve terrain adaptability in running robots, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12(1): 1–12.

Asif, U. 2012. Improving the navigability of a hexapod robot using a fault-tolerant adaptive gait, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9(2): 1–12.

Asif, U.; Iqbal, J. 2011. An approach to stable walking over uneven terrain using a reflex-based adaptive gait, *Journal of Control Science and Engineering* 2011: 1–12.

Baisch, A., T.; Ozcan, O.; Goldberg, B.; Ithier, D.; Wood, R., J. 2014. High speed locomotion for a quadrupedal microrobot, *The International Journal of Robotics Research* 33(8): 1063–1082.

Baisch, A., T.; Sreetharan, P., S.; Wood, R., J. 2010. Biologically-inspired locomotion of a 2g hexapod robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12(1): 1–6.

Barai, R., K.; Nonami, K. 2008. Locomotion control of a hydraulically actuated hexapod robot by robust adaptive fuzzy control with self-tuned adaptation gain and dead zone fuzzy pre-compensation, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 23: 35–56.

Bartsch, S.; Birnschein, T.; Rommermann, M.; Hilljegerdes, J.; Kuhn, D.; Kirchner, F. 2012. Development of the six-legged walking and climbing robot SpaceClimber, *Journal of Field Robotics* 29(3): 506–532.

Belter, D.; Skrzypczynski, P. 2011. Rough terrain mapping and classification for foothold selection in a walking robot, *Journal of Field Robotics* 28(4): 497–528.

Best, G.; Moghadam, P.; Kottege, N.; Kleeman, L. 2013. Terrain classification using a hexapod robot, *Proceedings of Australian Conference on Robotics and Automation*: 1–8.

Bhounsule, P., A.; Corteli, J.; Grewal, A.; Hendriksen, B.; Karssen, J., G., D.; Paul, C.; Ruina, A. 2014. Low-bandwidth reflex-based control for lower power walking: 65 km on a single battery charge, *The International Journal of Robotics Research* 33(10): 1305–1321.

Bin, C., R.; Zhen, C., Y.; Qi, H., W.; Jiang, W.; Xu, M., H. 2013. Trotting gait of a quadruped robot based on the time-pose control method, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(2): 1–7.

Birkmeyer, P.; Peterson, K.; Fearing, R., S. 2009. DASH: a dynamic 16g hexapedal robot, *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*: 1–7.

Carbone, G.; Ceccarelli, M. 2008. A low-cost easy-operation hexapod walking machine, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 5(2): 161–166.

Castro, X., Y., S.; Murillo, M., G.; Resendiz, L., A., P.; Castaneda, C. 2013. Kinematics of Hex-Piderix – a six-legged robot – using screw theory, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(1): 1–8.

- Chaari, I.; Koubaa, A.; Trigui, S.; Bennaceur, H.; Ammar, A.; Shalfan, K., A. 2014. SmartPATH: an efficient hybrid ACO-GA algorithm for solving the global path planning problem of mobile robots, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11(7): 1–15.
- Chai, H.; Rong, X.; Tang, X.; Li, Y. 2016. Gait-based quadruped robot planar hopping control with energy planning, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 13(1): 1–13.
- Chen, G.; Jin, B.; Chen, Y. 2017. Accurate position and posture control of a redundant hexapod robot, *Arabian Journal of Science and Engineering* 42(5): 2031–2042.
- Chen, W.; Ren, G.; Zhang, J.; Wang, J. 2012. Smooth transition between different gaits of a hexapod robot via a central pattern generators algorithm, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 67: 255–270.
- Chow, Y., H.; Chung, R. 2002. VisionBug: a hexapod robot controlled by stereo cameras, *Autonomous Robots* 13: 259–276.
- Daou, H., E.; Libourel, P., A.; Renous, S.; Bels, V.; Guinot, J., C. 2013. Methods and experimental protocols to design a simulated bio-mimetic quadruped robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(5): 1–8.
- Ding, L.; Gao, H.; Deng, Z.; Song, J.; Liu, Y.; Liu, G.; Iagnemma, K. 2013. Foot-terrain interaction mechanics for legged robots: modeling and experimental validation, *The International Journal of Robotics Research* 32(13): 1585–1606.
- Ding, W.; Wang, Z.; Rovetta, A.; Zhu, J., M. 2010. Locomotion analysis of hexapod robot, *Climbing and Walking Robots*: 291–311.
- Erden, M., S.; Leblebicioglu, K. 2007. Torque distribution in a six-legged robot, *IEEE Transactions on Robotics* 23(1): 179–186.
- Estremera, J.; Santos, P., G.; Orozco, J., A. 2005. Neural virtual sensors for terrain adaptation of walking machines, *Journal of Robotic Systems* 22(6): 299–311.
- Estremera, J.; Waldron, K. 2008. Thrust control, stabilization and energetics of a quadruped running robot, *The International Journal of Robotics Research* 27(10): 1135–1151.
- Ferreira, C.; Santos, C., P. 2017. A sensory-driven controller for quadruped locomotion, *Biological cybernetics* 111: 49–67.
- Fielding, M., R.; Dunlop, G., R. Omnidirectional hexapod walking and efficient gaits using restrictedness, *The International Journal of Robotics Research* 23(10-11): 1105–1110.
- Geva, Y.; Shapiro, A. 2014. A novel design of a quadruped robot for research purposes, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11(7): 1–13.
- Go, Y.; Yin, X.; Bowling, A. 2006. Navigability of multi-legged robots, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 11(1): 1–8.

Guang, Z., Y.; Bo, J.; Wei, L. 2015. Leg compliance control of a hexapod robot based on improved adaptive control in different environments, *Journal of Central South University* 22(3): 904–913.

Hameed, I., A. 2014. Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 74: 965–983.

Hauser, K.; Bretl, T.; Latombe, J., C.; Harada, K.; Wilcox, B. 2008. Motion planning for legged robots on varied terrain, *The International Journal of Robotics Research* 27(11-12): 1325–1349.

Haynes, G., C.; Rizzi, A., A.; Koditschek, D., E. 2012. Multistable phase regulation for robust steady and transitional legged gaits, *The International Journal of Robotics Research* 31(14): 1712–1738.

He, Y.; You, Z.; Wang, X. 2013. Modelling of a hybrid energy system for autonomous application, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(10): 1–6.

Henrich, D. 1997. Fast motion planning by parallel processing – a review, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 20: 45–69.

Hobbelen, D., G., E.; Wisse, M. 2008. Ankle actuation for limit cycle walkers, *The International Journal of Robotics Research* 27(6): 709–735.

Hoon, J.; Kim, J., Y.; Oh, J., H. 2008. Adjustment of home posture of biped humanoid robot using sensory feedback control, *Journal of Intelligent Robotic Systems* 51: 421–438.

Hyun, D., J.; Lee, J.; Park, S.; Kim, S. 2016. Implementation of trot-to-gallop transition and subsequent gallop on the MIT Cheetah I, *The International Journal of Robotics Research* 35(13): 1627–1650.

Ido, J.; Shimizu, Y.; Matsumoto, Y.; Ogasawara, T. 2009. Indoor navigation for a humanoid robot using a view sequence, *The International Journal of Robotics Research* 28(2): 315–325.

Irawan, A.; Nonami, K. 2011. Optimal impedance control based on body inertia for a hydraulically driven hexapod robot walking on uneven and extremely soft terrain, *Journal of Field Robotics* 28(5): 690–713.

Jisha, V., R.; Ghose, D. 2012. Frontier based goal seeking for robots in unknown environments, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 67: 229–254.

Juang, C., F.; Chang, Y., C.; Hsiao, C., M. 2011. Evolving gaits of a hexapod robot by recurrent neural networks with symbiotic species-based particle swarm optimization, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58(7): 3110–3119.

Juang, C., F.; Chen, Y., H.; Jhan, Y., H. 2015. Wall-following control of a hexapod robot using a data-driven fuzzy controller learned through differential evolution, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62(1): 611–619.

