

ŠEŠIAKOJO ROBOTO ENERGIJOS ŠANAUDŲ PRIKLAUSOMYBĖS NUO SKIRTINGŲ EISENŲ IR GREIČIO JUDANT LYGIU PAVIRŠIUMI TYRIMAS

Mindaugas Luneckas¹, Tomas Luneckas²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹mindaugas.luneckas@vgtu.lt; ²tomas.luneckas@vgtu.lt

Santrauka. Nežinant šešiakojo vaikščiojančio roboto energijos sąnaudų judant lygiu paviršiumi, yra sudėtinga įvertinti sąnaudas judant nelygiu paviršiumi bei parinkti taupiausias eiseną ir judėjimo greitį. Darbo tikslas yra išmatuoti suvartojamą energijos kiekį judant skirtingomis eisenomis ir parinkti greičius, kai tikslinga keisti eiseną. Tiriamos trys pagrindinės šešiakojų robotų eisenos: trikojė, dvikojė ir banguojanti. Rezultatai akivaizdžiai rodo, kad, esant mažiems greičiams, mažiausiai energijos robotas suvartoja judėdamas banguojančia eiseną. Didėjant greičiui, mažiau energijos suvartojama judant dvikoje eiseną, o dar padidėjus – judant trikoje eiseną.

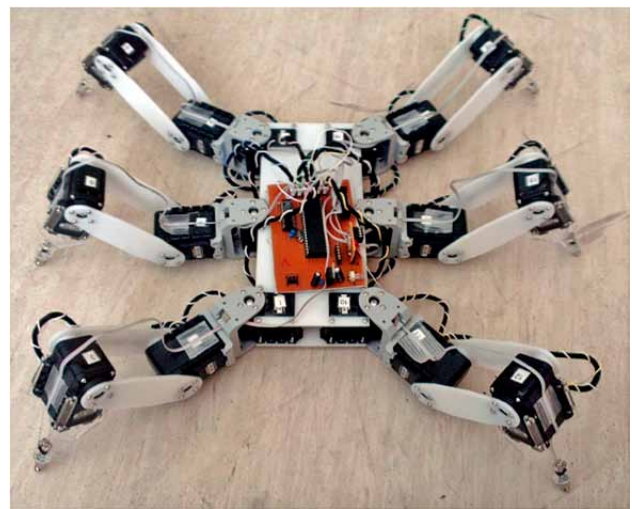
Reikšminiai žodžiai: šešiakojis robotas, energijos sąnaudos.

Įvadas

Šešiakojų vaikščiojančių robotų gebėjimas judėti nelygiu paviršiumi skatina jų tyrimus (Pongas *et al.* 2007). Taip pat svarbus jų privalumas yra galimybė judėti skirtingomis eisenomis. Tokios šių robotų savybės leidžia juos plačiai taikyti požeminėje kalnakasyboje, sprogmenims deaktivuoti (Jin *et al.* 2011), katastrofų ir radioaktyvioms vietovėms tirti (Belter *et al.* 2010), kitų planetų paviršiams tirti (Hoffman, Krotkov 1989), kroviniams gabenti (Buchli *et al.* 2009). Trūkumai daugiausiai pasireiškia didelėmis energijos sąnaudomis, nes robotas turi nešti visą savo korpuso ir variklių svorį (Shekhar, Pratihari 2011), todėl valdymo algoritmai gali būti tobulinami siekiant sumažinti šias sąnaudas.

Iki šiol ištirta labai nedaug šešiakojų vaikščiojančių robotų energijos sąnaudų. Vienas tokių tyrimų metodų yra suskaičiuoti visų roboto jungiamųjų dalių momentus robotui judant (Jin *et al.* 2011). Metodo esmė yra žinoti tikslus kiekvienos kojos momentus ir valdyti judesius taip, kad energijos sąnaudos būtų mažiausios. Deja, roboto modelis, naudotas eksperimento metu, neatitiko realaus šešiakojo vabzdžio, o, lyginant su visais keturkojais gyvūnais, gauti rezultatai parodė, kad energijos sąnaudos yra kur kas didesnės, nei turėtų būti.

Kitas energijos sąnaudų tyrimas susijęs tik su roboto atliekamu posūkiu (Shekhar, Pratihari 2011). Šio eksperimento rezultatai parodė, kad robotas mažiausiai energijos vartoja posūkį atlikdamas banguojančia eiseną, o dau-



1 pav. Tyrimams naudotas šešiakojis robotas
Fig. 1. Hexapod robot used in the experiments

giausiai – trikoje eiseną. Eksperimento metu taip pat buvo nustatyta, kad didesni greičiai ir mažesnis laikančiųjų kojų skaičius reikalauja didesnių energijos sąnaudų.

