

## ŠEŠIAKOJO ŽINGSNIUOJANČIO ROBOTO VALDYMAS

Raimondas Zubavičius<sup>1</sup>, Nerijus Paulauskas<sup>2</sup>, Martynas Šapurov<sup>3</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>zubavicius.raimondas@gmail.com; <sup>2</sup>nerijus.paulauskas@vgtu.lt; <sup>3</sup>martynas@stagelite.lt

**Santrauka.** Nagrinėjami šešiakojo žingsniuojančio roboto kojų, turinčių tris judrumo laipsnius, valdymo ypatumai. Aprašomi skirtingi valdomųjų mechanizmų valdymo būdai, pateikiamas sudarytas programos algoritmas valdomųjų mechanizmų valdymo signalams formuoti. Aprašyta, kaip randami atskirų roboto kojos dalių tarpusavio kampai taikant geometrinį atvirkštinės kinematikos metodą. Pateikiami šešiakojo žingsniuojančio roboto maketo tyrimo vienos kojos judėjimo erdvėje rezultatai.

**Reikšminiai žodžiai:** šešiakojis robotas, atvirkštinė kinematika, valdomasis mechanizmas.

## Įvadas

Žingsniuojantys robotai – pagrindinė važiuojančių robotų alternatyva. Važiuojantys robotai pritaikyti judėti lygiu paviršiumi. Jie gali važiuoti daug greičiau ir sunaudoti mažiau energijos nei žingsniuojantys robotai. Be to, valdyti važiuojančius robotus yra daug paprasčiau. Tačiau aplinkose, kuriose reikia judėti įveikiant kliūtis ir prisitaikant prie nelygaus ir nuolat besikeičiančio paviršiaus, žingsniuojantys robotai yra nepakeičiami (Bräunl 2008; Siegwart, Nourbakhsh 2004; Burkus, Odry 2008).

Šešiakojis žingsniuojantis robotas (angl. *hexapod*) – tai savaeigis robotas su šešiomis kojomis. Priklausomai nuo konstrukcijos viena šešiakojo roboto koja dažniausiai turi du arba tris laisvės laipsnius, kitaip dar vadinamus judrumo laipsniais. Įveikiant nelygius paviršius daug didesnių galimybių turi šešiakojai robotai, kurių kiekviena koja turi po tris judrumo laipsnius, nes tai leidžia roboto koją pozicijuoti trimatėje erdvėje (Jianhua 2006). Straipsnyje aprašomas būtent šios konstrukcijos šešiakojo roboto valdymas.

Pagrindinė nagrinėjamo šešiakojo žingsniuojančio roboto konstrukcijos dalis – valdomasis mechanizmas, kuris pagal jam siunčiamą skirtingos impulsų trukmės signalą pasuka savo svirtį į norimą poziciją. Robotui, kurio kiekviena koja turi po tris judrumo laipsnius, iš viso reikia 18 valdomųjų mechanizmų. Čia susiduriama su pirmąja problema – visiems valdomiesiems mechanizms valdyti reikalingas didelis valdymo kanalų skaičius moduluotosios impulso trukmės signalams generuoti. Antroji problema – tikslus roboto kinematikos įgyvendinimas. Norint įgyvendinti roboto eiseną, būtina formuoti atitinkamus valdymo signalus visoms šešioms roboto kojoms vienu metu, t. y. visuose 18-oje valdymo kanalų. Taigi būtina aprašyti kiekvienos kojos judesį trajektorijas atskirai.