Kalakrishnan, M.; Buchli, J.; Pastor, P.; Mistry, M.; Schaal, S. 2011. Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain, *The International Journal of Robotics Research* 30(2): 236–258.

Kaliyamoorthy, S.; Quinn, R., D.; Zill, S., N. 2005. Force sensors in hexapod locomotion, *The International Journal of Robotics Research* 24(7): 563–574.

Kar, D., C. 2003. Design of statically, stable walking robot: a review, *Journal of Robotic Systems* 20(11): 671–686.

Kar, D., C.; Issac, K., K.; Jayrajan, K. 2001. Minimum energy force distribution for a walking robot, *Journal of Robotic Systems* 18(2): 47–54.

Kecskes, I.; Odry, P. 2014. Optimization of PI and fuzzy-PI controllers on simulation model of Szabad(ka)-II walking robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11(11): 1–13.

Kim, H.; Kim, B., K. 2014. Minimum-energy trajectory generation for concerning with a fixed heading for three-wheeled omni-directional mobile robots, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 75: 205–221.

Kim, J., Y. 2015. Dynamic balance control algorithm of a six-legged walking robot, Little Crabster, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 78: 47–64.

Kim, J., Y.; Jun, B., H. 2014. Design of six-legged walking robot, Little Crabster for underwater walking and operation, *Advanced Robotics* 28(2): 77–89.

Kim, J., Y.; Park, I., W.; Oh, J., H. 2009. Realization of dynamic stair climbing for biped humanoid robot using force/torque sensors, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 56: 389–423.

Kim, S.; Clark, J., E.; Cutkosky, M., R. 2006. iSprawl: design and tuning for high-speed autonomous open-loop running, *The International Journal of Robotics Research* 25(9): 903–912.

Kimura, H.; Fukuoka, Y.; Cohen, A., H. 2007. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts, *The International Journal of Robotics Research* 26(5): 475–490.

Kohut, N., J.; Hoover, A., M.; Ma, K., Y.; Baek, S., S.; Fearing, R., S. 2011. MEDIC: a legged millirobot utilizing novel obstacle traversal, *2011 IEEE Conference on Robotics and Automation*: 1–7.

Koos, S.; Cully, A.; Mouret, J., B. 2013. Fast damage recovery in robotics with the T-resilience algorithm, *The International Journal of Robotics Research* 32(14): 1700–1723.

Kottege, N.; Parkinson, C.; Moghadam, P.; Elfes, A.; Singh, S., P., N. 2015. Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation*: 5140–5147.

Kruusmaa, M. 2003. Global level path planning for mobile robots in dynamic environments, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 38: 55–83.

Kwon, O., S.; Choi, R., H.; Lee, D., H. 2012. Locomotion control of a compliant legged robot from slow walking to fast running, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9(6): 1–7.

Li, M.; Wang, X.; Guo, W.; Wang, P.; Sun, L. 2014. System design of a Cheetah robot toward ultra-high speed, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11(5): 1–11.

Lin, B., S.; Song, S., M. 2001. Dynamic modeling, stability, and energy efficiency of a quadrupedal walking machine, *Journal of Robotic Systems* 18(11): 657–670.

Lin, P., C.; Komsuoglu, H.; Koditschek, D., E. 2006. Sensor data fusion of body state estimation in a hexapod robot with dynamical gaits, *IEEE Transactions on Robotics* 22(5): 932–943.

Lin, Y.; Song, S., M. 1997. Learning hybrid position/force control of a quadruped walking machine using a CMAC neural network, *Journal of Robotic Systems* 14(6): 483–499.

Lock, R., J.; Vaidyanathan, R.; Burgess, S., C.; Quinn, R., D. 2009. Impact of passive stiffness variation on stability and mobility of a hexapod robot, *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*: 980–986.

Long, S.; Xin, G.; Deng, H.; Zhong, G. 2014. An improved force-angle stability margin for radial symmetrical hexapod robot subject to dynamic effects, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12(5): 1–11.

Luneckas, T. 2013. Šešiakojo roboto judėjimo nelygiu paviršiumi tyrimas. Daktaro disertacija, *Vilnius TECHNIKA*: 1–90.

Macias, L., C.; Espinosa, C.; Loukianov, A.; Corrochano, E., B. 2017. Inverse kinematics for a 6-DOF walking humanoid robot leg, *Advances in Applied Clifford Algebras* 27(1): 581–597.

Mahapatra, A.; Bhavanibhatla, K.; Roy, S., S.; Pratihari, D., K. 2015. Energy-efficient inverse dynamic model of a hexapod robot, *International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems*: 1–7.

Marhefka, D., W.; Orin, D., E. 1997. Gait planning for energy efficiency in walking machines, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 474–480.

Marhefka, D., W.; Orin, D., E. 1998. Quadratic optimization of force distribution in walking machines, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*: 477–483.

Massah, A., M., B.; Zamani, A.; Salehinia, Y.; Aliyari, M., S.; Teshnehlab, M. 2013. A hybrid controller based on CPG and ZMP for biped locomotion, *Journal of Mechanical Science and Technology* 27(11): 3473–3486.

Merodio, D., S.; Cestari, M.; Arevalo, J., C.; Garcia, E. 2012. Control motion approach of a lower limb orthosis to reduce energy consumption, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9(6): 1–8.

Minati, L.; Zorat, A. 2002. A tree architecture with hierarchical data processing on a sensor-rich hexapod robot, *Advanced Robotics* 16(7): 595–608.

Moosavian, S., A.; Dabin, A. 2010. Dynamics and planning for stable motion of a hexapod robot, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*: 818–823.

Mostafa, K.; Chiang, J., Y.; Wei, K., T.; Her., I. 2015. Image-based method for determining better walking strategies for hexapods, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12(5): 1–12.

Nishii, J. 1998. Gait pattern and energetic cost in hexapods, *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 20(5): 2430–2433.

Okada, T.; Botelho, W., T.; Shimizu, T. 2010. Motion analysis with experimental verification of the hybrid robot PEOPLER-II for reversible switch between walk and roll on demand, *The International Journal of Robotics Research* 29(9): 1199–1221.

Omer, A.; Hashimoto, K.; Lim, H.; Takanishi, A. 2014. Study of bipedal robot walking motion in low gravity: investigation and analysis, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11(9): 1–14.

Parasuraman, S.; Hang, F., J.; Khan, M., K., A., A. 2012. Robot-crawler: statically balanced gaits, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9: 1–9.

Parker, G.; Zbeda, R. 2014. Learning area coverage for a self-sufficient hexapod robot using a cyclic genetic algorithm, *IEEE Systems Journal* 8(3): 778–790.

Robotis. 2006. Dynamixel AX-12, User's manual, [<http://www.trossenrobotics.com/images/productdownloads/AX-12%28English%29.pdf>]

Rodriguez, A., G., G.; Rodriguez, A., G.; Garcia, F., C. 2014. Improving the energy efficiency and speed of walking robots, *Mechatronics* 24: 476–488.

Roennau, A.; Dillmann, R. 2011. On-board energy consumption estimation for a six-legged walking robot, *14th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*: 1–9.

Roy, S., S.; Pratihar, D., K. 2011. Dynamic modeling and energy consumption analysis of crab walking of a six-legged robot, *2011 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications*: 82–87.

Roy, S., S.; Pratihar, D., K. 2014. Kinematics, dynamics and power consumption analyses for turning motion of a six-legged robot, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 74: 663–688.

Run, B., C.; Zheng, C., Y.; Jian, W.; Xu, M., H. 2013. Inverse kinematics of a new quadruped robot control method, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(1): 1–8.

