

## Sistemų inžinerija, kompiuterių technologija T 120

### ŠEŠIAKOJO ROBOTO EISENOS TYRIMAS

Tomas Luneckas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas  
El. paštas: tomas.luneckas@gmail.com

**Santrauka.** Nagrinėjamas šešiakojo roboto žingsniavimas tiesiai, lygiu paviršiumi. Aptariamas kiekvienos kojos judesio formavimas, taikant jos judesiui parinktos formos trajektoriją. Nurodomas trajektorijos formos aprašymo metodas. Sudaroma roboto žingsniavimo, taikant trikoję eiseną, veiksmų diagrama. Trumpai aprašomas kiekvienas žingsniavimo etapas. Apskaičiuojami variklių posūkio kampai taikant geometrinį atvirkštinės kinematikos metodą. Apibrėžiami roboto variklių valdymo kriterijai, kurie užtikrintų reikiamą roboto judesių valdymo laisvumą bei lankstumą. Aptariami skirtingi variklių valdymo metodai. Atlikus roboto ėjimo tyrimą, taikant skirtingus variklių valdymo metodus, koreguojamas eisenos generavimas ir parenkamas valdymo metodas, atitinkantis apsibrėžtus variklių valdymo kriterijus.

**Reikšminiai žodžiai:** šešiakojis robotas, trikoję eiseną, kojos trajektorija, atvirkštinė kinematika, servomechanizmas.

#### Ivadas

Šešiakojai robotai yra patys stabiliausi einant nelygiu paviršiumi (Luneckas 2006). Jie gali eiti skirtingomis eisenomis ir taip lengviau adaptuotis prie paviršiaus nevienodumo (Jianhua 2006).

Šešiakojo roboto eiseną reikalauja visų šešių kojų judesių koordinavimo vienu metu (Parker *et al.* 2003). Visų kojų judesių sinchronizavimas yra ypač svarbus, nes gali susidaryti nepageidautinos roboto būsenos (Inagaki *et al.* 1996).

Norint generuoti šešiakojo roboto eiseną yra svarbu pirmiausia generuoti reikiamą judesį kiekvienai kojai atskirai. Tuo tikslu turi būti aprašytas kojos atliekamas judesys. Tuomet visų kojų judesiai yra sinchronizuojami taip, kad būtų suformuotas roboto judėjimas.

Šiame straipsnyje yra aprašomas metodas, kaip gali būti sudaromas kiekvienos kojos judesys, formuojant reikiamos formos trajektoriją. Sprendžiamas atvirkštinės kinematikos uždavinys vienai kojai geometrinio metodu. Gaunamos servomechanizmų posūkio kampų išraiškos, priklausomos nuo pėdos padėties erdvėje. Suformuluojami variklių valdymo kriterijai, užtikrinantys sklandų bei lankstų roboto valdymą. Aptariami skirtingi galimi variklių valdymo metodai.

#### Vienos kojos žingsnio trajektorijos formavimas

Kiekviena koja turi atlikti tam tikrą judesį, kuris sinchroniškai su kitų kojų judesiais sudarytų roboto eiseną. Kiekvienos kojos judesys gali būti formuojamas pritaikant jos judesiui reikiamos formos trajektoriją.

Trajektorijos forma gali būti laisvai pasirenkama ar priklausyti nuo roboto užduoties. Tinkama kojos trajektorija ėjimui lygiu paviršiumi gali netikti ėjimui nelygiu paviršiumi ir atvirkščiai. Pavyzdžiui einant nelygiu paviršiumi pageitautina, kad kojos būtų iškeliamos aukščiau, tuo užtikrinant geresnį praeinamumą, tuo tarpu einant lygiu paviršiumi, toks kojų kilnojimas nebus optimalus.

