

PAVIRŠIAUS NETOLYGUMO VERTINIMAS PAGAL ROBOTO PADĖTĮ

Tomas Luneckas

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

Santrauka. Pristatomas metodas, leidžiantis įvertinti paviršiaus netolygumą pagal esamą roboto padėtį. Nurodomas paviršiaus netolygumo vertinimo reikalingumas. Analizuojami paviršiaus netolygumo įvertinimo kriterijai. Pateikiama galimybė vertinti paviršiaus netolygumą pagal roboto pėdų standartinę nuokrypą. Kai nuokrypa $\sigma = 0$, visos roboto pėdos yra vienoje plokštumoje. Didėjant nuokrypui σ , roboto pėdų koordinatės tampa labiau išsibarsčiusios, tokiu būdu atpažįstama, kad paviršius, kuriuo žingsniuoja robotas, yra nelygus. Taip pat pateikiamas roboto horizontalumo paviršiaus atžvilgiu vertinimas pagal trijų esminių plokštumų erdvinę tarpusavio padėtį.

Reikšminiai žodžiai: šešiakojis robotas, paviršiaus netolygumo vertinimas, pėdų koordinatėlių nuokrypa, plokštumų tarpusavio padėtis.

Įvadas

Robotai su ratais yra nepralenkami lygiame kelyje, tačiau yra bejėgiai, kai reikia judėti labai nelygiu paviršiumi, todėl nagrinėjami žingsniuojantys robotai. Žingsniavimas leidžia judėti nelygiu paviršiumi (Kazuo *et al.* 2003). Populiariausi yra dvikojai (angl. *biped*), keturkojai (angl. *quadruped*) ir šešiakojai (angl. *hexapod*) robotai. Šešiakojai yra stabiliausi, nes bet kuriuo laiko momentu su paviršiumi turi tris sąlyčio taškus.

Norint, kad robotas gebėtų orientuotis, planuoti maršrutą, jam reikia surinkti visą įmanomą ir teisingą informaciją apie jį supančią aplinką (Schoenberg *et al.* 2009). Žinodama esamus paviršiaus netolygumus, roboto valdymo sistema gali priimti reikiamus sprendimus. Pavyzdžiui, žinant, kad žingsniuojama lygiu paviršiumi, parenkama trikojė eiseną, kuri yra greičiausia šešiakojų robotų eiseną. Taip pat parenkamas reakcinis roboto valdymo (angl. *reactive control*) būdas (Luneckas *et al.* 2009). Pajutus, kad paviršius tampa nelygus, parenkama lėtesnė, bet atsargesnė eiseną (banguojanti ar pulsuojanti) ir nustatomas apsvaistytas valdymo (angl. *deliberative control*) būdas (Luneckas *et al.* 2009). Pastebėjus, kad paviršius netolygumas viršija leistinas apsibrėžtas ribas, gali būti parenkamas naujas maršrutas. Esant reikalui, gali būti palaikomas roboto horizontalumas, nepriklausomai nuo paviršiaus netolygumo.

Daug tiriama, kaip parinkti žingsniuojantiems robotams eiseną pritaikytą prie paviršiaus, tačiau visos problemos, kad robotai galėtų sklandžiai žingsniuoti bet kokiame paviršiumi, nėra išspręstos (Alonso-Puig 2006).

Šiame straipsnyje yra pristatomi du metodai paviršiaus netolygumui įvertinti pagal roboto pėdų standartinę nuokrypą bei esminių plokštumų erdvinę tarpusavio padėtį.

Netolygus paviršius

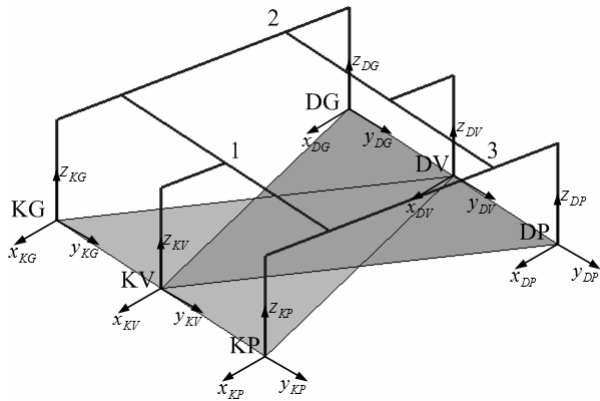
Vertinant paviršiaus netolygumą, pirmiausia reikia nustatyti, ką galima laikyti netolygiu paviršiumi. Tai toks paviršius, kuriuo žingsniuojant, kiekviename žingsnyje visos pėdos yra ne vienoje plokštumoje. Lygiu paviršiumi laikomas toks paviršius, kai visos pėdos su leistina paklaida yra vienoje plokštumoje.