- Saito, K.; Takato, M.; Sekine, Y.; Uchikoba, F. 2012. Biomimetics micro robot with active hardware neural networks locomotion control and insect-like switching behaviour, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9: 1–6.
- Santos, J.; Fernandez, P. 2017. Evolved synaptic delay based neural controllers for walking patterns in hexapod robotic structures, *Natural Computing* 16(2): 201–211.
- Santos, P., G.; Garcia, E.; Ponticelli, R.; Armada, M. 2009. Minimizing energy consumption in hexapod robots, *Advanced Robotics* 23(6): 681–704.
- Saranli, U.; Buehler, M.; Koditschek, D., E. 2001. Rhex: a simple and highly mobile hexapod robot, *The International Journal of Robotics Research* 20(7): 616–631.
- Schilling, M.; Cruse, H.; Arena, P. 2007. Hexapod walking: an expansion to walknet dealing with leg amputations and force oscillations, *Biological Cybernetics* 96: 323–340.
- Schilling, M.; Hoinville, T.; Schmitz, J.; Cruse, H. 2013. Walknet, a bio-inspired controller for hexapod walking, *Biological Cybernetics* 107: 397–419.
- Seven, U.; Akbas, T.; Fidan, K., C.; Erbatur, K. 2012. Bipedal robot walking control on inclined planes by fuzzy reference trajectory modification, *Soft Computing* 16: 1959–1979.
- Shih, T., S.; Tsai, C., S.; Her, I. 2012. Comparison of alternative gaits for multiped robots with severed legs, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9(4): 1–8.
- Shkolnik, A.; Levashov, M.; Manchester, I., R.; Tedrake, R. 2011. Bounding on rough terrain with the LittleDog robot, *The International Journal of Robotics Research* 30(2): 192–215.
- Silva, M., F.; Machado, J., T. 2011. A literature review on the optimization of legged robots, *Journal of Vibration and Control* 18(12): 1753–1767.
- Siregar, H., P. 2005. Simulation of power consumption for walking robot, *Fifth International Workshop on Robot Motion and Control*: 27–32.
- Spenko, M., J.; Haynes, G., C.; Saunders, J., A.; Cutkosky, M., R.; Rizzi, A., A. 2008. Biologically inspired climbing with hexapedal robot, *Journal of Field Robotics* 25(4-5): 223–242.
- Sprowitz, A.; Tuleu, A.; Vespignani, M.; Ajallooeian, M.; Badri, E.; Ijspeert, A., J. 2013. Towards dynamic trot gait locomotion: design, control, and experiments with Cheetah-cub, a compliant quadruped robot, *The International Journal of Robotics Research* 32(8): 932–950.
- Tang, Y.; Ma, S.; Sun, Y.; Ge, D. 2015. Planar legged walking of a passive-spine hexapod robot, *Advanced Robotics* 29(23): 1–16.
- Texas Instruments. 2005. High-side measurement current shunt monitor, [<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina139.pdf>].
- Vanderborght, B.; Lefeber, R., V., H., D.; Hollander, T., G., S., K., W. 2009. Comparison of mechanical design and energy consumption of adaptable, passive-compliant actuators, *The International Journal of Robotics Research* 28(1): 90–103.

- Walas, K. 2015. Terrain classification and negotiation with a walking robot, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 78: 401–423.
- Wang, S.; Zhu, Q.; Xiong, R.; Chu, J. 2014. Flexible robotic spine actuated by shape memory alloy, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11(4): 1–11.
- Wang, W., J.; Chou, H., G.; Chen, Y., J.; Lu, R., C. 2017. Fuzzy control strategy for a hexapod robot walking on an incline, *International Journal of Fuzzy Systems*: 1–15.
- Wang, Z.; Ding, X.; Rovetta, A.; Giusti, A. 2011. Mobility analysis of the typical gait of a radial symmetrical six-legged robot, *Mechatronics* 21: 1133–1146.
- Wei, D.; Ge, W. 2014. Research on one bio-inspired jumping locomotion robot for search and rescue, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11(10): 1–10.
- Weihei, C.; Guanqiao, R.; Jianhua, W.; Dong, L. 2014. An adaptive locomotion controller for a hexapod robot: CPG, kinematics and force feedback, *Science China* 57(11): 1–18.
- Weingarten, J., D.; Groff, R., E.; Koditschek, D., E. 2004. A framework for the coordination of legged robot gaits, *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*: 679–686.
- Wooden, D.; Malchano, M.; Blankespoor, K.; Howard, A.; Rizzi, A., A.; Raibert, M. 2010. Autonomous navigation for BigDog, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*: 4736–4741.
- Wu, J.; Qiao, G.; Ge, J.; Sun, H.; Song, G. 2012. Automatic battery swap system for home robots, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9(6): 1–9.
- Wu, X.; Li, Y.; Zhou, C.; Gao, Q.; Teng, W. 2011. Life extending minimum-time path planning for hexapod robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 8(2): 1–6.
- Wu, X.; Teng, L.; Chen, W.; Ren, G.; Jin, Y.; Li, H. 2013. CPGs with continuous adjustment of phase difference for locomotion control, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(6): 1–13.
- Xiong, X.; Worgotter, F.; Manoonpong, P. 2015. Adaptive and energy efficient walking in a hexapod robot under neuromechanical control and sensorimotor learning, *IEEE Transactions on Cybernetics*: 1–14.
- Xin, G.; Deng, H.; Zhong, G.; Wang, H. 2015. Hierarchical kinematic modelling and optimal design of a novel hexapod robot with integrated limb mechanism, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12(9): 1–14.
- Xin, R.; Xiao, N. 2009. A novel compound biped locomotion algorithm for humanoid robots to realize biped walking, *Journal of Control Theory and Applications* 7(1): 23–28.
- Yamasaki, F.; Hosoda, K.; Asada, M. 2002. An energy consumption based control for humanoid walking, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*: 2473–2477.

- Yang, W.; Kim, H.; You, B., J. 2013. Biologically inspired self-stabilizing control for bipedal robots, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(2): 1–12.
- Yildirim, S. 2008. A proposed hybrid neural network for position control of a walking robot, *Nonlinear Dynamics* 52(3): 207–215.
- Yoneda, K.; Ota, Y. 2003. Non-bio-mimetic walkers, *The International Journal of Robotics Research* 22(3-4): 241–249.
- Zambrano, J., H., B.; Huitzil, C., T.; Girau, B. 2012. Configurable embedded CPG-based control for robot locomotion, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9(3): 1–12.
- Zenker, S.; Aksoy, E., E.; Goldschmidt, D.; Worgotter, F.; Manoonpong, P. 2013. Visual terrain classification for selecting energy efficient gaits of a hexapod robot, *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*: 577–584.
- Zielinska, T. 2015. Walking machines for exploration – optimizing the energy spendings, *Proceedings of the 10th International Workshop on Robot Motion and Control*: 124–129.
- Zhang, R.; Latombe, J., C. 2013. Capuchin: a free-climbing robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(4): 1–18.
- Zhang, T.; Wei, Q.; Ma, H. 2013. Position/force control for a single leg of a quadruped robot in an operation space, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(2): 1–6.
- Zhang, X.; Zheng, H.; Chen, L. 2006. Gait transition for a quadrupedal robot by replacing the gait matrix of a central pattern generator model, *Advanced Robotics* 20(7): 849–866.
- Zhang, Z., G.; Kimura, H.; Fukuoka, Y. 2006. Autonomously generating efficient running of a quadruped robot using delayed feedback control, *Advanced Robotics* 20(6): 607–629.
- Zhou, C. 2000. Neuro-fuzzy gait synthesis with reinforcement learning for a biped walking robot, *Soft Computing* 4: 238–250.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Luneckas, M.; Luneckas, T.; Udris, D. 2018. Leg placement algorithm for foot impact force minimization, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 15(1): 1–10. ISSN 1729-8814.

Valaitis, V.; Luneckas, T.; Luneckas, M.; Udris, D. 2015. Minimizing hexapod robot foot deviations using multilayer perceptron, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12(12): 1–8. ISSN 1729-8806.

Luneckas, M.; Luneckas, T.; Gavelis, V.; Valaitis, V.; Udris, D. 2015. Piezoelectric force sensors for hexapod transportation platform, *Transport: special issue on smart and sustainable transport* 30(3): 294–297. ISSN 1648-4142.

Luneckas, M.; Luneckas, T.; Udris, D.; Ferreira, N., M., F. 2014. Hexapod robot energy consumption dependence on body elevation and step height, *Elektronika ir elektrotechnika* 20(7): 7–10. ISSN 1392-1215.