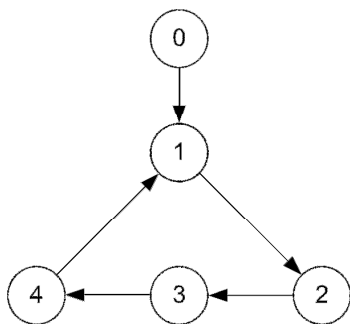
Roboto kojos judėjimui pagal užduotą trajektoriją svarbu išskirti trajektorijos taškus, kuriuose nuosekliai bus statoma koja. Taškų skaičius įtakos trajektorijos atkartojimo tikslumą. Kuo daugiau taškų, tuo tiksliau bus atkartojama trajektorija. Kiekvieną tašką aprašo trys koordinatės  $x_n, y_n, z_n$ , kurios nurodo jo padėtį erdvėje. Taigi, roboto pėdos trajektorijos formą galima paprastai aprašyti aibe taškų koordinatėmis (Luneckas *et al.* 2009).

#### Trikojės eisenos formavimas

Trikojė eiseną paremta dviejų trikojų, sudarančių trikampio formą, perstatymu (Parker *et al.* 2003). Pirmą trikoję sudaro kairės priekinė ir galinė, dešinės vidurinė kojos (KP, KG, DV), o antrą trikoję – dešinės priekinė ir galinė, kairės vidurinė kojos (DP, DG, KV).

Trikojės eisenos vienas žingsnis gali būti atliktas per keturis etapus (žr. 1 pav., 0 – neutrali roboto būseną):

1. Pirmasis trikojis pakeliamas ir perstumiamas pirmyn, antrasis trikojis yra neutralioje padėtyje.
2. Pirmasis trikojis pastatomas ant paviršiaus, antrasis trikojis yra neutralioje padėtyje.
3. Pirmasis trikojis atstatomas į neutralią padėtį, antrasis trikojis pakeliamas viršun ir perstumiamas pirmyn.
4. Antrasis trikojis pastatomas ant paviršiaus.



1 pav. Trikojės eisenos būsenų diagrama

Fig. 1. State diagram for tripod gait

Šis ciklas kartojamas tiek kartų, kiek reikia eiti pirmyn. Roboto perstūmimas į naują poziciją vyksta 3-ajame etape ir pereinant nuo 4-ojo į 1-ąjį etapą.

### Atvirkštinės kinematikos uždavinys vienai kojai

Žinant reikiamą pėdos padėtį erdvėje, reikia rasti jos servomechanizmų posūkio kampus, kad pėda atsidurtų tame reikiamame taške. Šie posūkio kampai randami išsprendus atvirkštinės kinematikos uždavinį vienai kojai.

Sprendžiant atvirkštinės kinematikos uždavinį geometrinu metodu (Hooper 2009), yra sudaromos kojos projekcijos į  $xy$  ir  $xz$  plokštumas (žr. 2 pav.), čia:  $\theta_1$  – šlaunies (angl. *femur*) servomechanizmo posūkio kampas;  $\theta_2$  – alkūnės (angl. *tibia*) servomechanizmo posūkio kampas;  $\theta_3$  – klubo (angl. *coxa*) servomechanizmo posūkio kampas;  $q_1$  – kampas tarp  $x$  ašies ir menamosios linijos  $B$ ;  $q_2$  – kampas tarp menamosios linijos  $B$  ir šlaunies;  $B$  – menamoji linija, jungianti šlaunies pradžią su blauzdos pabaiga;  $l_1$  – šlaunies ilgis;  $l_2$  – blauzdos ilgis;  $l_3$  – atstumas tarp klubo ir šlaunies ašies;  $l_4$  –  $B$  projekcija į  $xy$  plokštumą.