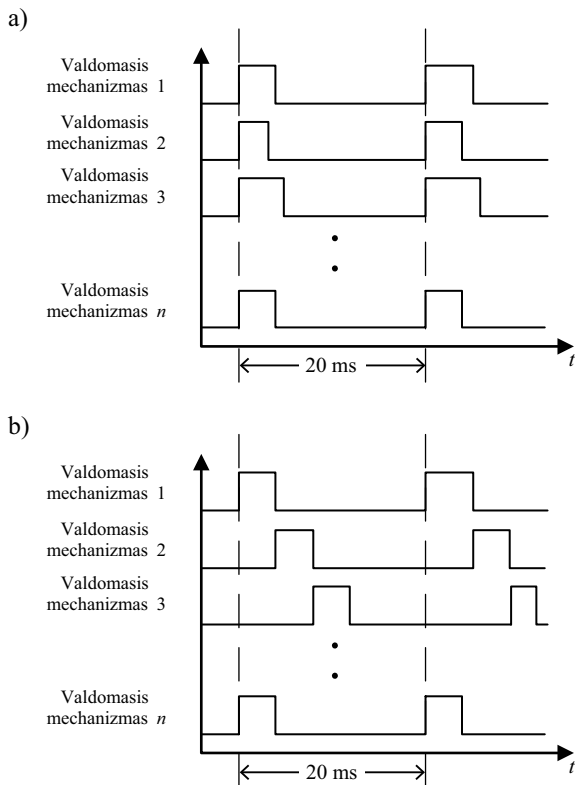
## Valdomųjų mechanizmų valdymo būdai

Valdomieji mechanizmai valdomi moduluotosios trukmės impulsais (angl. *Pulse Width Modulation*, PWM). Tam tikra valdymo impulso trukmė nurodo valdomojo mechanizmo svirties pasukimo kampą. Centrinė valdomojo mechanizmo svirties padėtis nustatoma siunčiant jam 1,5 ms trukmės impulsą, 0,5 ms trukmės impulsas nustato svirtį 90° kampu nuo centrinės padėties prieš laikrodžio rodyklę, 2,5 ms – 90° kampu nuo centrinės padėties pagal laikrodžio rodyklę. Valdymo impulsų generavimo periodas – 20 ms.

Galimi trys impulsų sekų generavimo būdai: lygiagretusis, nuoseklusis ir mišrusis (Luneckas 2010).

Generuojant impulsų sekas lygiagrečiai visuose valdymo kanaluose, impulsai pradedami formuoti tuo pačiu metu, o baigiami formuoti kiekviename kanale atskirai, praėjus tam tikram laiko tarpui (1 pav., a). Šiuo atveju vienu metu reikia sekti visų impulsų trukmes. Generuojant impulsų sekas nuosekliai, impulsas pradžioje suformuojamas pirmajame kanale. Paskui laukiama, kol praeis impulso trukmė atitinkantis laiko tarpas, tada valdymo impulsas pradedamas formuoti antrajame kanale ir t. t., kol suformuojamos visos reikalingos impulsų sekos (1 pav., b). Generuojant impulsų sekas mišriuoju būdu, lygiagretusis ir nuoseklusis būdai taikomi kartu.

Signalai turi būti generuojami kas 20 ms, o didžiausia vieno impulso trukmė gali būti 2,5 ms, tad taikant nuoseklų impulsų generavimo būdą įmanoma generuoti tik iki 8 impulsų sekų. Taikant lygiagretųjį signalų generavimo būdą valdymo kanalų skaičius gali būti neribotas. Tačiau įgyvendinant lygiagretųjį būdą, praktikoje susiduriama su sunkumais, nes kiekviename kanale formuoti skirtingas impulsų sekas ir sekti jų trukmes būtina tuo pačiu metu, o tam kiekvienas kanalas turi turėti savo atskirą laikmatį-skaitiklį.



1 pav. Lygiagretusis (a) ir nuoseklusis (b) impulsų generavimas

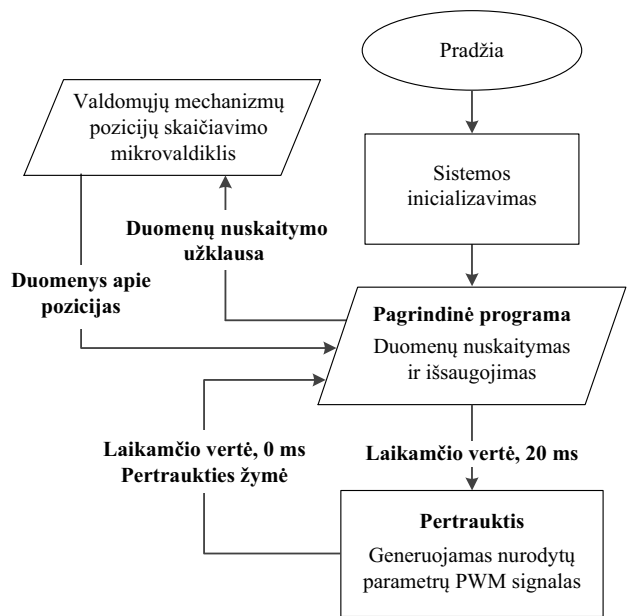
Fig. 1. Parallel (a) and serial (b) impulse generation

Paprasčiausias sprendimas – naudoti mikrovaldiklį, turintį 18 vidinių nepriklausomų aparatinę PWM įtaisų, bet tokie mikrovaldikliai šiuo metu nėra gaminami. Todėl valdomiesiems mechanizms valdyti naudojant mikrovaldiklius, signalai formuojami programiškai.