Luneckas, M.; Luneckas, T. 2014. Šešiakojo roboto energijos sąnaudų priklausomybės nuo skirtingų eisenų ir greičio judant lygiu paviršiumi tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis: elektronika ir elektrotechnika; Science – future of Lithuania: Electronics and electrical engineering* T. 6, Nr. 2: 194–197. ISSN 2029-2341.

Straipsniai kituose leidiniuose

Skaburskytė, A.; Luneckas, M.; Luneckas, T.; Kriaučiūnas, J.; Udris, D. 2016. Hexapod robot gait stability investigation, *2016 IEEE 4th workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE): proceedings of the 4th IEEE workshop*: 1–4. ISBN 9781509044733.

Esteban, D., D.; Luneckas, M.; Luneckas, T.; Kriaučiūnas, J.; Udris, D. 2016. Statically stable hexapod robot body construction, *2016 IEEE 4th workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE): proceedings of the 4th IEEE workshop*: 1–4. ISBN 9781503044733.

Luneckas, M.; Luneckas, T.; Udris, D. 2013. Hexapod walking robot energy consumption dependence on the number of legs set on the surface, *ECT-2013: proceedings of the 8th international conference on electrical and control technologies* 25–28. ISSN 1822-5934.

Luneckas, T.; Luneckas, M.; Udris, D. 2013. Real-time online feet trajectory generation method for hexapod robot, *Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials VI: Selected, peer reviewed papers from the 9th International Conference on Mechatronic Systems and Materials (MSM 2013)*: 148–152. ISBN 9783038352273.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Legged robots are most suitable for walking over irregular terrain, locomotion in complex and human dangerous environments, due to the number of legs and high number of degrees of freedom (DOF) (G. C. Haynes *et. al.* 2012, X. Xiong *et. al.* 2015). High number of DOF increases the capabilities of walking robots, their flexibility, and the ability to overcome irregular terrain. All bipeds, quadrupeds, hexapods and octopods robots can have up to twenty or in some cases even more DOF. Each additional DOF is created using more motor, which is why energy consumption highly increases. Decreasing number of DOF also decreases robot's maneuverability and legs work zone. Because of that, energy consumption should be minimized using different type of solutions, for example, by optimizing robot's motion. Locomotion over irregular terrain or obstacle avoidance require environment recognition sensors, as well as adaptive locomotion methods. Such locomotion should include the selection of movement parameters and gaits. Hence, to develop an energy efficient methods for walking robots, it is necessary to investigate the energy consumption dependence on robot movement parameters and obstacle size and density.

The development of energy efficient method for locomotion over even terrain problem related to gait selection according to robot's movement speed is solved. The solution of this problem requires thorough investigation of energy consumption

dependence on robot's gait and movement speed in order to understand the relation between these parameters.

Foot path planning is a commonly used method for locomotion over obstacles (M. Kalakrishnan *et. al.* 2011), which basically calculates positions for each robot's leg through out the whole movement trajectory. Using this method, robot has a priori information about the position of each leg every moment during movement. However, the disadvantage of such method is calculation time, especially if it is done during real time, which highly decreases robot's movement speed. Different methods for obstacle detection and avoidance could be used, such as selection of foot trajectory parameters or foot trajectory transformation. These methods are much less complex and can be used real-time without changing robot's movement speed.

In this dissertation, energy consumption dependence on robot's gait is investigated and problems of developing obstacle detection and avoidance are solved. The methods and results were used for energy efficient hexapod robot locomotion in known environment, when robot has prior information about the sizes of the obstacles.

Relevance of the thesis

Energy efficient locomotion – the most important problem of legged robots, which includes subjects of robot construction and control. This type of problem is closely related to walking parameter optimization. Results obtained from solving this problem has great importance for development of energetically efficient locomotion methodology for walking robots.

Solving energy efficient locomotion problem, robot construction problems arise. There is no general methodology, that could be used for energetically efficient robots construction. Ordinary development of any walking robot does not show any energy efficient results, because the number of DOF and energy consumption of motors is not taken into account. Also, energy consumption problems arise during locomotion over even and irregular terrain. Methods, such as inverse kinematics and inverse dynamics are essential, however, they also give no information about robot's energetic efficiency. During locomotion over irregular terrain, various environmental recognition systems are required, which also increase energy consumption. This is the reason why it is necessary not only to improve robot's control, but also to improve robot's energetic efficiency.

There are different types of walking robots: biped, quadruped, hexapod or even with higher number of legs. Robots can be controlled using only kinematic methods, or using both kinematics and dynamics. By carrying out robot's energetic efficiency investigation during locomotion over even terrain and during obstacle avoidance, it is possible to develop a general methodology for energy efficient walking robot locomotion, which is not dependent on robot structure, control system, or control algorithm.

The object of research

Object of research – hexapod walking robot control method for locomotion over even terrain and obstacle detection and avoidance.

The aim of the thesis

The main purpose of the thesis is to develop and investigate energy consumption minimization methods for walking robots, used for locomotion over even terrain and obstacle avoidance.

The objectives of the thesis

To accomplish the main aim of the thesis, the following objectives have to be solved:

1. To develop hexapod robot imitational and physical models and to develop foot trajectory generation mathematical expressions for obstacle avoidance.
2. To investigate energy consumption during locomotion over even terrain and to evaluate movement deviations from given trajectory while walking over terrains with different obstacle sizes and densities.
3. To develop and investigate foot trajectory generation method, that could be used to select the most suitable leg transfer parameters using energy consumption minimization.
4. To investigate robot's energetic efficiency while moving over terrains with different size and density obstacles using developed foot trajectory generation method.

Research methodology

In this thesis, geometric calculation and Denavit-Hartenberg methods are used to develop hexapod robot inverse kinematics, parameter selection method for energy consumption minimization during obstacle avoidance investigation as well as imitation and experimental evaluation methods are used.

Scientific novelty of the thesis

During the preparation of dissertation the following results novel to electrical and electronic engineering were obtained:

1. Hexapod walking robot gait switching algorithm depending on movement speed was developed, which can be used to minimize energy consumption during locomotion over even terrain.
2. Novel obstacle detection and avoidance method for walking robots was developed, which can be used to detect and overcome obstacles during real time.

3. Foot trajectory generation method was developed which can be used to overcome known size obstacles and to select the most suitable movement parameters for energy consumption minimization.

Practical value of the research findings

1. Hexapod walking robot mathematical model was formatted, which can be used to evaluate the effectiveness and adequacy of developed methods. This model stands out by the possibility to calculate energy consumption of walking robots.
2. Physical model of hexapod robot was constructed, which can be used to perform hexapod walking robot's locomotion and energy consumption scientific research.
3. Current sensor was selected for measuring current consumption of the mobile robot, which is necessary to evaluate energy consumption.
4. Obstacle detection sensors were constructed, which are mounted on the front sides of robot legs. These sensors can be used to detect the moment robot's legs are touching the obstacle.

The defended statements

1. By using gait switching algorithm depending on robot movement speed during locomotion over even terrain up to 21 % lower energy consumption can be obtained by using wave and tripod gaits, compared to energy consumption without using gait selection algorithm.
2. Without using obstacle avoidance method average deviations from given trajectory can reach up to 24 %. By using obstacle avoidance method for hexapod robot average deviations from given trajectory can be minimized down to 12 %.
3. Using foot trajectory generation method for locomotion over various known size obstacles up to 15 % lower energy consumption can be obtained, compared to locomotion without using foot trajectory generation method.
4. Obstacle density has a strong influence on robot's energy consumption (around 83 J/obstacle), however obstacle size has a very small influence on robot's energy consumption (around 0.00022 J/cm), if obstacle size is smaller than robots size. Every additional obstacle in one meter of hexapod robot's path increases energy consumption by around 7 %.