Pagal Pitagoro teoremą randamas  $l_4$  ilgis:

$$l_4 = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (1)$$

Klubo servomechanizmo posūkio kampas randamas:

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{y}{l_4 + l_3}\right). \quad (2)$$

Menamosios linijos  $B$  ilgis randamas taip:

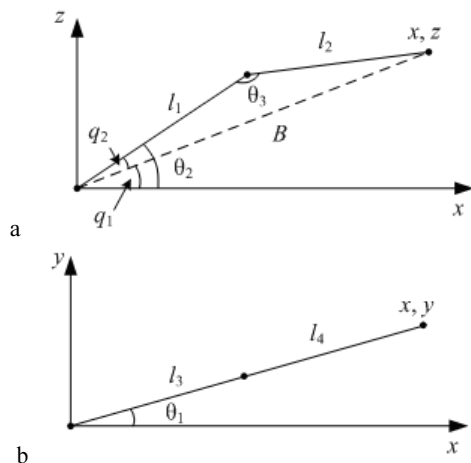
$$B = \sqrt{l_4^2 + z^2}. \quad (3)$$

Randami pagalbiniai kampai  $q_1$

$$q_1 = \arctan\left(\frac{z}{x}\right), \quad (4)$$

ir  $q_2$  (taikant kosinusų teoremą)

$$q_2 = \arccos\left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + B^2}{2 \cdot l_1 \cdot B}\right). \quad (5)$$



2 pav. Kojos projekcija į  $xz$  (a) ir  $xy$  (b) plokštumas

Fig. 2. Leg projection to  $xz$  (a) and  $xy$  (b) planes

Šlaunies servomechanizmo posūkio kampas lygus  $q_1$  ir  $q_2$  kampų sumai, t. y.,  $\theta_1 = q_1 + q_2$ .

Alkūnės servomechanizmo posūkio kampas randamas remiantis kosinusų teorema:

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - B^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2}\right). \quad (6)$$

### Variklių valdymo kriterijai

Roboto vykdykliais yra Futaba firmos servomechanizmai S3151. Jie yra valdomi impulsų trukmės moduliacija (angl. *Pulse Position Modulation*). Nuo impulso trukmės priklauso servomechanizmo padėtis. 1,5 ms trukmės impulsai atitinka neutralią servomechanizmo padėtį, 1 ms – 45° posūkį pagal laikrodžio rodyklę, 2 ms – 45° posūkį prieš laikrodžio rodyklę. Impulsai varikliams turi būti siunčiami 50 Hz dažniu.

Formuojant roboto kojų judesių trajektorijas servomechanizmų trūkumu tampa nereguliuojamas posūkio į nurodytą padėtį greitis. Taigi, servomechanizmo greitis tiesiogiai priklauso nuo posūkio kampo dydžio, kuris lygus esamo kampo dydžio ir užduoto kampo dydžio skirtumui. Dėl šios priežasties, užduodant didelius posūkio kampus, roboto judesiai tampa pernelyg staigūs ir atsiranda inerciniai smūgiai, kurie yra nepageidaujami. Siekiant to išvengti, reikia užtikrinti galimybę keisti kiekvieno servomechanizmo posūkio greitį. Vienintelis būdas reguliuoti servomechanizmo greitį yra skaidyti jo posūkio kampą į pasirinkto skaičiaus mažų poslinkių seką. Tai yra atliekama didinant arba mažinant servomechanizmo valdymo impulso plotį nuo esamo iki reikiamo dydžio užduotu didinimo ir (ar) mažinimo koeficientu. Nuo šio impulso pločio didinimo ir (ar) mažinimo koeficiento pri-