Roboto valdomųjų mechanizmų valdymo signalams formuoti pasirinktas „Microchip“ firmos 8 skilčių PIC18F46K22 mikrovaldiklis, turintis 35 įvesties/išvesties išvadas ir galintis dirbti 64 MHz taktiniu dažniu.

Šešiakojo roboto konstrukcijai įgyvendinti panaudoti HiTEC firmos HS-645MG modelio valdomieji mechanizmai, turintys metalinius dantračius ir garantuojantys 9,6 kg/cm sukimo momentą, esant 6,0 V maitinimo įtampai.

Suprojektuotame valdomųjų mechanizmų valdiklyje programiškai įgyvendintas lygiagretusis impulsų generavimo būdas. Programos fragmentas, atsakingas už PWM signalų formavimą, buvo parašytas Assembler kalba ir įterptas į pagrindinę C kalba parašytą programą. Tai leido pasiekti 4,6875  $\mu$ s vieno žingsnio skiriamąją gebą (iš viso 256 žingsniai, generuojamų impulsų trukmė – nuo 0,9 iki 2,1 ms), o tai atitinka 0,46875° posūkio kampą. Valdomųjų mechanizmų valdymo programos algoritmas pateiktas 2 pav. Programos algoritmas realizuotas naudojant du mi-



2 pav. Valdomųjų mechanizmų valdymo programos algoritmas  
Fig. 2. The algorithm of servo-mechanisms control programme

nėtus mikrovaldiklius. Vienas mikrovaldiklis skirtas valdomųjų mechanizmų pozicijoms apskaičiuoti, kitas – PWM signalams generuoti.

Pradžioje inicializuojama sistema (suteikiami pradiniai mikrovaldiklių nustatymai), paskui vykdoma pagrindinė programa. Pertrauktis, kurią kas 20 ms iškviečia laikmatis, vykdo pagrindinę valdiklio funkciją – PWM signalų generavimą. Pasibaigus pertraukčiai, grįžtama į pagrindinę programą su žyme apie įvykusią pertrauktį. Tada pagrindinė programa išsiunčia užklausą mikrovaldikliui, atsakingam už valdomųjų mechanizmų pozicijų skaičiavimą. Gavus iš jo duomenis, generuojamas atitinkamų parametru naujas valdymo PWM signalas. Paskui ciklas kartojamas iš naujo.

## Roboto kinematika

Kinematika apibūdina analitinę ryšį tarp roboto kojos dalių sujungimo vietų ir kojos galinio taško padėties erdvėje.

Robotų technikos manipulatoriuose dažniausia sprendžiamos dvi kinematikos užduotys:

- tiesioginė kinematika – žinant roboto kojos dalių sujungimo vietų tarpusavio kampus, ieškoma roboto kojos galinio taško padėties erdvėje;
- atvirkštinė kinematika – žinant tikslią galinio taško padėtį erdvėje, ieškoma roboto kojos dalių sujungimo vietų tarpusavio kampų.

Tiriant šešiakojo roboto judėjimą, taikyta atvirkštinė kinematika.