Approval of the research findings

The research results are published in 9 scientific publications. 4 of them are published in Claravite Analytics Web of Science data base journals with impact factor, 3 – Claravite Analytics Web of Science data base “Conference Proceedings” articles, and 2 – other peer-reviewed science data bases. The main results of the thesis are presented in the following 7 scientific conferences in Lithuania and abroad:

- international conference “*iROS2017*”, 2017, Vancouver, Canada;

- foreign conference “*Engineering and evolution of the bio-hybrid societies*“ 2017, Graz, Austria;
- 4th international conference “*Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*“, 2016, Vilnius, Lithuania;
- foreign conference “*From bio-inspired to bio-hybrid (robotic) systems*“, 2016, Lausanne, Switzerland;
- annual national conference “*Science – Future of Lithuania*“, 2014–2015, Vilnius, Lithuania;
- 8th international conference “*ECT-2013: 8th international conference on electrical and control technologies*“, 2013, Kaunas, Lithuania.

During 2014 year, “*Myrobotics Winter School and Workshop*“ winter school in Cambridge, England was attended. During 2016 year, “*From bio-inspired to bio-hybrid (robotic) systems*“ winter school in Lausanne, Switzerland was attended. Also, in year 2016 doctoral internship in Carlos III University of Madrid in Madrid, Spain was carried out. Year 2017, “*Engineering and evolution of bio-hybrid societies*“ summer school in Graz, Austria was attended. Finally, in year 2015–2016 PhD stipend financed by Research Council of Lithuania for scientific accomplishments was received.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of introduction, three chapters and general conclusions.

The dissertation consists of 125 pages, where: 47 figures, 16 tables, and 96 numerated equations are used. In total 136 references are cited in the thesis.

1. Mobile robots’ energetic efficiency analysis

Walking robots, their types, construction, and control methods are reviewed. Energy consumption causes and increase reasons are discussed as well as energy consumption measurement methods, calculation and optimization used for various mobile robots.

Walking robots have been investigated for over 40 years and there are many different walking robots created varying not only by construction, but also by purpose and control. Compared to wheeled robots, the most unique advantage of walking robots is their ability to overcome irregular terrain. Because of this, walking robots can be used for rescue operations, demining, payload carrying, planetary and underwater exploration.

However, walking robots are much more complex machines compared to wheeled or tracked vehicles and require more accurate control methods to sustain stability, obtain needed speed, and to use minimum energy consumption.

All walking robots can be categorized either by number of legs (bipeds, tripeds, quadrupeds, hexapods, octopods) or by shape of the body (rectangular, hexagon, square, circular, shapeless). And because all walking robots have different number of legs, their construction is dependent on the construction of legs. Each robot has a different number of degrees of freedom (DOF) which indicates robot’s maneuverability.

Despite robot’s construction, every walking robot requires control algorithm. Most common methods are: kinematics, inverted kinematics, dynamics, and inverted dynamics. To increase accuracy proportional-integral-derivative (PID) method is also

used. Some robots are controlled by using central pattern generator (CPG) which is found in living organisms. Another popular control method is fuzzy logic which is very universal and can be used to solve various locomotion problems.

One of the biggest issues with walking robots is high energy consumption. There are a few reasons for that. First, most of the walking robots have high number of DOF which means that they have a large number of actuators. Another reason is robot's mass due to large number of construction parts. Finally, some robots use complex control systems with a lot of electronics components which can lead to high energy consumption. Although, this reason is not always the case.

In order to observe robot's energy consumption, one of the energy consumption and calculation methods must be used. There aren't many methods that can be used for robot's energetic evaluation.

One of the simplest and common method is to observe robot's current consumption. For this, current sensor is used, because voltage is always the same. Another method to evaluate overall energetic efficiency is to calculate cost of transport using robot's mass, power consumption, gravity and movement speed. This method is very universal because it can be used for evaluating energy consumption of animals, insects, any kind of vehicles. A more complex methods are: mechanical method which requires joint torques, and linear force which requires to integrate force and coordinates multiplication.

There are many different ways of minimizing energy consumption of walking robots. One of the possible ways is by calculating force distribution between robot's feet. Minimum force distribution leads to least energy consuming poses for robot. Also, robot's construction has a huge influence on energy consumption. Using light weight parts or a minimal amount of actuators is essential for walking robots. Another way of minimizing energy consumption is by developing robots according to living organisms found in nature. Because animals and insects evolve the best locomotion and survival behaviour, it is possible to mimic such methods for robots. In some other cases, special recharge stations are created for robots to get back to and to recharge their battery. This way robot is able to observe its own energy and return to recharge when needed. Finally, path planning methods are developed to obtain minimum energy consuming movement trajectories when robot has to cover large territory.

2. Formation of energy efficient locomotion methods

A hexapod walking robot that has 3 DOF on each leg is used in this research. This is the reason for using geometrical method to develop inverse kinematics for this robot (Fig. S2.1). However, to complete full imitational model, Denavit-Hartenberg method is also used and results are implemented into *MATLAB*[®] simulation program (Fig. S2.2).

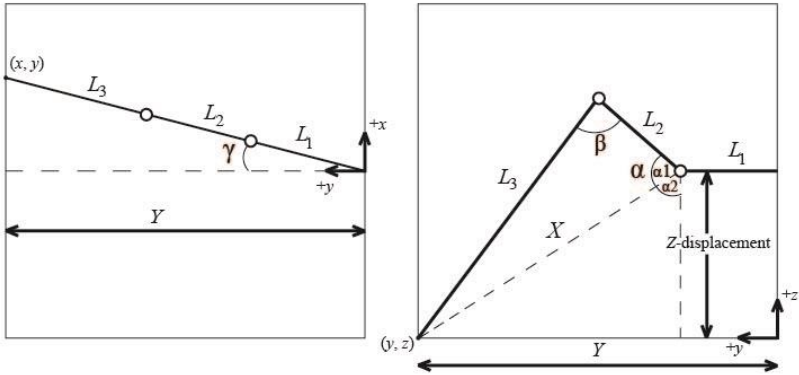


Fig. S2.1. Simplified trigonometric problem of a 3-DOF robotic leg

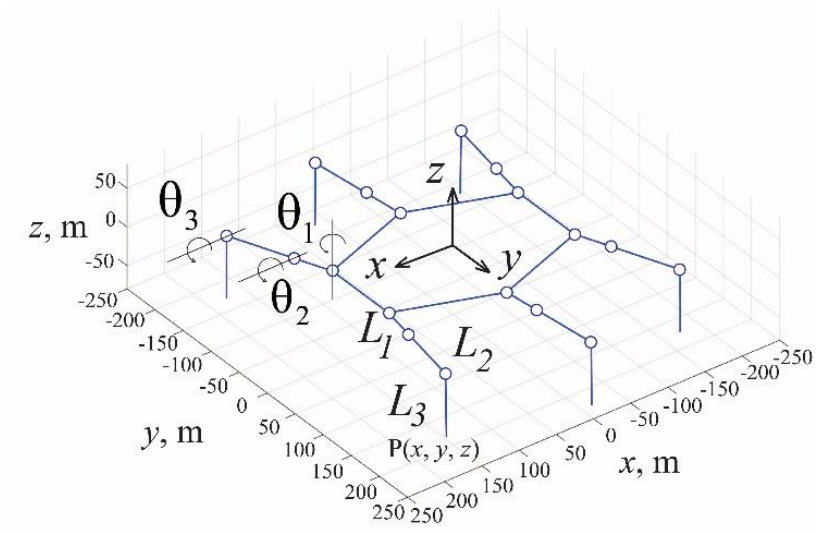


Fig. S2.2. Hexapod robot kinematic model inside *MATLAB*[®] program

Foot trajectory generation method is developed by splitting leg motion into separate coordinate time dependencies (Fig. S2.3):

$$x(t) = \begin{cases} -\cos(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T - 2 \cdot \varphi_i + 2 \cdot t - 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t \leq \varphi_i, \\ \cos(\varepsilon) \cdot l \cdot (T - \varphi_i), & \text{kai } \varphi_i < t \leq \varphi_i + 1, \\ \cos(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T + 2 \cdot \varphi_i - 2 \cdot t + 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t > \varphi_i + 1, \end{cases} \quad (S2.1)$$

$$y(t) = \begin{cases} -\sin(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T - 2 \cdot \varphi_i + 2 \cdot t - 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t \leq \varphi_i, \\ \sin(\varepsilon) \cdot (l \cdot (t - \varphi_i)), & \text{kai } \varphi_i < t \leq \varphi_i + 1, \\ \sin(\varepsilon) \cdot \left(\frac{l \cdot (T + 2 \cdot \varphi_i - 2 \cdot t + 1)}{2 \cdot (T - 1)} + \frac{l}{2} \right), & \text{kai } t > \varphi_i + 1, \end{cases} \quad (\text{S2.2})$$

$$z(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } t \leq \varphi_i, \\ h \cdot \sin((t - \varphi_i) \cdot \pi), & \text{kai } \varphi_i < t \leq \varphi_i + 1, \\ 0, & \text{kai } t > \varphi_i + 1. \end{cases} \quad (\text{S2.3})$$

Also, most common hexapod robot gaits used in this research are described: tripod gait, tetrapod gait, wave gait, and ripple gait.