Problemos formulavimas

Ankstesniame darbe (Luneckas *et al.* 2013) buvo nagrinėjama šešiakojo vaikščiojančio roboto energijos sąnaudų priklausomybė nuo kojų skaičiaus ant paviršiaus. Toks

eksperimentas padėjo nustatyti, kad energijos sąnaudos labai priklauso nuo roboto svorio, tenkančio kiekvienai ant paviršiaus pastatyti kojai.

Norint tinkamai parinkti šešiakojo roboto eiseną ir greitį, vien informacijos apie energijos sąnaudas, kai robotas yra stacionarios būsenos, neužtenka. Tai galima pasiekti nagrinėjant energijos sąnaudų priklausomybę nuo skirtingų eisenų, robotui judant įvairiais greičiais. Buvo nustatyta, kad, norėdami suvartoti mažiau energijos, keturkojai gyvūnai eisenas keičia pasiekę tam tikrą ribinį greitį (Kar *et al.* 2003).

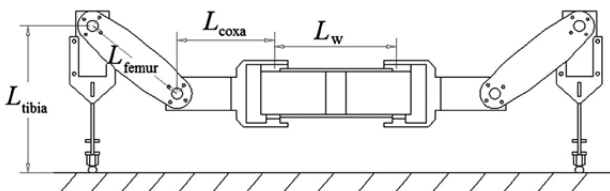
Darbo tikslas yra patikrinti, ar šešiakojams robotams galioja ta pati energijos sąnaudų priklausomybė nuo greičio, kaip ir gyvūnams. Norima įsitikinti, ar galima tinkamai parinkti eiseną ir sumažinti energijos sąnaudas judant lygiu paviršiumi.

Darbo metu tiriamos trys pagrindinės šešiakojų robotų eisenos: trikojė, dvikojė ir banguojanti. Energijos sąnaudos išmatuotos esant šiems greičiams: trikojei eisenai: nuo 0,02 m/s iki 0,11 m/s; dvikojei eisenai: nuo 0,02 m/s iki 0,07 m/s; banguojančiai eisenai: nuo 0,02 m/s iki 0,06 m/s.

Roboto modelis

Matuojant energijos sąnaudas, svarbu nusakyti roboto dydį, kad būtų lengviau įvertinti dydžio ir suvartojamos energijos santykį.

Darbe taikomas šešiakojo roboto modelis pavaizduotas 2 pav.



2 pav. Šešiakojo roboto modelis. Vaizdas iš priekio

Fig. 2. Hexapod robot model. Frontview

Šio roboto parametrai yra tokie:

- roboto pagrindinio korpuso masė $M_{\text{korpuso}} = 60$ g;
- baterijos masė $M_{\text{baterijos}} = 92$ g;
- variklio masė $M_{\text{servo}} = 55$ g;
- kojos blauzdos dalies masė $M_{\text{tibia}} = 10$ g;
- kojos šlaunies dalies masė $M_{\text{femur}} = 12$ g;
- kojos klubo dalies masė $M_{\text{coxa}} = 12$ g;
- kojos blauzdos dalies ilgis $L_{\text{tibia}} = 105$ mm;
- kojos šlaunies dalies ilgis $L_{\text{femur}} = 80$ mm;
- kojos klubo dalies ilgis $L_{\text{coxa}} = 68$ mm;
- pagrindinio korpuso plotis $L_w = 800$ mm.

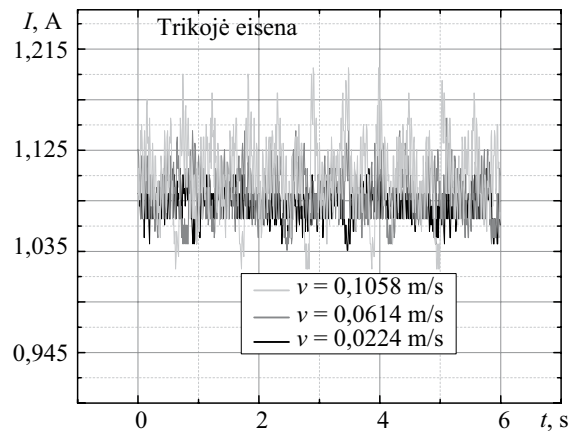
Srovės matavimas

Siekiant nustatyti roboto suvartojamos energijos kiekį, tyrimo metu buvo matuojama vykdyklių srovė, nes ji yra proporcinga galiai. Roboto judėjimas lygiu paviršiumi stebėtas einant skirtingais greičiais, pateiktais 1 lentelėje.