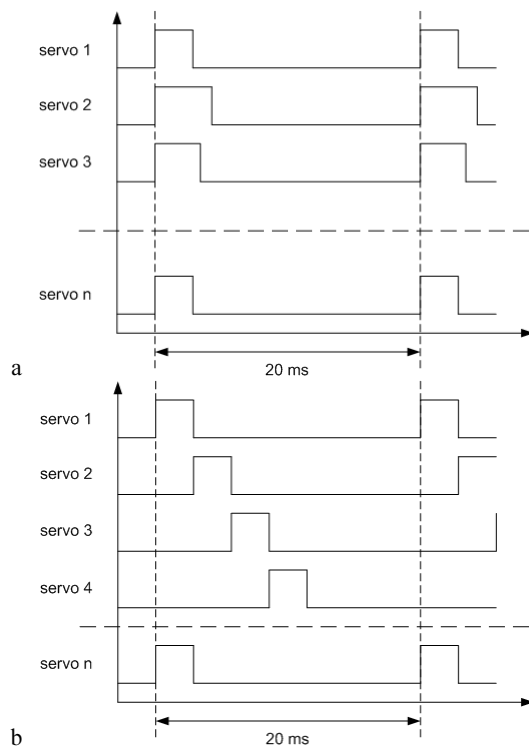
klausys servomechanizmo sukimosi greitis. Impulso trukmė yra keičiama mažiausiai kas 20 ms.

Mažiausias keitimo žingsnis yra  $1 \mu\text{s}$ , intervale nuo  $1\,000 \mu\text{s}$  iki  $2\,000 \mu\text{s}$ . Tai atitinka  $0,09^\circ$  kampo pokytį.

### Variklių valdymo metodai

Visus servomechanizmus valdo mikroprocesorius Atmega16, kuris generuoja impulsų sekas kiekvienam varikliui. Galimi du impulsų sekų generavimo būdai: lygiagretusis ir nuoseklusis.

Lygiagretaus impulsų sekos generavimo atveju visi reikiami procesoriaus išvadai įjungiami tuo pat metu, o kiekvienas išvadas išjungiamas po tam tikro laiko (3 pav., a). Šiuo atveju, vienu metu reikia sekti visų impulsų trukmę, kas apsunkina mikroprocesoriaus darbą. Nuoseklaus impulsų generavimo atveju, mikroprocesoriaus išvadai junginėjami nuosekliai. Įjungiamas pirmas išvadas, tada laukiama, kol praeis laikas, kuris atitinka impulso plotį, ir tada jis išjungiamas. Tuo pat metu yra įjungiamas sekantis išvadas ir laukiama užduotą laiką ir t. t. (3 pav., b). Kadangi impulsus reikia generuoti 50 Hz dažniu, kas 20 ms, o maksimalus kiekvieno impulso plotis gali būti 2 ms, tai nuosekliai galima sugeneruoti 10 impulsų. Kadangi robotas turi 18 pavarų, tai reikia generuoti dvi lygiagrečias impulsų sekas.



3 pav. Lygiagretusis (a) ir nuoseklusis (b) impulsų generavimas  
Fig. 3. Parallel (a) and sequential (b) impulse generation

### Roboto eisenos tyrimas

Atlikti trys roboto eisenos tyrimai, pritaikant tris skirtingus valdymo impulsų generavimo metodus.

*Pirmasis bandymas.* Taikytas lygiagretusis impulsų generavimo būdas tiesiogiai skaitant ir (ar) rašant mikroprocesoriaus laikmačio turinį. Šiuo atveju procesoriaus programa labai apkraunama laikmačio turinio tikrinimu, todėl tampa sudėtinga stebėti kiekvieno impulso trukmę bei keisti jį pasirinktu žingsniu.