Taip pat priimama, kad netolygiu paviršiumi laikytinas šlaitas, kuriuo reikia kilti, leistis ar eiti išilgai.

Parametrai paviršiaus netolygumo vertinimui

Norint įvertinti paviršiaus netolygumą pagal standartinę nuokrypą arba plokštumų erdvinę tarpusavio padėtį, reikalingos pėdų koordinatės. Nuokrypos vertinimui pakanka žinoti pėdos z koordinatę. Ši koordinatė parodo, kokiame aukštyje yra pakelta roboto pėda.

Žinant visų pėdų erdvines koordinates, per visas šešias pėdas galima nubrėžti dvi plokštumas (žr. 1 pav.). Pirmą plokštumą sudaro KP, KG ir DV kojų pėdos, antrąją – DP, DG ir KV kojų pėdos. Trečioji plokštuma yra roboto kūno plokštuma, ją sudaro taškai 1, 2 ir 3. Šios trys plokštumos ir yra naudojamos paviršiaus netolygumo vertinimui.



1 pav. Per roboto pėdas nubrėžtos plokštumos: KP – kairioji priekinė koja; KV – kairioji vidurinė; KG – kairioji galinė; DP – dešinioji priekinė; DV – dešinioji vidurinė, DG – dešinioji galinė

Fig. 1. Planes drawn through robot's feet: KP – left first leg; KV – left middle; KG – left last; DP – right first; DV – right middle; DG – right last

Paviršiaus netolygumo įvertinimas pagal pėdų koordinatžių standartinę nuokrypą

Standartinė nuokrypa leidžia įvertinti visų stebimų taškų nukrypimą nuo jų bendrojo vidurkio. Kuo nuokrypa yra didesnė, tuo labiau taškai yra nukrypę nuo vidurkio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (z_i - \mu)^2}, \quad (1)$$

čia: $\mu = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 z_i$ – vidurkis.

Roboto pėdų koordinatės esant skirtingoms nuokrypoms pateiktos 1 lentelėje.

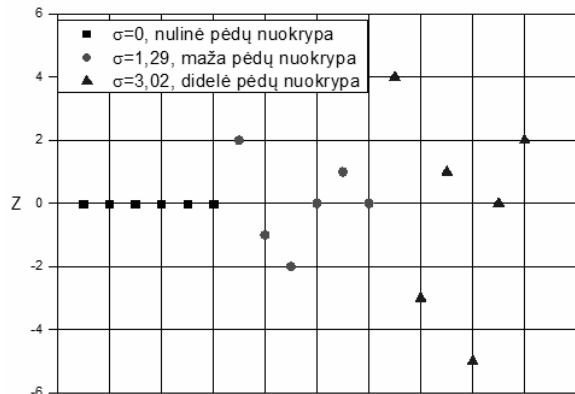
1 lentelė. Pėdų z koordinatės esant skirtingoms nuokrypoms

Table 1. Feet coordinate z at different deviation

Pėda	z koordinatės, cm		
KP	0	2	4
KV	0	-1	-3
KG	0	-2	1
DP	0	0	-4
DV	0	1	0
DG	0	0	2
Nuokrypa	Nulinė, $\sigma = 0$	Maža, $\sigma = 1,29$	Didelė, $\sigma = 3,02$