1 lentelė. Roboto greičiai, kuriems esant buvo matuojamos energijos sąnaudos

Table 1. Energy consumption measured at different speeds of the robot

	Trikojė eiseną	Dvikojė eiseną	Banguojanti eiseną
v, m/s	0,0224	0,0214	0,0162
	0,0422	0,0294	0,0212
	0,0614	0,0378	0,0254
	0,0788	0,0504	0,0286
	0,1058	0,0708	0,0488
		0,0744	0,06



3 pav. Trikojės eisenos srovės laikinė diagrama

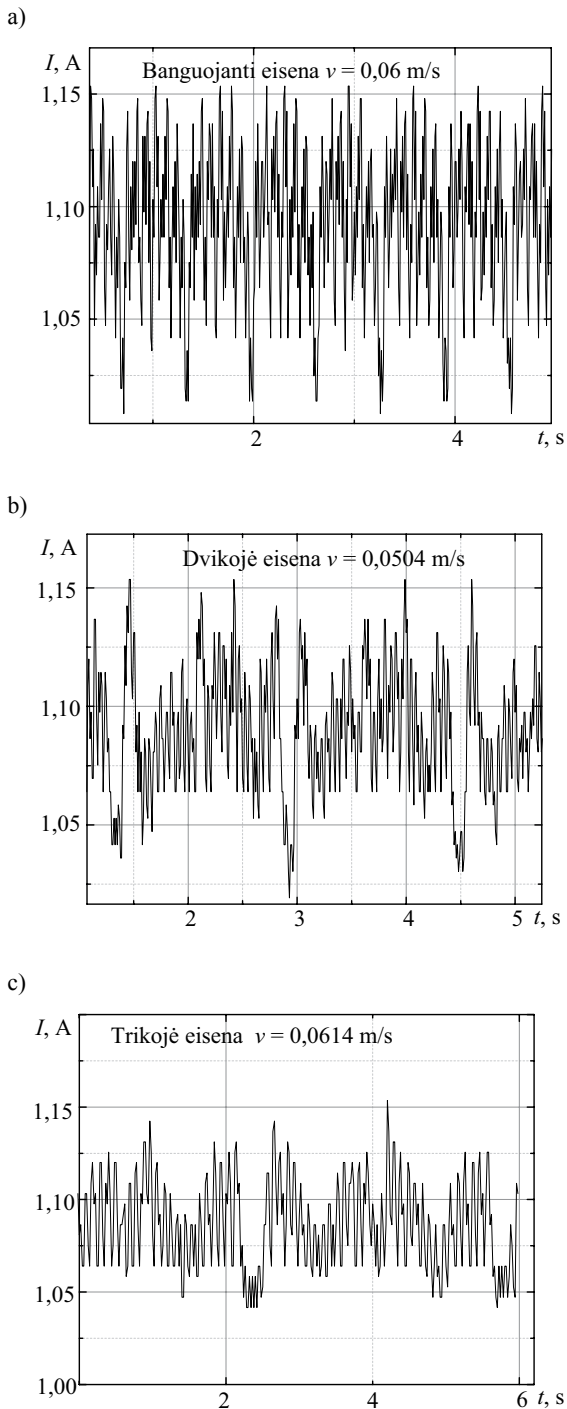
Fig. 3. The current flow time diagram for tripod gait

Išmatuotos srovės laikinės diagramos pavyzdys pateiktas 3 pav. Iš diagramos sunku tiesiogiai įvardyti suvartojamos srovės priklausomybę nuo greičio, nes didėjant greičiui didėja srovės pokyčių amplitudė ir vidurkis. Tačiau kreivėse galima išvelgti tam tikrą periodiškumą. Siekiant geriau nustatyti šiuos periodus, tikslingiau yra parinkti kitą mastelį (4 pav.).

Akivaizdu, kad, keičiantis šešiakojo roboto eisenai, keičiasi ir žingsnio trukmė. Taip yra dėl to, kad visos eisenos tarpusavyje skiriasi perstatomų kojų skaičiumi.

Mažėjant perkeliamų kojų skaičiui, didėja eisenos periodas. Tai labai gerai matyti 4 pav. Dėmesį reikia atkreipti į srovės viršūnių skaičių, nes kiekviena viršūnė atitinka kojų perkėlimą. Banguojančios eisenos metu yra perkeliama tik viena koja vienu metu, todėl eisenos periodą nusako šešios

viršūnės. Dvikojės eisenos metu yra perkeliamos dvi kojos vienu metu, todėl periodą nusako trys viršūnės. Esant trikojei eisenai perkeliamos trys kojos vienu metu, todėl periodą nusako dvi viršūnės. Taigi ilgiausiai ir trumpiausiai truncančios eisenos atitinkamai yra banguojanti ir trikojė.