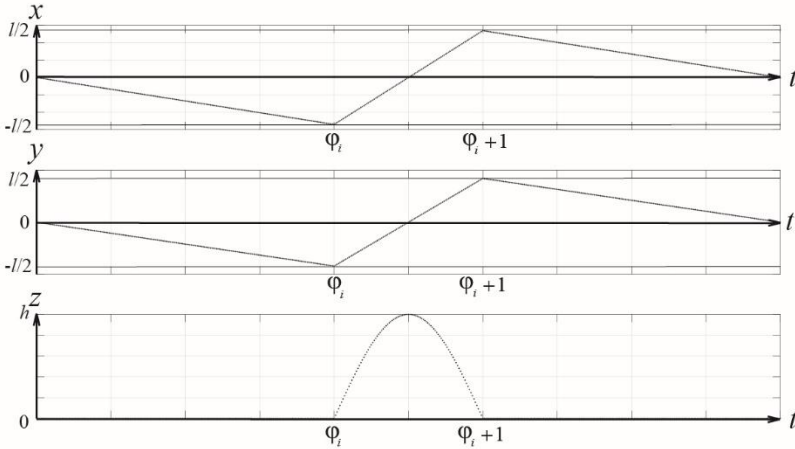


Fig. S2.3. Robot's foot trajectory separate coordinate dependence on time; φ_i – i -th leg's phase

Irregular terrain is compared to obstacles and the description for both are given. The obstacles are separated into two groups: important obstacles and unimportant obstacles, and are categorized by their length, height, and width. To understand the relation between obstacle sizes and the possibilities of the robot, obstacle sizes are classified into these categories: even terrain, small obstacles, average obstacles, and large obstacles. In addition, the terrain is also categorized by obstacle density and sizes. Four types of terrain complexities are used: small number of small obstacles, large number of small obstacles, small number of large obstacles, and large number of large obstacles.

To detect obstacles that are in front of the robot, tactile sensors are used on each of robot's leg, positioned on tibia part of the legs. Through out the development of sensors, three versions were tested until final solution was obtained that suited the robot

(Fig. S2.4). Tactile sensors were combined of push-button, soft plastic material, and silicon between robot foot and plastic to avoid getting stuck on obstacles. The advantage of this method is that the prior information about the obstacle positions is not needed. However, the size of obstacles is programmed directly into robot's control program.

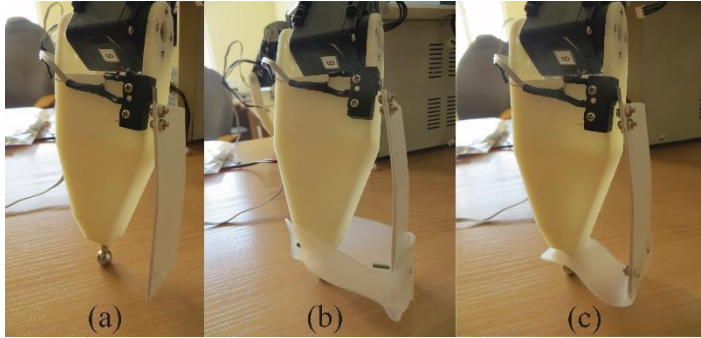


Fig. S2.4. Tactile robot leg sensors attached on leg front side: (a) primary version; (b) secondary version; (c) final version

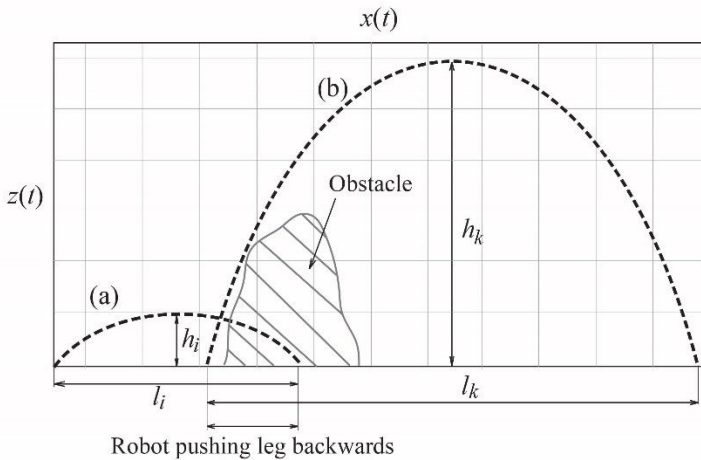


Fig. S2.5. Generating different foot trajectories: (a) for locomotion over even terrain; (b) for stepping over the obstacles

In this work, two different types of obstacle avoidance are used. The simple obstacle avoidance does not require energy consumption minimization, which is why robot only overcomes obstacles by moving legs over the obstacles (Fig. S2.5). The second method is a more complex version, because foot trajectory generation method is improved with leg motion in xy coordinate plane (Fig. S2.6).

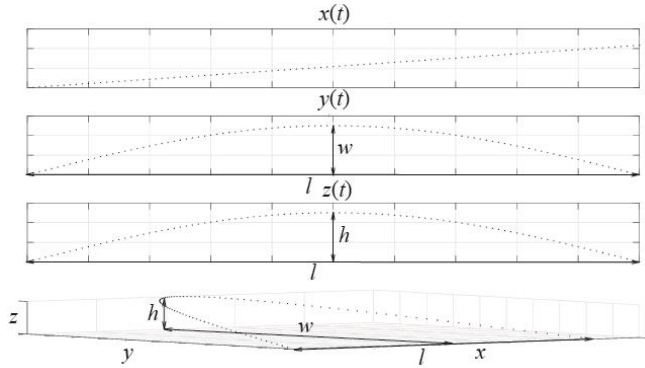


Fig. S2.6. Foot trajectory generation for energy efficient obstacle avoidance

In this work, it was chosen to measure electrical energy of the robot, because measuring the mechanical energy is much more difficult. Full energy of the hexapod robot is calculated using only energy consumed by robot legs, because control system consumes very low amount of energy:

$$E_c = \sum_{i=1}^6 E_{ki} . \quad (\text{S2.4})$$

Before implementing parameter selection, two separate cases of robot locomotion were described. First, robot's leg motions are not synchronized in time. Second, robot's leg motions are synchronized in time. The same parameter selection was used for both cases, but with different references. In first case, selection of minimum foot trajectory distance was used, because changing parameters were step height, and step width:

$$\arg \min_{w, h, l_k} (d_k) . \quad (\text{S2.5})$$

In second case, selection of only current consumption was used, because this was the only parameter that was changing:

$$\arg \min_{w, h} (I_k) . \quad (\text{S2.6})$$

Also, method for evaluating energy consumption dependence on obstacle sizes and density is developed to observe how energy consumption changes when obstacle density and height increases:

$$E_p = P_{vid} \cdot \left(S \cdot \frac{l}{v} + \bar{S} \cdot \left(\text{rand} \left(\frac{l}{v} \right) + \text{rand} \left(\frac{l}{v} \right) + \text{rand} \left(\frac{l}{v} \right) \right) \right) . \quad (\text{S2.7})$$

3. Research of hexapod robot energetic efficiency

First of all, hexapod robot movement speeds were determined with which robot consumes least amount of current. Movement speed was obtained by measuring time to cover the given distance. Current consumption was measured using current measuring circuit which was connected directly between power supply and robot's control system (mainly servo motor). To ensure more accurate and reliable results, hexapod robot power consumption was measured for three separate cases: without additional load, using 1.16 kg load, and using 2.9 kg load. Main results, showing that wave gait for slower movement, and tripod gait for faster movement should be used, are presented in Figure 3.1.