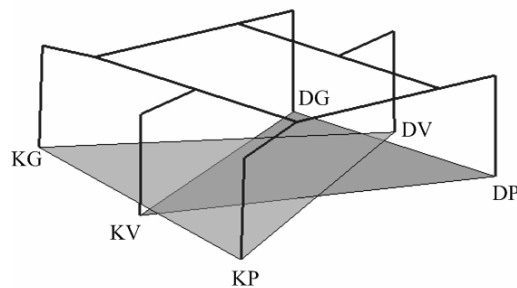
Iš 1 lentelės matyti, kad didėjant roboto pėdų koordinatžių išsibarstymui, standartinė nuokrypa didėja (žr. 2 pav.). Roboto valdymo sistema kiekvieno kojos pastatymo ant paviršiaus metu išsaugo tos kojos koordinatės. Tada suskaičiuoja standartinę nuokrypą. Tokiu būdu kiekvieno žingsnio metu roboto valdymo sistema,

palyginusi suskaičiuotą nuokrypą su nustatyta leistina, gali priimti reikiamą sprendimą.



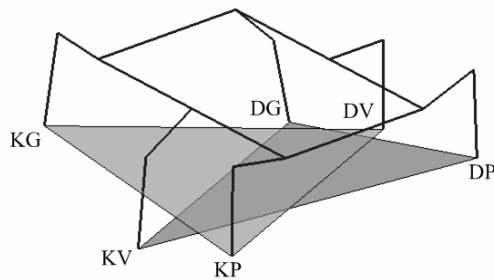
2 pav. Roboto pėdų koordinatžių išsibarstymas esant nulinei (žr. 1 pav.), mažai (žr. 3 pav.) bei didelei (žr. 4 pav.) nuokrypai

Fig. 2. Robot's feet coordinate dispersion given null, small and large deviation



3 pav. Roboto kojų padėties esant mažai nuokrypai

Fig. 3. Robot feet positions at small deviation



4 pav. Roboto kojų padėties esant didelei nuokrypai

Fig. 4. Robot feet positions at large deviation

Roboto padėties vertinimas pagal tris esmines plokštumas

Kiekvieną plokštumą galima aprašyti trimis taškais. Kadangi kiekvienu momentu yra žinomos visų roboto pėdų koordinatės, patogiu reikiama plokštuma išvesti per roboto pėdas.

Trečioji plokštuma atitinka roboto kūno plokštumą (žr. 1 pav.), ji aprašoma trimis taškais 1, 2 ir 3. Visas

reikiamas tris plokštumas aprašo trys lygčių sistemos. Pirmoji lygčių sistema (2) sudaroma, reikiamus koeficientus apskaičius pagal (3)–(6) formules.

$$\begin{cases} a_1 x_{KP} + b_1 y_{KP} + c_1 z_{KP} + d_1 = 0; \\ a_1 x_{KG} + b_1 y_{KG} + c_1 z_{KG} + d_1 = 0; \\ a_1 x_{DV} + b_1 y_{DV} + c_1 z_{DV} + d_1 = 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{-d_1}{D_1} \begin{vmatrix} 1 & y_{KP} & z_{KP} \\ 1 & y_{KG} & z_{KG} \\ 1 & y_{DV} & z_{DV} \end{vmatrix}; \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{-d_1}{D_1} \begin{vmatrix} x_{KP} & 1 & z_{KP} \\ x_{KG} & 1 & z_{KG} \\ x_{DV} & 1 & z_{DV} \end{vmatrix}; \quad (4)$$

$$c_1 = \frac{-d_1}{D_1} \begin{vmatrix} x_{KP} & y_{KP} & 1 \\ x_{KG} & y_{KG} & 1 \\ x_{DV} & y_{DV} & 1 \end{vmatrix}; \quad (5)$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} x_{KP} & y_{KP} & z_{KP} \\ x_{KG} & y_{KG} & z_{KG} \\ x_{DV} & y_{DV} & z_{DV} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Antrosios plokštumos lygčių sistema (7) sudaroma koeficientus apskaičius pagal (8–11) formules.