## Atvirkštinė kinematika

Atvirkštinės kinematikos uždavinį vienai kojai išspręsimė geometrinu metodu (Utama, Syahputra 2009). Tokiu atveju sudaromos projekcijos į  $xy$  ir  $zy$  plokštumas, kaip tai parodyta 3 pav. Šiame paveiksle:

- $x, y$  ir  $z$  – koordinatės erdvėje;
- $A$  – atstumas nuo kojos šlaunies (angl. *femur*) pradžios iki pėdos (angl. *foot*)  $xy$  plokštumoje;
- $B$  – menamoji linija, nurodanti atstumą nuo kojos klubo iki pėdos;
- $\varphi_1$  – kampas tarp  $z$  ašies ir menamosios linijos  $B$ ;
- $\varphi_2$  – kampas tarp šlaunies ir menamosios linijos  $B$ ;
- $\theta_1$  – kojos pasisukimo kampas  $xy$  plokštumoje;
- $\theta_2$  – šlaunies pasisukimo kampas  $zy$  plokštumoje;
- $\theta_3$  – blauzdos (angl. *tibia*) pasisukimo kampas  $zy$  plokštumoje;
- $l_1$  – klubo ilgis;
- $l_2$  – šlaunies projekcija į  $xy$  plokštumą;
- $l_3$  – blauzdos projekcija į  $xy$  plokštumą;
- $l_4$  – šlaunies ilgis;
- $l_5$  – blauzdos ilgis.

Pagal Pitagoro teoremą surandamas atstumas  $A$ :

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

ir menamosios linijos ilgis  $B$ :

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

Remiantis tangento teorema apskaičiuojamas pagalbinis kampas  $\varphi_1$ :

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{y}{z}\right). \quad (3)$$

Kampas  $\varphi_2$  randamas pasinaudojus kosinusų teorema:

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{l_4^2 + B^2 - l_5^2}{2 \cdot l_4 \cdot B}\right). \quad (4)$$

Klubo posūkio kampas  $\theta_1$  apskaičiuojamas taip:

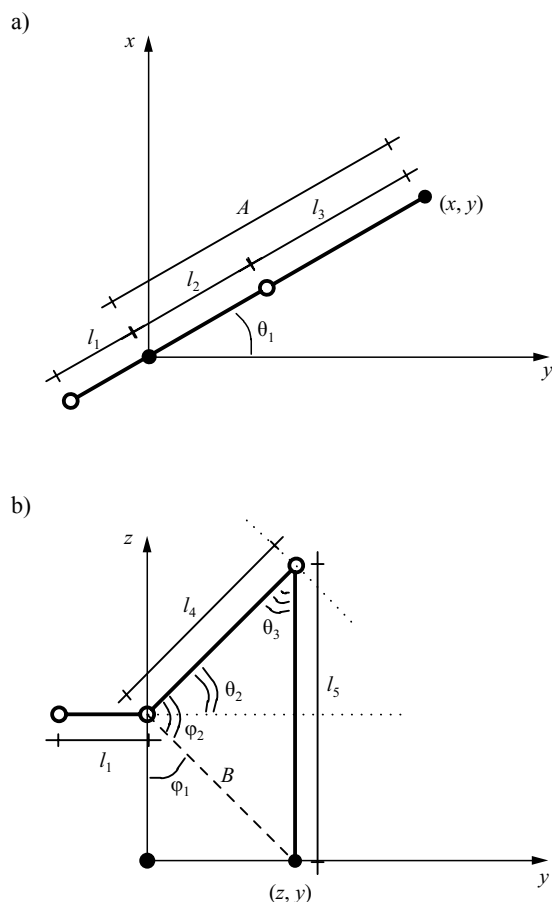
$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{x}{y}\right). \quad (5)$$

Šlaunies pasisukimo kampas  $\theta_2$  randamas pagal formulę:

$$\theta_2 = -90 + (\varphi_1 + \varphi_2). \quad (6)$$

Blauzdos pasisukimo kampas apskaičiuojamas taip:

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{l_4^2 + l_5^2 - B^2}{2 \cdot l_4 \cdot l_5}\right). \quad (7)$$



3 pav. Kojos projekcija į  $xy$  (a) ir  $zy$  (b) plokštumas  
Fig. 3. The projection of leg to  $xy$  (a) and  $zy$  (b) planes

Sprendžiant atvirkštinės kinematikos uždavinį susiduriama su keliomis problemomis. Viena jų, kai pati roboto konstrukcija neleidžia pasiekti nurodyto taško, t. y. nurodytas taškas nuo pradinės koordinatės nutolęs daugiau nei roboto kojos dalių ilgių suma. Šiuo atveju turi būti atitinkama ši sąlyga:

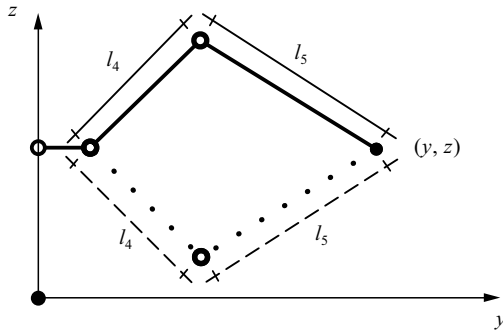
$$A \text{ ir } B \leq l_4 + l_5. \quad (8)$$

Kita problema, kai su tam tikromis galinio taško koordinatėmis yra galimas daugiau nei vienas sprendinys (4 pav.).

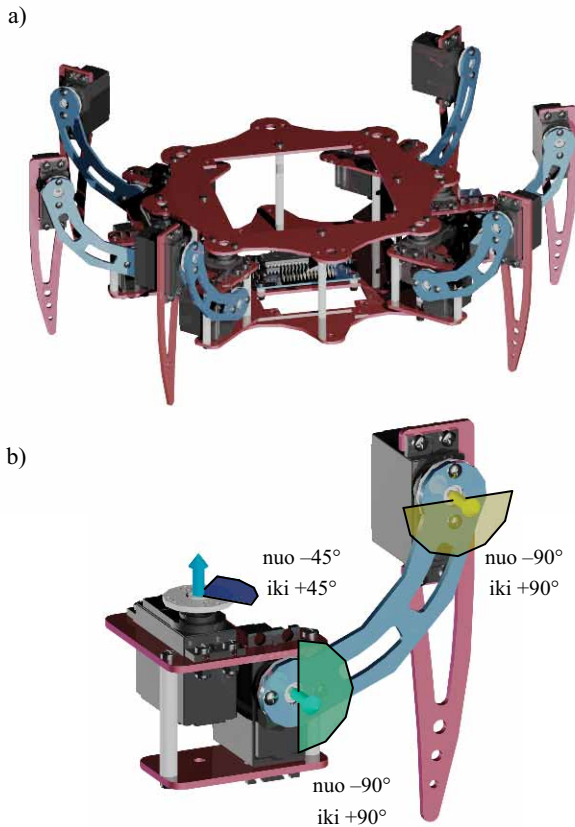
Vienas problemos sprendimo būdų – pasirinkti sprendinį, mažiausiai nutolusį nuo prieš tai buvusio.

Kaip dar vieną iš problemų galima įvardyti minimalias ir maksimalias apskaičiuotų kampų vertes. Galima situacija, kai pasirinktos kampų vertės dėl šešiakojo žingsniuojančio roboto konstrukcijos yra negalimos, todėl, prieš pradėdant skaičiuoti, reikia nustatyti ir skaičiuojant tikrinti šių kampų vertes.

Dalį kylančių problemų galima išspręsti sudarant trimatį roboto modelį. 5 pav., a, pavaizduotas sudarytas šešiakojo žingsniuojančio roboto konstrukcijos trimatis modelis. Modelyje, keičiant roboto kojų padėtis, nesunkiai galima surasti didžiausius ir mažiausius galimus valdomųjų mechanizmų pasukimo kampus. Vienos kojos trimatis modelis su nurodytais galimais jos sąnarių (valdomųjų mechanizmų) pasukimo kampais parodytas 5 pav., b.



4 pav. Du galimi sprendiniai  
Fig. 4. Illustration showing two possible solutions



5 pav. Sudarytas šešiakojo roboto trimatis modelis (a) ir vienos kojos trimatis modelis su nurodytais kojos sąnarių (valdomųjų mechanizmų) galimais pasukimo kampais (b)  
Fig. 5. 3D model of the Hexapod (a) and one leg 3D model with the possible rotation angles of leg joints (servo) (b)

## Roboto maketo tyrimo rezultatai

Geometrinis atvirkštinės kinematikos metodas buvo tikrinamas naudojant pasigaminatą roboto maketą ir lyginant sudarytų algoritmų skaičiavimų duomenis, gautus kompiuterio programine įranga, su skaičiavimų duomenimis, gautais įgyvendinus tuos pačius algoritmus mikrovaldiklyje.