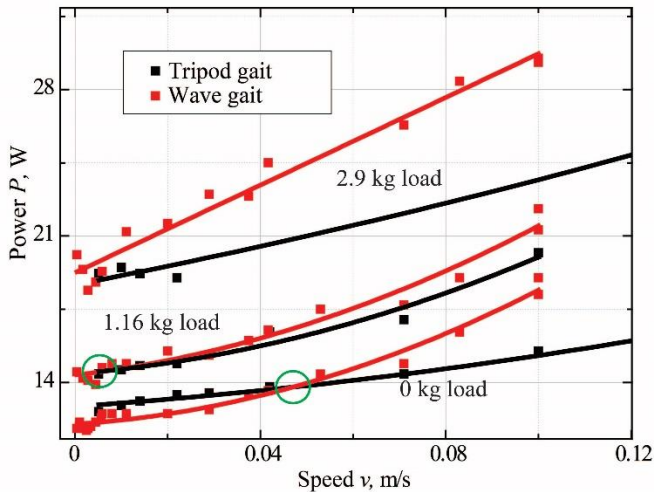


Fig. S3.1. Hexapod robot average power consumption dependence on tripod and wave gaits and speed at different loads

Using obtained information, hexapod robot gait switching algorithm was developed (Fig. S3.2). This algorithm indicates speeds, at which robot has to switch from wave gait to tripod gait in order to sustain minimum energy consumption. Algorithm was implemented directly into hexapod robot's control system and tested through series of experiments. Results are shown in Figure 3.3.

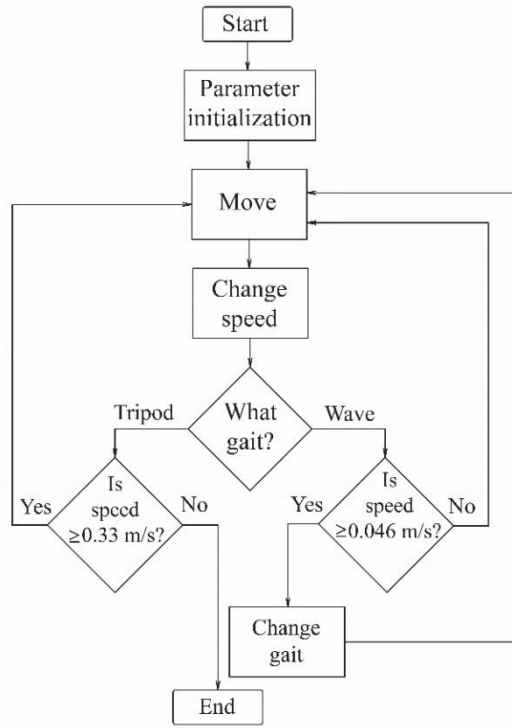


Fig. S3.2. Gait switching algorithm

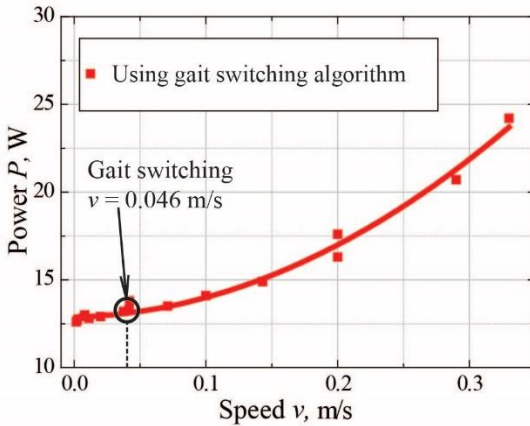


Fig. S3.3. Hexapod robot's average power consumption dependence on speed using gait switching algorithm

Following experiments were conducted using obstacle detection and avoidance method described in subsection 2.3.2. Due to being most energetically efficient, only wave gait and tripod gaits were used. In addition to using four types of terrains (subsection 2.2), two different distances were given for hexapod robot to travel: 1 m and 2 m. To be able to evaluate the efficiency of obstacle avoidance method, several experiments were performed without the method.

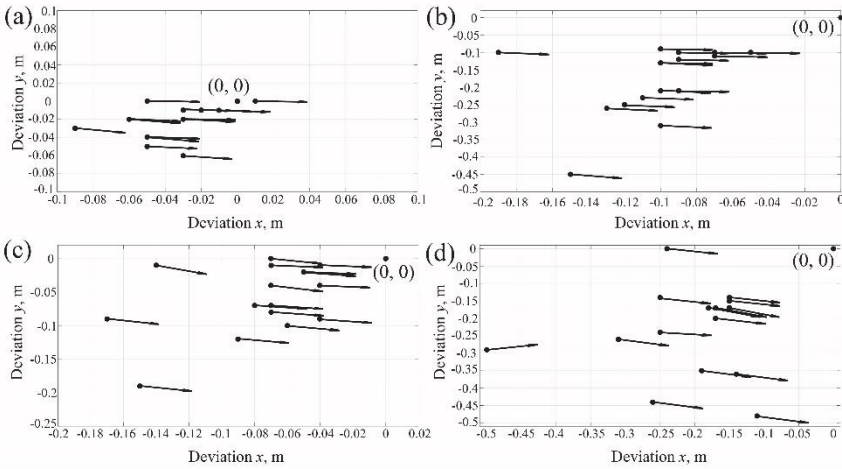


Fig. S3.4. Results of robot locomotion over obstacles using wave gait: (a) low density, 1 m distance; (b) low density, 2 m distance; (c) high density, 1 m distance; (d) high density, 2 m distance

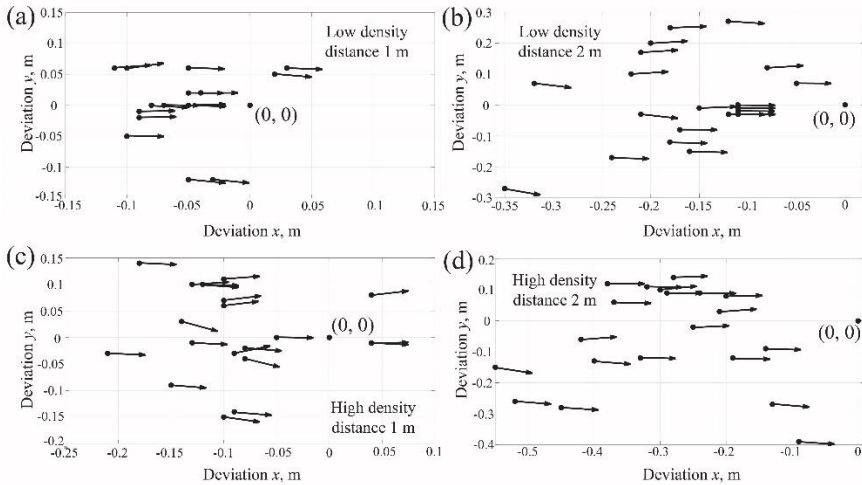


Fig. S3.5. Results of robot locomotion over obstacles using tripod gait: (a) low density, 1 m distance; (b) low density, 2 m distance; (c) high density, 1 m distance; (d) high density, 2 m distance

Efficiency of robot's locomotion over obstacles was obtained by measuring x and y coordinate deviations from straight path, as well as direction angle change (Fig. S3.4–S3.5). Results state that wave gait is the most efficient gait for traversing over various size obstacles not depending on density.