$$\begin{cases} a_2 x_{DP} + b_2 y_{DP} + c_2 z_{DP} + d_2 = 0; \\ a_2 x_{DG} + b_2 y_{DG} + c_2 z_{DG} + d_2 = 0; \\ a_2 x_{KV} + b_2 y_{KV} + c_2 z_{KV} + d_2 = 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{-d_2}{D_2} \begin{vmatrix} 1 & y_{DP} & z_{DP} \\ 1 & y_{DG} & z_{DG} \\ 1 & y_{KV} & z_{KV} \end{vmatrix}; \quad (8)$$

$$b_2 = \frac{-d_2}{D_2} \begin{vmatrix} x_{DP} & 1 & z_{DP} \\ x_{DG} & 1 & z_{DG} \\ x_{KV} & 1 & z_{KV} \end{vmatrix}; \quad (9)$$

$$c_2 = \frac{-d_2}{D_2} \begin{vmatrix} x_{DP} & y_{DP} & 1 \\ x_{DG} & y_{DG} & 1 \\ x_{KV} & y_{KV} & 1 \end{vmatrix}; \quad (10)$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} x_{DP} & y_{DP} & z_{DP} \\ x_{DG} & y_{DG} & z_{DG} \\ x_{KV} & y_{KV} & z_{KV} \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Trečiosios plokštumos lygčių sistema (12) sudaroma koeficientus apskaičius pagal (13–16) formules.

$$\begin{cases} a_3 x_1 + b_3 y_1 + c_3 z_1 + d_3 = 0; \\ a_3 x_2 + b_3 y_2 + c_3 z_2 + d_3 = 0; \\ a_3 x_3 + b_3 y_3 + c_3 z_3 + d_3 = 0; \end{cases} \quad (12)$$

$$a_3 = \frac{-d_3}{D_3} \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}; \quad (13)$$

$$b_3 = \frac{-d_3}{D_3} \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix}; \quad (14)$$

$$c_3 = \frac{-d_3}{D_3} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Žinant koeficientus a_n, b_n ir c_n , galima suskaičiuoti kampą tarp bet kurių trijų plokštumų. Kampas tarp pirmosios ir antrosios plokštumų randamas pagal formulę:

$$\alpha_{12} = \arccos \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}. \quad (17)$$

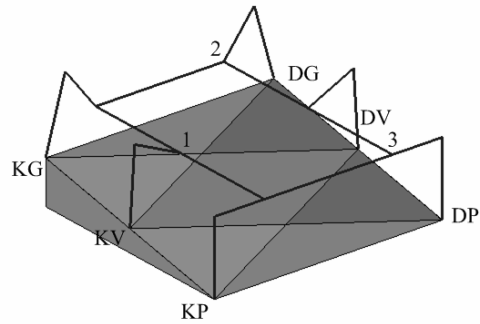
Kampas tarp antrosios ir trečiosios plokštumų randamas pagal formulę:

$$\alpha_{23} = \arccos \frac{a_2 a_3 + b_2 b_3 + c_2 c_3}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2} \sqrt{a_3^2 + b_3^2 + c_3^2}}. \quad (18)$$

Kampas tarp pirmosios ir trečiosios plokštumų randamas pagal formulę:

$$\alpha_{13} = \arccos \frac{a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \sqrt{a_3^2 + b_3^2 + c_3^2}}. \quad (19)$$

Lyginant kampus tarp plokštumų $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{13}$, galima įvertinti roboto padėties paviršiaus atžvilgiu. Pavyzdžiui, jei $\alpha_{12} = 0, \alpha_{23} = \alpha_{13} \neq 0$, tai roboto pėdos yra vienoje plokštumoje, o robotas juda šlaitu (žr. 5 pav.). Jei gaunama, kad $\alpha_{12} \neq 0$, reiškia roboto pėdos yra ne vienoje plokštumoje ir manoma, kad robotas juda nelygiu paviršiumi, priešingu atveju, robotas juda tolygiu paviršiumi.



5 pav. Robotas stovintis ant šlaito, plokštumos yra nelygiagrečios

Fig. 5. Robot standing on a slope, planes are not parallel

Apskaičiuavus kampą tarp plokštumų, negalima nuskaičiuoti plokštumų pasvirimo krypties. Todėl atsiranda poreikis vertinti statmenų šioms plokštumoms vektorių kryptį. Tokiu atveju galima nustatyti reikiamos plokštumos pasvirimo kryptį.