4 pav. Srovės laikinės diagramos padidintu masteliu:
a – banguojančios eisenos; b – dvikojės eisenos;
c – trikojės eisenos

Fig. 4. Current flow time diagram in larger scale:
a – wave gait; b – bipod gait; c – tripod gait

Energijos skaičiavimas

Tiriant roboto energijos sąnaudas, vien srovės matavimų neužtenka, nes reikia žinoti, kiek energijos suvarto robotas eidamas tam tikrą atstumą ar atlikdamas nurodytą darbą.

Suvartojama energija buvo skaičiuojama pagal šią išraišką:

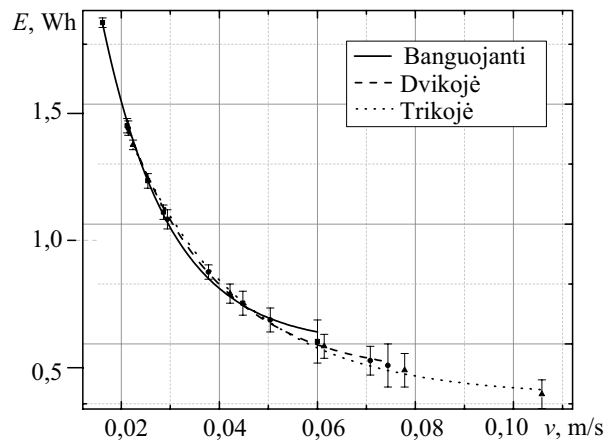
$$E = \frac{U \cdot I \cdot L}{v}, \quad (1)$$

čia U – vykdyklių įtampa; I – vidutinė suvartojamos srovės vertė; L – nueito kelio ilgis; v – ėjimo greitis.

Buvo pasirinkta, kad nueitas kelias L yra lygus 10 m.

Taip pat apskaičiuotos energijos verčių standartinės nuokrypos:

$$s_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}. \quad (2)$$



5 pav. Šešiakojo roboto skirtingų eisenų suvartojamos energijos kiekio priklausomybė nuo greičio

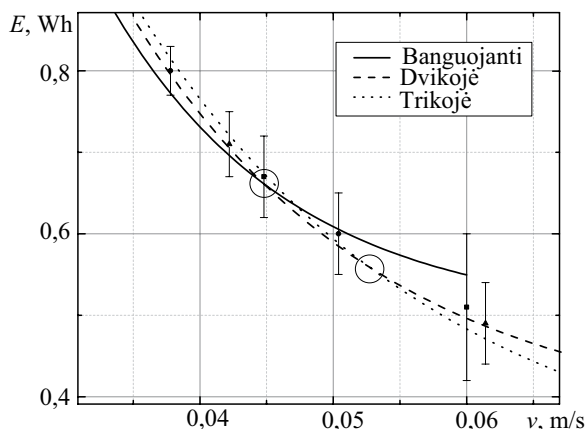
Fig. 5. Hexapod robot energy consumption dependence on different speeds

Gauti roboto skirtingų eisenų suvartojamos energijos kiekio priklausomybės nuo judėjimo greičio rezultatai pavaizduoti 5 pav.

Akivaizdu, kad, didėjant greičiui, energijos sąnaudos mažėja. Tai rodo, kad judėti mažesniais greičiais yra neefektyvu, nes suvartojamas daug didesnis energijos kiekis. Taip pat matyti, kad atskirų eisenų suvartojamas energijos kiekis skiriasi labai nedaug. Todėl, siekiant tiksliau įvertinti šį skirtumą, buvo pakeistas mastelis (6 pav.).

Matyti, kad keičiantis greičiui skirtingų eisenų suvartojamo energijos kiekio kreivės susikerta. Tokie susikirtimo taškai yra labai svarbūs ir 6 pav. pavaizduoti juodais apskritimais. Šie taškai vaizduoja momentus, kai robotas turi keisti eiseną tam, kad energijos suvartojimas būtų mažiausias.

Naudojantis 6 pav. duomenimis buvo nustatyti tikslūs greičiai, kuriems esant tikslinga keisti eiseną. Mažiausiai energijos, esant mažiems greičiams (0,045 m/s ir mažiau), vartoja robotas, kurio eiseną banguojanti. Didėjant greičiams mažiau energijos vartoja robotas, kurio eiseną dvikojė, o esant greičiams, didesniems nei 0,053 m/s, mažiausiai energijos vartoja robotas, kurio eiseną trikojė.