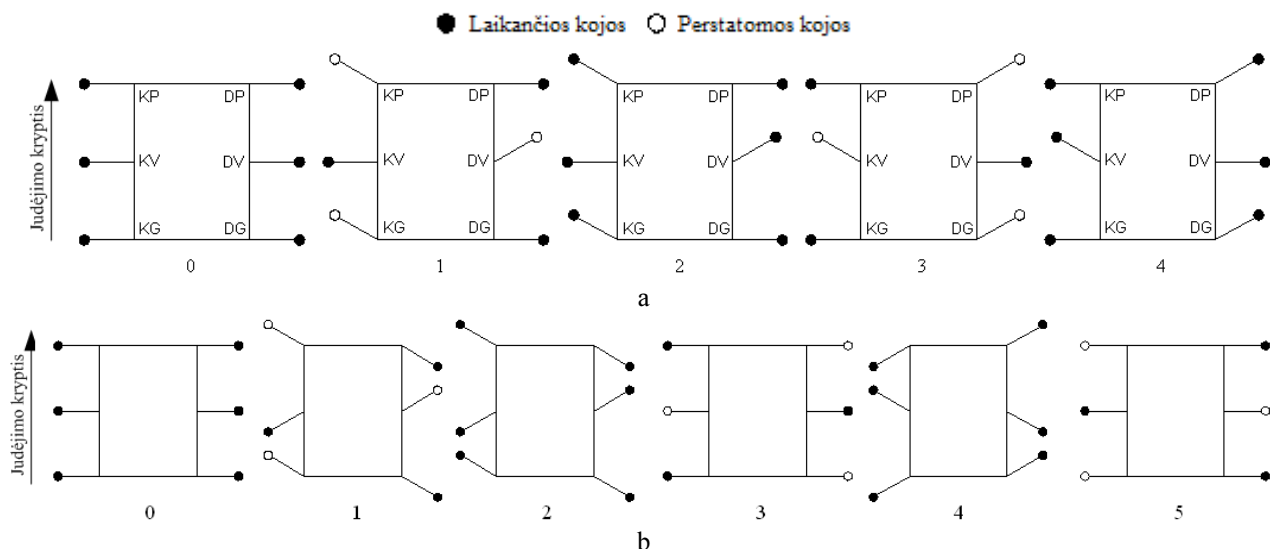
*Antrasis bandymas.* Naudota procesoriaus laikmačio persipildymo pertrauktis. Laikmačio turinį tikrina procesoriaus vidinės schemos, todėl tuo pat metu pagrindinė programa gali atlikti kitus veiksmus. Pertrauktis yra iškviečiama tik kas tam tikrą nustatytą laiką. Kiekvienos pertraukties metu yra tikrinama, ar reikia išjungti mikroprocesoriaus išvadus. Kadangi reikia tikrinti 18 verčių, pertraukties vykdymo laikas smarkiai išauga, kas apriboja kreipimosi į pertraukties aptarnavimo paprogramę dažnį. Geriausi rezultatai buvo pasiekti, kai pertrauktis būdavo iškviečiama kas  $100 \mu\text{s}$ . Tai reiškia, kad variklių valdymo impulsų plotis gali būti keičiamas tik  $100 \mu\text{s}$  žingsniu. Taip pat, kiekvienos pertraukties metu reikia perrašyti laikmačio vertę.

Šie valdymo metodai neleidžia valdyti variklių nustatytais valdymo kriterijais. Roboto trikojė eiseną buvo generuojama pagal 4 pav., a dalyje pateiktą būdą. Pereinant nuo 2 būsenos prie 3 būsenos, dešinės galinės kojos kampe susidarydavo nestabilus taškas. Dėl šios priežasties robotas tais momentais pavirsdavo šia kryptimi.

Dėl minėtos priežasties būtina koreguoti trikojės eisenos generavimo seką. Norint sumažinti nestabilių būsenų skaičių taikoma ši trikojės eisenos generavimo seka:

0. Neutrali būsena.
1. Pirmasis trikojis pakeliamas ir pernešamas pirmyn, antrasis trikojis perstumiamas atgal.
2. Pirmasis trikojis pastatomas ant paviršiaus, antrasis trikojis yra pastumtas atgal.
3. Pirmasis trikojis yra perstumiamas į neutralę, antrasis trikojis pakeliamas aukštyn ir perstumiamas į neutralę.
4. Pirmasis trikojis perstumiamas atgal, antrasis trikojis pernešamas pirmyn ir pastatomas ant paviršiaus.
5. Pirmasis trikojis pakeliamas aukštyn ir perstumiamas į neutralią padėtį, antrasis trikojis perstumiamas į neutralią padėtį.