Tyrimo metu buvo keičiamos galinio taško  $x$ ,  $y$  ir  $z$  koordinatės. Daugumoje erdvės taškų atsiranda apie 1–2 mm numatytos padėties neatitiktis. Kadangi valdomųjų mechanizmų valdiklio skiriamoji geba yra  $0,46875^\circ$ , tai pagal tangento teoremą stačiajam trikampiui vieno žingsnio neatitiktis  $y$  ašyje, kai blauzdos ilgis  $l_5 = 122,78$  mm, gali siekti:

$$\Delta_y = l_5 \times \tan(0,46875^\circ) \approx 1,00 \text{ mm}, \quad (9)$$

o  $z$  ašyje, kai šlaunies ilgis  $l_4 = 84,88$  mm, neatitiktis gali siekti:

$$\Delta_z = l_4 \times \tan(0,46875^\circ) \approx 0,69 \text{ mm}. \quad (10)$$

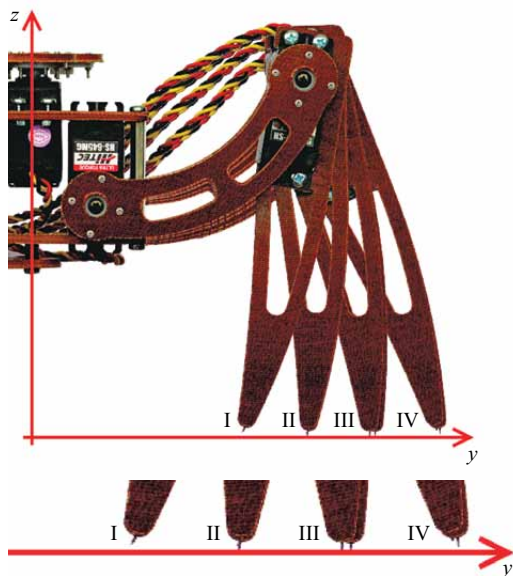
Pasikeitus bent vienai  $y$  ar  $z$  koordinatei, keičiasi dviejų valdomųjų mechanizmų pasukimo kampai ( $\theta_2$  ir  $\theta_3$ ), todėl neatitiktis padidėja. Neatitiktis  $x$  ašyje priklausys nuo  $y$  koordinatės ir bus lygus:

$$\Delta_x = y \times \tan(0,46875^\circ). \quad (11)$$

Tiriant kompiuterio programa ir mikrovaldikliu gautus skaičiavimo rezultatus, buvo keičiama galinio pėdos taško padėtis  $y$  ašies atžvilgiu, išlaikant tą patį pėdos aukštį  $z$  ašyje. Tuo tikslu reikėjo keisti dviejų valdomųjų mechanizmų svirčių pasukimo kampus. Buvo parinktos tokios kojos padėtys, kurioms esant išryškėja visi galimi pėdos galinio taško padėties skirtumai (6 pav.), atsirandantys dėl mikrovaldiklio slankiojo kablelio apvalinimo paklaidos. Skaičiuojant mikrovaldikliu buvo imama tik sveikoji rezultato dalis, o skaičiuojant kompiuterio programa buvo vertinama ir trupmeninė rezultato dalis. Todėl tam tikrose pėdos galinio taško padėtyse atsiranda nesutapimų, lygių vienam valdomojo mechanizmo žingsniui. Norint išvengti šių nesutapimų, būtina vertinti ir trupmeninę rezultato dalį. 6 pav. pažymėtose padėtyse: I – skaičiavimų rezultatai sutampa, II – nesutampa  $z$  ašies atžvilgiu, III – nesutampa  $y$  ašies atžvilgiu, IV – nesutampa  $z$  ir  $y$  ašių atžvilgiu. Pavaizduotų erdvės taškų koordinatės atitinkamai lygios:

- $x_1 = 0 \text{ mm}, y_1 = 50 \text{ mm}, z_1 = 75 \text{ mm};$
- $x_2 = 0 \text{ mm}, y_2 = 70 \text{ mm}, z_2 = 75 \text{ mm};$
- $x_3 = 0 \text{ mm}, y_3 = 89 \text{ mm}, z_3 = 75 \text{ mm};$
- $x_4 = 0 \text{ mm}, y_4 = 113 \text{ mm}, z_4 = 75 \text{ mm}.$

Skaičiuojant mikrovaldikliu, atvirkštinės kinematikos skaičiavimai vienai kojai trunka apie 5 ms, todėl skaičiavi-



6 pav. Galinio kojos taško padėties erdvėje skirtumai, atsirandantys dėl apvalinimo paklaidos, kai  $x_1 = 0$  mm,  $y_1 = 50$  mm,  $z_1 = 75$  mm (I),  $x_2 = 0$  mm,  $y_2 = 70$  mm,  $z_2 = 75$  mm (II),  $x_3 = 0$  mm,  $y_3 = 89$  mm,  $z_3 = 75$  mm (III) ir  $x_4 = 0$  mm,  $y_4 = 113$  mm,  $z_4 = 75$  mm (IV)

Fig. 6. The differences between leg's end point positions arising due to rounding bias, when  $x_1 = 0$  mm,  $y_1 = 50$  mm,  $z_1 = 75$  mm (I),  $x_2 = 0$  mm,  $y_2 = 70$  mm,  $z_2 = 75$  mm (II),  $x_3 = 0$  mm,  $y_3 = 89$  mm,  $z_3 = 75$  mm (III) and  $x_4 = 0$  mm,  $y_4 = 113$  mm,  $z_4 = 75$  mm (IV)

mai visoms šešioms kojoms ne tik apkrautų mikrovaldiklių, bet ir neįsitemktų į turimą 20 ms laiko tarpą naujiems duomenims apskaičiuoti. Sprendimas – skaičiuoti kompiuteriu ir gautus duomenų masyvus įrašyti į mikrovaldiklio atmintinę. Taip bus išvengta apvalinimo klaidų ir didelio mikrovaldiklio apkrovimo. Kitas sprendimas – naudoti spartesnį mikrovaldiklį su didesniu skilčių skaičiumi.

## Išvados

1. Naudojant pasirinktą aštuonių skilčių mikrovaldiklį, pasiūlytas valdomųjų mechanizmų valdymo programos algoritmas leidžia pasiekti  $4,6875 \mu\text{s}$  ( $0,46875^\circ$ ) vieno žingsnio skiriamąją gebą, kai generuojamų valdymo impulsų trukmė – nuo 0,9 iki 2,1 ms.
2. Parodyta, kad tam tikruose erdvės taškuose dėl skaičiavimų rezultato apvalinimo paklaidos atsiranda galinio pėdos taško padėties ir numatytosios padėties neatitikčių, kurios lygios vienam valdomojo mechanizmo žingsniui.

3. Visų šešių roboto kojų padėties skaičiavimai, sprendžiant atvirkštinės kinematikos uždavinį pasirinktu mikrovaldikliu, trunka ilgiau nei valdomųjų mechanizmų valdymo signalų periodas, todėl tikslinga skaičiuoti kompiuteriu, o į mikrovaldiklį įrašyti tik duomenų masyvus su iš anksto nurodytomis kojų judėjimo trajektorijomis.

## Literatūra

- Bräunl, T. 2008. *Embedded Robotics, Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*. Third Edition. Springer. 556 p.
- Burkus, E.; Odry, P. 2008. Autonomous Hexapod Walker Robot “Szabad(ka)”, *Acta Polytechnica Hungarica* 5(1): 69–85.
- 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*. Kunming, China, 625–629.
- Luneckas, T. 2010. Šešiakojo roboto eisenos tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(1): 36–39.
- Siegwart, R.; Nourbakhsh, I. R. 2004. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press. 335 p.
- Utama, H.S.; Syahputra, E. 2009. Implementation of Inverse kinematics and gait algorithm in the design of a hexapod robot, in *International Conference on Instrumentation, Control & Automation*. Bandung, Indonesia.

## CONTROL OF THE HEXAPOD WALKING ROBOT

R. Zubavičius, N. Paulauskas, M. Šapurov

### Abstract

The analysis focuses on control features of the hexapod walking robot with three degree-of-freedom legs. This paper describes different servo control methods and presents the developed algorithm for formation of servos control signals. The geometric inverse kinematics method was used to calculate the angles of each joint of a leg. The authors present the results of the experimental investigation on the hexapod robot leg movement trajectory.

**Keywords:** hexapod robot, inverse kinematics, servo.