6 pav. Šešiakojo roboto, einančio skirtingomis eisenomis, suvartojamos energijos kiekio priklausomybė nuo greičio didesniu masteliu. Juodais apskritimais pavaizduoti eisenų keitimo taškai

Fig. 6. Hexapod robot energy consumption dependence on different speeds in larger scale. Black circles represent points of gait changes

Išvados

1. Taikant vien šešiakojo roboto srovės laikines diagramas, negalima vienareikšmiškai įvertinti roboto energijos vartojimo efektyvumo, nes nėra aišku, kiek energijos robotas suvartos nueidamas tam tikrą atstumą. Tačiau iš srovės laikinių diagramų gautą informaciją galima įvertinti formuojant kojų perkėlimo trajektoriją.
2. Iš gautų suvartojamos energijos kiekio priklausomybės nuo greičio kreivių nustatyta, kad kai greitis yra mažesnis nei 0,045 m/s, robotui geriausia judėti banguojančia eiseną, nes yra suvartojamas mažiausias energijos kiekis. Kai greitis yra 0,045 m/s arba didesnis, eiseną reikia keisti į dvikoję. Greičiui pasiekus 0,053 m/s vertę, eiseną reikia keisti į trikojė.

Ateities planai

Šio darbo metu šešiakojo roboto suvartojamos energijos kiekis buvo matuojamas tik esant 0,0162–0,1058 m/s greičiui ir tik ant lygaus paviršiaus. Ateityje planuojama patikrinti suvartojamą energijos kiekį daug platesniame greičių

intervale. Taip pat eksperimentuoti planuojama ant nelygaus paviršiaus, siekiant įvertinti roboto, einančio skirtingomis eisenomis, suvartojamos energijos kiekio priklausomybę nuo paviršiaus nelygumo.

Literatūra

- Belter, D.; Labecki, P.; Skrzypczynski, P. 2010. Map-based adaptive foothold planning for unstructured terrain walking, in *Proceedings of 2010 IEEE Intl.*, 3–8 May, 2010, Alaska, 5256–5261.
- Buchli, J.; Kalakrishnan, M.; Mistry, M.; Pastor, P.; Schaal, S. 2009. Compliant quadruped locomotion over rough terrain, *Intelligent Robots and Systems*, 10–15 October, 2009, St. Louis, 814–820.
- Hoffman, R.; Krotkov, E. 1989. Terrain roughness measurement from elevation maps, *SPIE Mobile Robots IV* 1195: 104–114. <http://dx.doi.org/10.1117/12.969874>
- Jin, B.; Chen, C.; Li, W. 2011. Power consumption optimization for a hexapod walking robot, *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 8(4): 65–15. <http://dx.doi.org/10.5772/45687>
- Kar, D. C.; Kurien, K. I.; Jayarajan, K. 2003. Gaits and energetics in terrestrial legged locomotion, *Mechanism and Machine Theory* 38(4): 355–366. [http://dx.doi.org/10.1016/S0094-114X\(02\)00124-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0094-114X(02)00124-6)
- Luneckas, M.; Luneckas, T.; Udris, D. 2013. Hexapod walking robot energy consumption dependence on the number of legs set on the surface, *Electrical and Control Technologies ECT-2013*, 2–3 May, 2013, Kaunas, Lithuania, 25–28.
- Pongas, D.; Mistry, M.; Schaal, S. 2007. A robust quadruped walking gait for traversing rough terrain, *Robotics and Automation*, 10–14 April, 2007, Roma, 1474–1479.
- Shekhar, S. R.; Pratihari, D. K. 2011. Effects of turning gait parameters on energy consumption and stability of a six-legged walking robot, *Robotics and Autonomous Systems* 60: 72–78.

HEXAPOD WALKING ROBOT ENERGY CONSUMPTION DEPENDENCE ON DIFFERENT GAITS AND SPEED WHILE MOVING ON EVEN TERRAIN

M. Luneckas, T. Luneckas

Abstract

Evaluation of robotic energetics while moving on rough terrain becomes a difficult task without having the information about the movement on even terrain. The problem appears in selection of gaits depending on how much power robot consumes. In this paper, energy consumption of a hexapod walking robot dependence on different gaits and speed is observed. Three most common gaits were used in this experiment: tripod gait, bipod gait and wave gait. Results clearly show that while moving at slow speed, the least energy is consumed by wave gait. As the speed increases, bipod gait selection is required to lower energy consumption. Finally, tripod gait must be selected at even higher speed.

Keywords: hexapod robot, energy consumption.