Po 5-ojo etapo visas ciklas kartojamas nuo 1-ojo etapo.



4 pav. Yprastos (a) ir koreguotos (b) trikojės eisenos seka

Fig. 4. Usual (a) and corrected (b) tripod gait sequence

*Trečias bandymas.* Taikyta koreguota trikojės eisenos seka ir impulsai generuoti dviem lygiagrečiomis nuoseklių impulsų sekomis (4 pav., b). Buvo naudojama laikmačio turinio palyginimo pertrauktis. Atmega16 turėdamas du laikmačio turinio palyginimo registrus leidžia vienu metu generuoti dvi nuoseklias impulsų sekas. Vienu metu formuojant tik du lygiagrečius impulsus ir pertrauktis iškviečiant kas 1 ms, pagrindinė procesoriaus programa yra mažai apkraunama. Tai leidžia jai vykdyti kitas funkcijas, pvz., impulsų pločių keitimą pasirinktu žingsniu, duomenų mainus su kitais mikroprocesoriais.

Šis roboto valdymo būdas leidžia pasirinkti tarpinius kojų trajektorijos taškus bei keisti posūkio greitį

## Išvados

1. Variklių valdymo metodą apsprendžia jiems keliami valdymo lankstumo parametrai. Vien tik tinkamo variklių valdymo metodo parinkimas neišsprendžia roboto ėjimo stabilumo problemų.

2. Norint garantuoti stabilų roboto ėjimą yra svarbu teisingai parinkti kiekvienos kojos judesio trajektorijas ir visas kojas teisingai sinchronizuoti.

3. Geometrinis atvirkštinės kinematikos uždavinio sprendimo vienai kojai metodas leidžia gauti paprastas variklių posūkio kampų išraiškas priklausančias nuo pėdos koordinatinių erdvėje.

## Literatūra

Inagaki, K.; Kobayashi, H. 1994. Adaptive wave gait for hexapod synchronized walking, in *Proc. of IEEE Int. Conf. on*

*Robotics and Automation 2*: 1326-1331.

doi:10.1109/ROBOT.1994.351303

Jianhua, G. 2006. Design and kinematic simulation for Six-DOF leg mechanism of hexapod robot, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* 625–629.

Luneckas, T. 2006. Daugiakojų robotų kojų perstatymo būdai, iš *9-osios Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ pranešimų medžiaga*, 101–105.

Luneckas, T.; Udris, D. 2009. Optimization of hexapod robot locomotion, in *4th international conference on Electrical and Control Technologies ECT-2009*, 40–43.

Parker, G. B.; Braun, D. W.; Cyliax, I. 2003. *Evolving hexapod gaits using a cyclic genetic algorithm* [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 m. kovo 8 d.]. Prieiga per internetą: <[http://web.cecs.pdx.edu/~mpekows/ML\\_LAB/Giant\\_Hexapod/transm3/Evolving.pdf](http://web.cecs.pdx.edu/~mpekows/ML_LAB/Giant_Hexapod/transm3/Evolving.pdf)>.

Hooper, R. 2009. *Robot Inverse Kinematics* [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 m. kovo 5 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.learnaboutrobots.com/inverseKinematics.htm>>.

## ANALYSIS OF HEXAPOD ROBOT LOCOMOTION

T. Luneckas

Abstract

Hexapod robot locomotion is analyzed. Trajectory forming method for one leg is introduced. Servo angles are expressed using geometric inverse kinematics method. Forming of tripod gait is described and a diagram representing it is presented. Servo control parameters are defined to ensure fluent and versatile robot control. Several servo control methods are presented. After testing robot movement using different servo control methods, gait generation is corrected and control method that meets servo control parameters is chosen.

**Keywords:** hexapod robot, tripod gait, leg trajectory, inverse kinematics, servomotor.