Išreiškus plokštumą formule:

$$f(a, b, c) = ax + by + cz + d = 0, \quad (20)$$

čia: a , b , c ir d – plokštumos lygties koeficientai, $d = ax_0 + by_0 + cz_0$; x_0 , y_0 ir z_0 – žinomo taško plokštumoje koordinatės; statmenas jai vektorius randamas pagal šią išraišką:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}; \quad (21)$$

čia: a , b ir c nurodo vektoriaus \mathbf{N} viršūnės koordinates. Šio vektoriaus pradžia yra taškai x_0 , y_0 ir z_0 .

Vektoriaus ir plokštumos pasvirimo kryptys nustatyti reikia suskaičiuoti du vektoriaus pasvirimo kampus, kuriuos jis sudaro su horizontalia plokštuma.

Žinant esamą roboto pėdų padėtį ir įvertinus paviršiaus netolygumą, roboto valdymo sistema gali priimti reikiamus sprendimus. Pavyzdžiui, jei nustatoma, kad paviršius yra lygus leistinų paklaidų ribose, tai valdymo sistema nekeičia esamų valdymo parametrų (judėjimo greičio, krypties, eisenos). Jei nustatoma, kad paviršius yra netolygus, valdymo sistema gali parinkti kitą eisena, pakeisti judėjimo greitį ar parinkti kitą ėjimo maršrutą.

Išvados

Vertinant pėdų koordinacių standartinę kvadratinę nuokrypą bei kampą tarp reikiamų plokštumų, gaunamas paprastas aplinkos atpažinimo būdas nenaudojantis sudėtingų jutiklinių sistemų ir pagristas tik pėdų koordinacių žinojimu. Būdas leidžia įvertinti aplinkos netolygumą dviem parametrais: pėdų koordinacių dispersija ir kampu tarp plokštumų. Standartinė kvadratinė nuokrypa apskaičiuojama paprastai, ir rezultatas parodo pėdų nukrypimus nuo bendrojo vidurkio. Tokie paprasti skaičiavimai neap-

krauna roboto valdiklio. Pagal kampą tarp plokštumų nesunkiai apskaičiuojama roboto kūno padėtis erdvėje.

Tikėtina, kad visą aplinkos netolygumą galima įvertinti tik vertinant plokštumų tarpusavio padėtį. Tam reikalingi papildomi bandymai. Pasiteisinus šiam teiginiui, bus galima nenaudoti paviršiaus netolygumo vertinimo pagal pėdų koordinacių standartinę nuokrypą.

Tolimesnis tyrimų tikslas yra nustatyti optimalias paviršiaus netolygumo ribas kiekvienai eisenai ir valdymo būdai bei parinkti tinkamiausią sprendimų generavimo metodą.

Literatūra

- Alonso-Puig, A. 2006. Application of Waves displacement algorithms for the generation of gaits in an all terrain hexapod, in *Proceedings of 8th International Conference on Climbing and Walking Robots 2006*, 343–348.
- Baoling, H.; Qingsheng L.; Qiuli, W.; Xiaochuan, Z. 2006. A Research on Hexapod Walking Bio-robot's Working Space and Flexibility, in *Proceedings of the 2006 IEEE: International Conference on Robotics and Biomimetics*, 813–817.
- Kazuo, T., Shinya A., Katsuyoshi, T. 2003. A Turning Strategy of a Multi-Legged Locomotion Robot, in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, 227–232.
- Luneckas, T.; Udris, D. 2009. Optimization of Hexapod Robot Locomotion, in *Electrical and Control Technologies ECT-2009, 4th international conference*, 40–43.
- Schoenberg, J. R.; Campbell, M. 2009. Distributed Terrain Estimation Using a Mixture-Model Based Algorithm, in *12th International Conference on Information Fusion*, 960–967.

EVALUATING TERRAIN IRREGULARITY BY ROBOT POSTURE

T. Luneckas

Abstract

A method that allows evaluate the terrain irregularity by a robot posture is presented in this paper. A necessity to evaluate terrain irregularity is pointed out. Description of irregular terrain is given. A possibility to evaluate terrain irregularity by feet coordinate standard deviation is proposed. When deviation is $\sigma = 0$, all robots are in one plane. Bigger σ the more robot legs are scattered, meaning robot is walking in irregular terrain. A method to evaluate robot horizontality according to terrain by position of three planes is introduced.

Keywords: hexapod robot, terrain evaluation, feet coordinate deviation, angle between three planes.