Energy consumption during locomotion over obstacles was investigated for two cases: robot leg motions are not synchronized in time, and leg motions are synchronized in time. All experiments, except current identification, were conducted in *MATLAB*[®] simulation program. Only tripod gait was used.

In first case, three different obstacle densities were used: low density (10 obstacles), average density (20 obstacles), and large density (30 obstacles). Results are presented in table 3.1. It is clear, that in case of robot leg motions are not synchronized in time, average efficiency of obstacle avoidance method using time independent gaits is 14.9 %.

Table S3.1. Average energy consumption of HexaV4 robot locomotion over different density terrains

Obstacle density	E, J	E_{opt}, J	$E-E_{opt}, J$	$\eta, \%$
Low density	1551	1348	203	13.1
Average density	1797	1507	290	16.1
High density	1851	1564	287	15.5

In second case, different current identification matrix was obtained for better precision, and only 10 obstacles were used during all experiments. Results shown in Table S3.2. Average efficiency of obstacle avoidance method when robot leg motions are synchronized in time is 3.3 %, which indicate that this method has very low energy efficiency.

Table S3.2. HexaV4 hexapod robot energy consumption when robot leg motions are synchronized in time. Imitational experiments

Measurement	E, J	E_{opt}, J	$E-E_{opt}, J$	$\eta, \%$
1	583	564	19	3.4
2	589	566	23	4.1
3	578	563	15	2.7
4	587	563	24	4.3
5	581	564	17	3
6	586	565	21	3.7
7	574	565	9	1.6
8	582	563	19	3.4
9	578	564	14	2.5
10	585	563	22	3.9
Average values	582	564	18	3.3

To validate the results of obstacle avoidance method, experiments with real hexapod robot were performed. However, because obstacles had to be positioned in line with robot's legs, body of the robot was changed to rectangular shape. For better stability and straight robot motion, wave gait was used, and only 3 obstacles on each side

were positioned (total 6 obstacles). It is clear from obtained results (Table S3.3), that obstacle avoidance method has indeed very low energetic efficiency, because average efficiency using real robot is 2.4 %, which is very similar to imitational experiment results.

Table S3.3. HexaV4 hexapod robot energy consumption when robot leg motions are synchronized in time. Experiments with real hexapod robot

Measuring number	E_{vid} , J	E_{vid_opt} , J	$E_{vid}-E_{vid_opt}$, J	η , %
1	14.71	14.44	0.27	1.9
2	14.6	14.27	0.33	2.3
3	14.7	14.27	0.43	3

During previous experiments it was concluded, that energy consumption depends on obstacle sizes and density. However, it was not completely clear, which of these parameters has more influence. In this section, energy consumption dependence on obstacle sizes and density is described.

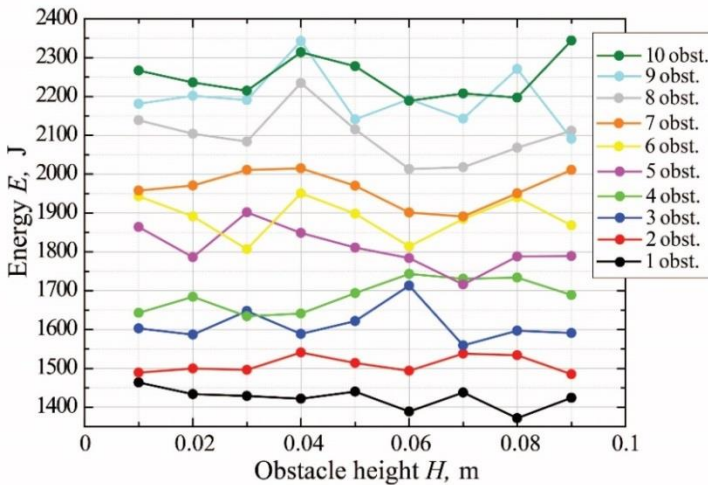


Fig. S3.6. Energy consumption dependence on obstacle height with different number of obstacles along robot’s path

Because energy consumption is not dependent on step width, obstacle avoidance was performed only by transferring legs over the obstacles. This was also the reason for measuring new current identification, but only to obtain current dependence on step height. Also, reference measurements were performed. During these tests, no obstacles were used, but different travel distances were given for robot to cover (1–4 m). Final energy consumption dependence on obstacle sizes and density are presented in figure 3.6. It is obvious that obstacle height has very low influence on energy consumption, but is strongly influenced by obstacle density. It costs the same amount of

energy to travel 1 m with 10 obstacles in the path or to travel 2 m distance without obstacles.

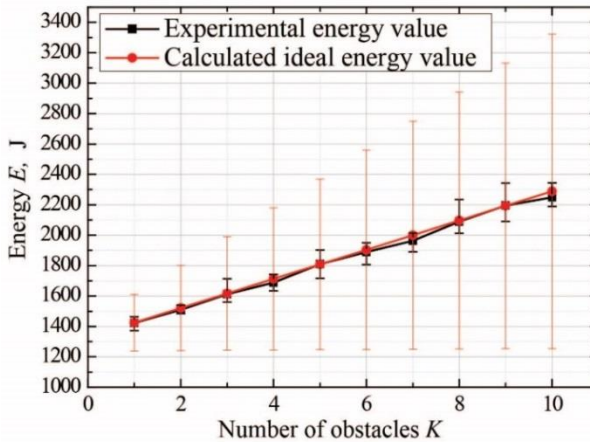


Fig. S3.7. Energy consumption dependence on obstacle density. Red deviation lines represent minimum and maximum possible energy values

After all experiments were conducted, all energy consumption values were recalculated into average values, because energy consumption is almost not dependent on obstacle height. Also, theoretical energy consumption values were calculated to evaluate all possibilities (Fig. S3.7). It was concluded from figure 3.7, that theoretically it is possible for robot to always use minimum amount of energy.

General conclusions

1. After performing analysis of mobile robots it was concluded, that the main advantage of walking robots is their ability to traverse irregular terrains and to adapt to various environments. It was also concluded, that the biggest disadvantage of walking robots, compared to wheeled robots, is high energy consumption, which appears due to large number of actuators or inefficient control methods.
2. Imitational model of hexapod robot was developed with possibility to calculate energy consumption. Current consumption results were obtained during experimental research. This model is universal and can be used to perform robot locomotion and energy consumption experiments. Imitational model allows conducting more experiments, which increases the efficiency of research.
3. Walking robot's energy consumption is dependent on gait and movement speed. Up to 7.7 % lower energy consumption can be obtained using wave gait instead of tripod gait at lower speeds (0.184 body lengths/s or lower), and up to 21 % lower energy consumption can be obtained using tripod gait instead of wave gait at higher

speeds (0.184 body lengths/s or higher). Lowest cost of transport value – 5.75 was obtained when hexapod robot was walking using tripod gait at highest speed, which is 1.32 body lengths/s

4. Developed obstacle detection and avoidance method can be used for walking robots. Without using obstacle avoidance method average deviations from given trajectory can reach up to 24 % travelling 1 m distance, while using obstacle avoidance method, average deviations from given trajectory can be minimized down to 12 % not depending on travel distance. Smallest deviations can be obtained by using wave gait while travelling on terrain with lower amount of obstacles.

5. Energy consumption is dependent on obstacle size only when robot leg motions are not synchronized in time. In this case up to 14.9 % lower energy consumption can be obtained by selecting shorter foot trajectory length. If robot's leg motions are synchronized in time, only about 3.3 % lower energy consumption can be obtained. In this case, robot's energy consumption is highly influenced by the number of obstacles along the robot's path. It was concluded that every additional obstacle along one meter of robot's path, not depending on the size of the obstacles, increases robots energy consumption by 7 %.

Priedai³

- A priedas.** Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija
- B priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje
- C priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Mindaugas LUNECKAS

ŠEŠIAKOJO ROBOTO JUDĖJIMO ENERGETINIO
EFEKTYVUMO TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

INVESTIGATION OF ENERGY EFFICIENCY OF
HEXAPOD ROBOT LOCOMOTION

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2018 04 17. 11,75 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius