



ŽEMĖS PAVIRŠIAUS LŪŽIO LINIJOS PADĖTIES NUSTATYMAS LOKALIAI PRITAİKANT PLOKŠTUMAS

Žilvinas Stankevičius

*Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva
El. paštas gkk@vgtu.lt*

Įteikta 2010 01 11; priimta 2010 04 01

Santrauka. Straipsnyje pristatomas sukurtas LIDAR skenuotų taškų apdorojimo metodas. Taškų klasifikavimo metodas pagrįstas taškų atrinkimu artimoje gretimybėje ir lokalsios plokštumos pritaikymu. Lokaliai plokštumai pritaikyti skaičiuojamos tikrinių vektorių reikšmės, taikomas Jacobi iteracijų metodas. Sukurtoji preliminarini šlaito viršaus ir apačios linija tikslinama pritaikant lokalias plokštumas kairėje ir dešinėje kiekvieno segmento pusėje. Pagal aprašytą algoritmą sukurtos kompiuterinės programos. Testinėje teritorijoje išbandytas siūlomo metodo patikimumas. Lyginant rezultatus su tradiciniais kartografavimo metodais toje pačioje teritorijoje gautais duomenimis, parinktos tinkamos algoritmo parametrų reikšmės. Eksperimento rezultatai patvirtino, kad sudarius šį algoritmą galima pasiekti M 1:1000 ir smulkesnių mastelių planų kokybę.

Reikšminiai žodžiai: LIDAR, skaitmeninis paviršiaus modelis, plokštumos pritaikymas, lokalsis paviršius, lūžio linija, tikrinė reikšmė, tikrinis vektorius.

1. Įvadas

Lazerinio skenavimo (LS) iš orlaivio sistemos tobulinamos. Daugkartinių lazerio impulso atspindžių fiksavimas leidžia klasifikuoti matuojamus paviršiaus taškus, atsispindėjusio nuo paviršiaus lazerinio impulso formos apdorojimo metodai teikia galimybę atpažinti lokalaus paviršiaus formą ir medžiagą (Clement *et al.* 2009). Lazerinio skenavimo iš orlaivio būdu išmatuotų taškų padėties plane ir aukščių tikslumas (Žalnierukas, Čypas 2006) pakankamas, kad jais būtų remiamasi kuriant teritorinio planavimo, projektavimo lokaliuose vietovėse sprendinius. LS išmatuotų taškų masyvas detalai apibūdina vietovę, tačiau tinka naudoti tik sukūrus skaitmeninius vietovės reljefo (SRM) arba išvestinius vietovės objektų modelius, t. y. vartotojo poreikiui pritaikytus kartografinius produktus.

SRM plačiai taikomas vizualizuoti vietovę 3D erdvėje, kurti paviršiaus 2D atvaizdus (izohipsės, spalvinis izohipsėmis apribotų plotų žymėjimas) erdvinei analizei. Kuriant SRM atsižvelgiama į naudotojo poreikius, taikomi filtravimo, retinimo algoritmai (Stankevičius, Kalantaitė 2009). Kitas kartografinis produktas yra vietovės objektų modeliai, tokie, kaip pastatai, reljefo lūžio linijos (šlaitai, skardžiai). Reljefo lūžio linijos reikalingos žemėlapiams kurti ir yra atrama kuriant planavimo sprendinius, t. y. reljefo lūžio linijos yra georeferenciniai objektai.

Esminis žinomų reljefo lūžio linijų kūrimo pagal LS taškus metodų skirtumas yra originalių taškų (Kraus, Pfeifer 2001; Briese 2004, 2006; Brzank *et al.* 2005) arba interpoliuotojo rastrinio SRM taikymas (Gomes-Pereira *et al.* 1999; Forstner 1998; Brügelmann 2000). R. Brügelmann (2000) nurodė gautų rezultatų tikslumą. Planinėje padėtyje automatiškai sukurtos reljefo lūžio linijos nuo stereofotogrametriniu prietaisu sukurtų linijų vidutiniškai skyrėsi 0,59 m, ekstremumai siekė 1,5 m. Testinė teritorija buvo skenuota 7 taškų kvadratiniam metrui tankumu, sukurtas trikampių tinklas konvertuotas į 0,5 m elemento dydžio rastrinį SRM. Rastro pustonių intervalas atitiko 5 cm aukščio intervalą.

Interpoliuotoju SRM pagrįsti algoritmai formuoja lūžio briaunas, tinkamas smulkiojo mastelio žemėlapiams ir jų pagrindu sprendžiamiems uždaviniams. Naudojantis originaliais LS taškais algoritmai sukuria tikslesnes lūžio briaunas. Straipsnyje aprašytas sudarytas originalus reljefo lūžio linijų kūrimo pagal originalius LS taškus algoritmas. Algoritmas automatizuotai sukuria georeferencines reljefo lūžio linijas, kurios reikalingos nustatant paviršinio vandens apsaugos zonas (Kučas, Melkūnas 2005), įvairaus mastelio planus (Vieningas georeferencinių... 2007), hibridinius SRM (Kraus, Pfeifer 2001). Straipsnyje nagrinėjama sukurtuoju metodu sukonstruotų reljefo lūžio linijų tikslumas ir kaip tai atitinka taikymo sričių reikalavimus.

2. Ankstesnių tyrimų apžvalga

Pagrindinė idėja kuriant reljefo lūžio linijas pagal LS originalius taškus yra, parenkant žinomą tinkamą matematinę funkciją, sukurti lokalųjį paviršių, artimą lūžio linijai. Taikomos įvairios paviršiaus pritaikymo funkcijos ir jų kombinacijos. Funkcijos parametrai dažniausiai nustatomi mažiausiųjų kvadratų metodu.

K. Kraus ir N. Pfeifer (2001), C. Briese (2004, 2006) 3D reljefo lūžio linijos atkarpa sukurti taikė dviejų plokštumų (vienoje ir kitoje lūžio linijos pusėje) metodą. LS taškai skaidomi į kairę ir dešinę lūžio linijos atkarpos puses. Taikant šį metodą būtinos apytikslės 2D linijos arba pradinis taškas. Šiuo būdu konstruojant 3D reljefo lūžio liniją esminis žingsnis yra jos plėtimo procesas. C. Briese (2004) naudodamas 2D liniją taikė plėtimą pirmosios lūžio linijos atkarpos, t. y. dviejų plokštumų sankirtos linijos, kryptimi. Gi kai lūžio linija staigiai keičia kryptį, plėtimo krypties nustatymo problema išliko. Pateiktas dalinis problemos sprendimas – padidinti plokštumų porų sanklotą. Kai pirminis taškas 2D, C. Briese taikė antrosios eilės paviršių. Atliekant pagrindinių antrosios eilės paviršiaus ašių transformavimo analizę akivaizdi lūžio linijos plėtimo kryptis, t. y. mažiausiąją tikrinę reikšmę atitinkančio tikrinio vektoriaus kryptis.

A. Brzank ir kt. (2005) išplėtojo C. Briese (2004) algoritmą. Pirmu etapu apytikslėms 2D reljefo lūžio linijoms nustatyti autoriai naudoja rastrinį SRM. Kitu etapu pritaikoma hiperbolinio paviršiaus funkcija. Algoritmas sukuria pavienes lūžio linijos atkarpas. Jas sujungti tarpusavyje liko problema.

Artimas pagal metodiką yra A. Sampath ir J. Shan (2006) algoritmas, skaidantis LS taškus pagal jų priklausomybę tam tikroms pastato stogo plokštumoms. Taškams išskaidyti autoriai taikė LS taškų grupių kovariacijų matricas ir jų tikrinių vektorių reikšmių analizę. Laikoma, kad jei mažiausias kovariacijų matricos tikrinis dydis yra artimas nuliui, LS taškų grupė yra vienoje plokštumoje, jei kitaip – LS taškų grupė ties dviejų plokštumų sankirta. Autorius briaunų 3D linijų nekūrė.

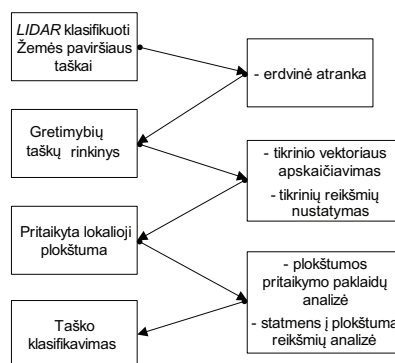
Analizuojant publikacijas akivaizdu, kad reljefo lūžio briaunų formavimo algoritmai aktyviai tyrinėjami, publikuojami metodai turi trūkumų, jų taikymo praktikoje galimybės neapibrėžtos. Autoriai nepateikia išsamių rezultatų taikymo praktikoje galimybių analizės.

3. Algoritmo aprašymas

Šiame skyriuje aprašoma sukurta preliminarios reljefo lūžio linijos padėties nustatymo, klasifikuojant LS taškus, ir preliminarios linijos patikslinimo, perkeliant lokaliai pritaikytas plokštumų poras, metodika. Metodika realizuota remiantis iki šiol sukauptomis žiniomis apie plokštumų taikymą 3D taškų rinkiniams. Siūlomas naujas būdas atrinkti arti reljefo lūžio linijos esančius taškus preliminariai lūžio linijai sukurti ir būdas patikslinti sukurto preliminarią liniją perstumiant linijos atkarpoms lokaliai sukurtas plokštumų poras.

Plokštuma 3D taškų rinkiniui gali būti pritaikoma pagal įvairias metodikas. Metodikos parinkimas priklauso nuo 3D taškų rinkinio matavimų duomenų, o atitinkamai ir taškų išsidėstymo pobūdžio. Kai skenavimo iš lėktuvo ruožų duomenys sujungti į vieną rinkinį, sanklotą

sudaranciuose ruožuose (t. y. didžiausiu atstumu nuo tam tikros padėties lėktuvo) taškai išmatuojami ant atraminių sienų, skardžių šonų. Pritaikant plokštumą vertikaliems ar beveik vertikaliems paviršiams, svarbu yra vertikalus atstumas nuo plokštumos iki taško, o ne aukščio skirtumas vertikaleje nuo taško iki plokštumos. Nors vertikaliąsias plokštumas išreiškiančių taškų, skenuojant iš orlaivio, išmatuojama santykinai nedaug, buvo siekiama, kad sukurtasis algoritmas, pakeitus 3D taškų atrankos funkciją, tiktų plokštumų briaunoms atpažinti antžeminio skenavimo erdviųjų duomenų rinkiniuose. Plokštumų pritaikymo ir taškų klasifikavimo algoritmo principinė schema pavaizduotas 1 paveiksle.



1 pav. Plokštumų pritaikymo ir taškų klasifikavimo algoritmas

Fig. 1. The algorithm of plane fitting and point classification

Mažiausiųjų kvadratų metodu taikoma $z = ax + by + c$ tam tikrai duomenų apimčiai, laikant, kad plokštumos pritaikymo taškų rinkiniui netikslumai pasiskirstę z kryptimi. Toks metodas geriausiai tinka ortogonaliesiems duomenims, t. y. tiems, kurie gali būti atvaizduoti ortografinėje projekcijoje (Wang *et al.* 2001).

Algoritme tikrinių vektorių apskaičiavimo metodu statmenys minimizuojami nuo taško į plokštumą, o ne vertikalus atstumas – nuo taško iki plokštumos. Taikoma $ax + by + cz + d = 0$ pagal ribojimą $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ ir gaunamas optimalus plokštumos įvertinimas pritaikant tuo atveju, kai plokštumos pritaikymo taškų rinkiniui paklaidos yra pasiskirsčiusios kryptimi, statmena pritaikomai plokštumai (Wang *et al.* 2001). Toliau pateikiamas išsamesnis sukurto algoritmo aprašymas.

Plokštuma apibrėžiama kaip

$$ax + by + cz = d. \quad (1)$$

Taško atstumas nuo plokštumos (1) R_i yra

$$r_i = ax_i + by_i + cz_i - d, \quad (2)$$

laikant, kad tai yra normalizuotoji plokštuma, t. y. $a^2 + b^2 + c^2 = 1$:

$$r_i = (ax_i + by_i + cz_i - d) / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}. \quad (3)$$

Mažiausiųjų kvadratų plokštumai apibrėžti laikome, kad taškų rinkinio (koordinatės x_i, y_i, z_i) taškų suma yra n ; taškų rinkinį siekiama minimizuoti kaip Q :

$$Q = \sum_{i=1}^n r_i^2. \quad (4)$$

Taikant (2),

$$Q = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i - d)^2. \quad (5)$$

Dalinės išvestinės pagal (5):

$$\partial Q / \partial a = \sum_{i=1}^n 2x_i (ax_i + by_i + cz_i - d) = 0, \quad (6)$$

$$\partial Q / \partial b = \sum_{i=1}^n 2y_i (ax_i + by_i + cz_i - d) = 0, \quad (7)$$

$$\partial Q / \partial c = \sum_{i=1}^n 2z_i (ax_i + by_i + cz_i - d) = 0, \quad (8)$$

$$\partial Q / \partial d = \sum_{i=1}^n -2(ax_i + by_i + cz_i - d) = 0. \quad (9)$$

Lygtis (9) gali būti perrašyta:

$$d = ax_0 + by_0 + cz_0, \quad (10)$$

čia $x_0 = \sum_{i=1}^n x_i / n$; $y_0 = \sum_{i=1}^n y_i / n$; $z_0 = \sum_{i=1}^n z_i / n$.

Lygtis (10) rodo, kad geriausiai tinkanti 3D taškų rinkiniui plokštuma eina per masių centrą. Atimdami iš kiekvieno taško masių centrą ir įrašydami į (6–8), gauname rinkinį lygčių, kurios gali būti išreikštos:

$$WP = 0, \quad (11)$$

čia

$$W = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 & \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(y - y_0) & \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(z - z_0) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(y - y_0) & \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 & \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)(z - z_0) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(z - z_0) & \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)(z - z_0) & \sum_{i=1}^n (z_i - z_0)^2 \end{pmatrix}$$

$$P = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}.$$

Kad gautume mažiausiųjų kvadratų plokštumą, reikia išspręsti lygtį (11). Lygtis (11) gali turėti sprendinį $a = b = c = 0$. Tokio sprendimo išvengiama prie plokštumos koeficientų įvedant sąlygą

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1. \quad (12)$$

Kartu su sąlyga (12) galima matyti, kad sprendžiant (11) problemiška apskaičiuoti tikrinę vertę, t. y.

$$WP = VE, \quad (13)$$

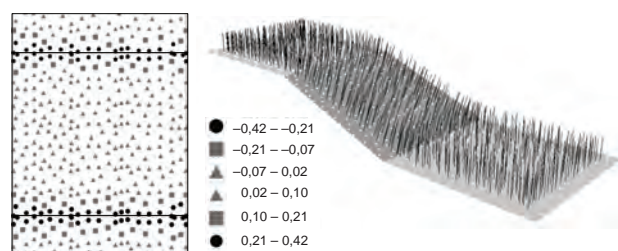
čia V – tikrinės vertės, o E – tikriniai vektoriai. Lygties (13) sprendinys suteikia 3 tikrines vertes ir 3×3 tikrinių vektorių matricą. Tikrinės vertės yra atstumų nuo pritaikytos plokštumos kvadratų suma, o tikriniai vektoriai su-

teikia 3 rinkinius (matricos E stulpelius) a, b, c reikšmių. Lieka parinkti a, b, c rinkinį, susijusį su mažiausiąja tikraja verte.

Pagal spkaičiuotoje E matricoje esančius 3 a, b, c parametrų rinkinius plokštumos yra statmenos viena kitai. 3 rinkiniai išreiškia geriausią, tarpinę ir blogiausiai pritaikytą plokštumas. Jeigu tikrosios vertės yra tokios pačios (atitinka leistinąjį skaičiavimo tikslumą), tai rodo, kad 3D taškai išsidėstę simetriškai, ir plokštumos pritaikyti neįmanoma.

Matematinė skaičiavimų programinėse įrangose (pvz., *Matlab*) yra realizuoti tikrinių reikšmių ir tikrinių vektorių skaičiavimo paieškos algoritmai. Kadangi siekta sudaryti plokštumos pritaikymo ir briaunų nustatymo algoritmą, veikiančią vienoje programinėje aplinkoje, buvo sukurtas programinis modulis *ESRI ArcMap* programinei įrangai, skaičiuojantis tikrines reikšmes ir vektorius. Kompiuterinei programai sukurti taikytas *Jacobi* metodas (William *et al.* 1992). Sukurtoje programoje, realizuojančioje *Jacobi* metodą, iteracijų (*Jacobi rotation*) kiekis apribotas iki 20 kartų. Kiekviena iteracija atitinka plokštumos pasukimą ir skirta vienam iš nedidelių sudarytos W matricos elementų panaikinti.

Jacobi metodu sukurtas algoritmas įgauna statmens \vec{p} plokštumą vektoriaus kryptį, kai plokštumos normalinė lygtis yra $x \cos a + y \cos b + z \cos c - d = 0$, čia d – plokštumos atstumas nuo koordinatų pradžios taško. Atstumai nuo kiekvieno taško iki pritaikytos plokštumos taikomi vidutinei kvadratinei klaidai apskaičiuoti. Algoritmas tikrina, ar gautos tikrinės reikšmės nėra tokios pačios pagal reikalaujamą skaičiavimo tikslumą. Tokiu atveju taškai yra išsidėstę simetriškai vienas kito atžvilgiu, ir plokštuma negali būti pritaikyta. 2 pav. parodyti LS matavimo taškai, klasifikuoti kiekvienam iš jų pritaikius lokalią plokštumą.

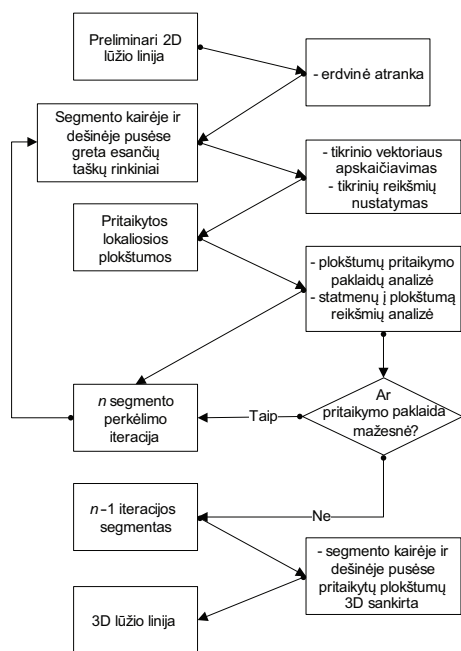


2 pav. 20° šlaitą išreiškiančių teorinių duomenų rinkinio taškai, klasifikuoti pagal centrinių taškų atstumų nuo pritaikytų plokštumų reikšmes (m)

Fig. 2. Data on a 20° slope classified by the distances of the fitted plane (distance, m)

Tolesnis algoritmo eigos principas parodytas 3 paveiksle. Kairėje ir dešinėje pusėje preliminariai sukurtos linijos segmentų kuriami stačiakampiai. Pagal šiuos stačiakampius 2D erdvėje rūšiuojami lazerinio skenavimo taškai ir jiems pritaikomos plokštumos.

Kitu žingsniu segmentas perstumiamas lygiagrečiai su segmento ašimi, ir kartojamos taškų atrankos ir plokštumų pritaikymo procedūros. Lyginamos plokštumų pritaikymo liekamosios vidutinės kvadratinės klaidos. Jeigu klaidos mažesnės negu prieš tai buvusioje iteracijoje, segmentas perstumiamas dar vienu žingsniu. Priešingai – sugrąžinamas į ankstesnę padėtį, ir iteracijos nutraukiamos.



3 pav. Preliminarios lūžio linijos patikslinimo algoritmas

Fig. 3. The algorithm of approximate line revising

Optimalių parametrų parinkimo eksperimentas aprašytas kitame skyriuje.

Galutinis sukurtos programinės įrangos žingsnis yra sankirta stačiakampių dešinėje ir kairėje segmento pusėje. Siekiama gauti 3D liniją. Dviejų 3D stačiakampių sankirtos 3D linijai rasti sukurta programinė įranga. Metodas grindžiamas testu, kuriuo nustatomi stačiakampio kampų atstumai iki gretimo stačiakampio plokštumos. Aprašant 1 plokštumą su joje esančiais taškais V kaip

$$N_1 \cdot V + d_1 = 0 \quad (14)$$

(čia N_1 yra gretimų stačiakampio kraštinių vektorių vektorinė sandauga, t. y. 1 plokštumos normalinis vektorius)

$$N_1 = (V_1^1 - V_0^1) \times (V_2^1 - V_0^1), \quad (15)$$

čia V^1 yra 1 stačiakampio viršūnėse esantys taškai. 1 plokštumoje esančio vektoriaus (viršūnės taško) ir 1 plokštumoje – normalinio vektoriaus skaliarinę sandaugą pažymime d_1 :

$$d_1 = N_1 \cdot V_0^1. \quad (16)$$

Tada 2 stačiakampio viršūnės atstumo iki kito stačiakampio plokštumos ženklą reikšmė nustatoma:

$$d_i = N_1 \cdot V_i^2 - d_1, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (17)$$

Loginėje išraiškoje tiriami testo rezultatai: kad rezultatas būtų teigiamas, dviejų kiekvieno stačiakampio kraštinių viršūnių atstumai iki kito stačiakampio plokštumos turi turėti skirtingus ženklus, t. y. nustatoma, ar 1 stačiakampis kerta 2 stačiakampio plokštumą ir ar 2 stačiakampis kerta 1 stačiakampio plokštumą. Esant teigiamam testo rezultatui išsaugomos pirmo stačiakampio kraštinės a_1 ir b_1 , kertančios 2 stačiakampio plokštumą, ir atitinkamai 2 stačiakampio kraštinės a_2 , b_2 .

Algoritmas tęsiamas ir ieškoma, ar stačiakampiai kertasi tarpusavyje. Tam tikslui nustatome šių atkarpų sankirtos su plokštumomis taškus, t. y. sprendžiamas linijos ir plokštumos sankirtos uždavinys.

Taško, esančio atkarpoje a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , koordinatės x , y , z gali būti išreiškiamos parametrinių lygčių sistema:

$$\begin{aligned} x &= tx_2 + (1-t)x_1, \\ y &= ty_2 + (1-t)y_1, \\ z &= tz_2 + (1-t)z_1, \end{aligned} \quad (18)$$

čia t yra parametras iš intervalo $[0, 1]$, x_n , y_n , z_n – atitinkamų atkarpų pradžios ir pabaigos koordinatės. Sankirtos taško koordinatės algoritme skaičiuojamos randant parametą t . Panaudojamas sprendinys, rastas į plokštumos lygtį įrašant atkarpos parametrinę išraišką $(1-t)v_0 + tv_1$:

$$N_1 \cdot ((1-t)v_0 + tv_1) + d_1 = 0, \quad (19)$$

$$t = N_1 \cdot v_0 + d_1 / N_1 (v_1 - v_0).$$

Aprašytoju būdu gaunami 4 plokštumų ir atkarpų sankirtos taškai: 1 stačiakampio sankirtos su 2 stačiakampio plokštuma taškai at_1 , at_2 ir atitinkamai bt_1 , bt_2 . Toliau algoritmas nustato, tarp kurių sankirtos taškų turi būti sukurta 3D sankirtos atkarpa. Jeigu 1 stačiakampio atkarpų su 2 stačiakampio plokštuma sankirtos taškai sutampa su 2 stačiakampio atkarpų sankirtos taškais, sankirtos intervalas yra vienas, ir rūšiuoti taškų nereikia – tikrinamas tik vieno taško, gauto iš 1 stačiakampio atkarpos ir plokštumos sankirtos, sutapimas su taškais iš 2 stačiakampio.

Taškai rūšiuojami projektuojant į X , Y arba Z koordinatinių ašį. Ašis parenkama taip, kad atitinkamos koordinatinių reikšmės būtų skirtingos. Taškai rūšiuojami pagal koordinatės reikšmę. Sankirtos atkarpa egzistuoja tada, kai nustatyta taškų pora yra iš skirtingų stačiakampių atkarpų:

$$At_1 < At_2 < Bt_1 < Bt_2 - \text{sankirta intervalas } [At_2, Bt_1],$$

$$At_2 < At_1x < Bt_2x < Bt_1 - \text{sankirta intervalas } [At_1, Bt_2],$$

$$At_1 < At_2 < Bt_2 < Bt_1 - \text{sankirta intervalas } [At_2, B_2],$$

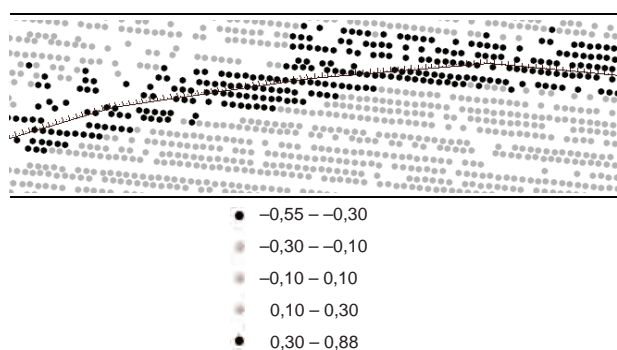
$$At_2 < At_1 < Bt_1 < Bt_2 - \text{sankirta intervalas } [At_1, B_1],$$

$$At_1 < Bt_1x < At_2 < Bt_2 - \text{sankirtos nėra,}$$

$$At_2x < Bt_2 < At_1x < Bt_1 - \text{sankirtos nėra.}$$

4. Algoritmo parametrų įtakos rezultatams nustatymo eksperimentas

Algoritmas testuotas pagal Vilniaus skenavimo iš oro duomenis. Atstumai tarp matavimo taškų – 0,50–1,40 m. Absoliutusis altimetrinis matavimų taškų tikslumas nebuvo tirtas, nes atliekant eksperimentą svarbios ne sistemingosios klaidos, o pavienių matavimų santykinės klaidos (triukšmas). Santykiniam LS matavimų tikslumui nustatyti buvo panaudoti 4 horizontalių aikštelių LS matavimų duomenys. Nustatytoji altimetrinės vidutinės kvadratinės klaidos reikšmė kiekvienoje aikštelėje



4 pav. LS taškų klasifikavimas testinėje teritorijoje (atstumas metrais)

Fig. 4. The classification of LIDAR points in the tested territory (distance, m)

lygi 0,03 m. Tai rodo, kad, geriausiu atveju, lokali plokštuma gali būti pritaikyta su 0,03 m vidutine kvadratine paklaida.

Empiriniu būdu nustatyta, kad LS taškams klasifikuoti, t. y. nustatyti, kurie naudotini šlaito linijai preliminariai kurti, reikia analizuoti taškus, esančius 5 m spindulio apskritime. Tokiu atveju gretimybės apima nuo 31 iki 202 LS taškų testinėje teritorijoje.

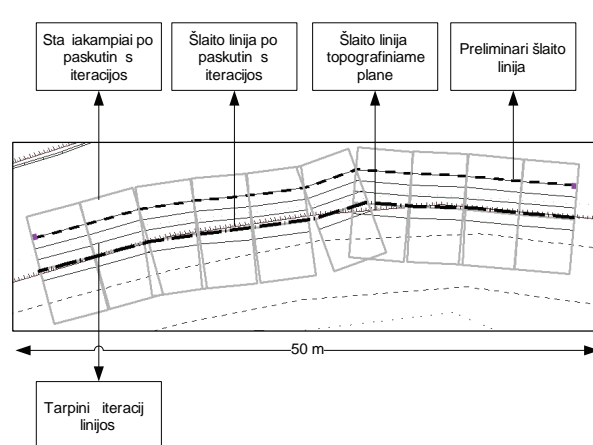
LS taškai klasifikuojami, ir taip randama preliminari šlaito linija pagal paieškos arealo centrinio taško atstumą nuo pritaikytos plokštumos. Nustatyta, kad patikimai atrinkti taškus, esančius ant reljefo briaunos, galima parenkant minimalią parametro reikšmę, lygią 0,30 m. 4 pav. parodytas LS taškų klasifikavimo testinėje teritorijoje rezultatas.

Eksperimentui tęsti preliminari šlaito linija sukurta klaidingai – šiaurinėje klasifikuotų taškų dalyje (5 pav.). Preliminariai šlaito linijai patikslinti empiriniu būdu parinktas kiekvieno preliminarios šlaito linijos segmento gretimybę apibrėžiančio stačiakampio kraštinių ilgis 5×5 m. Pagrindinis parametras yra plokštumos kairėje preliminarios šlaito linijos pusėje pritaikymo vidutinė kvadratinė klaida mp_k ir atitinkamai dešinėje pusėje – mp_d . Algoritmo sudarymo metodo esmė – lyginti gautas einašios ir ankstesnės iteracijos plokštumų pritaikymo kairėje ir dešinėje linijos pusėse vidutinės kvadratinės paklaidas mp . Eksperimento metu nustatyta, kad kai $|mp^k - mp^d| < 0,05m$, preliminarios linijos segmento perstūmimas į geriau pritaikytos plokštumos pusę galutiniam rezultatams įtakos neturi, t. y. šlaito linija pastumiama išlaikant stambiojo mastelio planų planimetrinį tikslumą. Kitu atveju $mp^k > mp^d$ segmentas perkeliamas per 1 m į kairę pusę; kai $mp^k < mp^d$ – į dešinę pusę, kai $mp^k = mp^d$, segmentas neperkeliamas. Kitos iteracijos i parametrai siejasi su sąlygomis: $i < 5$,

$$|(mp_{i+1}^k + mp_{i+1}^d) - (mp_i^k + mp_i^d)| \leq 0,02 \text{ m,}$$

$$|(mp_{i+1}^k + mp_{i+1}^d) \leq (mp_i^k + mp_i^d)|.$$

Jei sąlygos neįvykdytos, t. y. kita iteracija pablogino rezultatus arba nepagerino rezultatų, šlaito linijos



5 pav. Pagal parinktus parametrus sukurta šlaito linija

Fig. 5. Surface break line created by choosing parameters

segmentui sukurti naudojami priešpaskutinės iteracijos rezultatai. 5 pav. parodytas eksperimento rezultatas.

Kaip matyti iš 1 lentelės, automatizuotai patikslintos preliminarios šlaito viršaus linijos padėties skirtumų nuo M 1:500 mastelio topografiniame plane išmatuotos linijos vidurkis yra 0,28 m (nuokrypiai matuoti kiekvienos stačiakampių poros viduryje, t. y. kas 5 m). Remiantis GKTR 2.08.01.:2000 reikalavimais, kurie keliami planimetriniam topografinių objektų tikslumui (0,5 mm plane), patikslinta šlaito viršaus linija atitinka reikalavimus, keliamus M 1:1000 ir smulkesniems masteliams. Pagal lentelėje pateiktus rezultatus ir 5 pav. matyti, kad nukrypimų ekstremumai yra šlaito linijos posūkio taškuose. Tai rodo, kad raižytoje vietovėje stačiakampių kraštinės ilgis turi būti mažinamas.

1 lentelė. Planimetriniai patikslintos reljefo lūžio linijos nuokrypiai, m

Table 1. Differences between revised and real break line of surface, m

Pritaikytų plokštumų poros									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,27	0,13	0,17	0,26	0,40	0,30	0,47	0,32	0,23	0,23

5. Išvados

1. Sukurtas reljefo briaunų vietos automatinio nustatymo algoritmas. Sukurto šlaito viršaus ar apačios linijos planimetrinė padėtis atitinka M 1:1000 ir smulkesnių mastelių žemėlapių reikalavimus.
2. Algoritmas realizuotas programinės įrangos Arc-Map aplinkoje taikant VBA (Visual Basic for Application) funkcijas. Tokia realizacija leidžia naudoti standartinės erdvinį duomenų saugojimo duomenų bazėse ir vaizdavimo priemones.
3. Nustatyti reljefo briaunos atpažinimo perstumiant preliminarų šlaito segmentą parametrai. Nustatyta, kad stačiakampių kraštinės ilgio parametras turi būti adaptuojamas pagal lokaliai teritorijos reljefo požymius.

4. Nustatytoji LS matavimų altimetrinė vidutinės kvadratinės klaidos reikšmė lygi 0,03 m, t. y., geriausiu atveju, lokaliai plokštuma gali būti pritaikyta su 0,03 m vidutine kvadratine paklaida.
5. LS taškams, esantiems arti reljefo lūžio briaunos, klasifikuoti empiriniu būdu nustatyta gretimybės 5 m spinduliu.
6. Nustatyta, kad patikimai atrinkti taškus, esančius arti reljefo briaunos, galima parenkant centrinio taško atstumo nuo pritaikytos plokštumos parametro minimalią reikšmę, ji lygi 0,30 m.
7. Testinėje teritorijoje gauti rezultatai rodo, kad, siekiant sukurti automatizuotą reljefo lūžio linijų pradinių taškų paieškos ir linijų plėtros algoritmą, metodikos pagrindus tikslinga plėtoti.

Literatūra

- Briese, C. 2004. Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* XXXV(B3). Istanbul, Turkey.
- Briese, C. 2006. *Structure Line Modelling Based On Terrestrial Laserscanner Data*. Commission V, WG V/3. IAPRS Vol. XXXVI, Part 5, Dresden.
- Brügelmann, R. 2000. Automatic breakline detection from airborne laser range data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33(B3): 109–115.
- Brzank, A.; Lohmann, P.; Heipke, C. 2005. *Automated extraction of pair wise structure lines using airborne laserscanner data in coastal areas*. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands.
- Clément Mallet and Frédéric Bretar. 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(1 January): 1–16.
- Forstner, W. 1998. Image processing for feature extraction in digital intensity, color and range images, in *Proc. of the International Summer School on 'Data Analysis and Statistical Foundations of Geomatics'*, Greece, May, Springer Lecture Notes on Earth Sciences.
- Gomes-Pereira, L. and Wicherson, R. 1999. Suitability of laser data for deriving geographical information – a case study in the context of management of fluvial zones, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54(2–3): 105–114. doi:10.1016/S0924-2716(99)00007-6
- Kraus, K. and Pfeifer, N. 2001. Advanced DTM generation from LIDAR data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* XXXIV(3/W4). Annapolis, MD, USA, 23–30.
- Kučas, A.; Melkūnas, R. 2005. The System for Digital Modelling of Bank Protection Belts and Zones for Surface Water Bodies By Changing Normative Parameters, in *The 6th International Conference*, May 26–27, 2005.
- Sampath Aparajithan, Shan Jie. 2006. *Clustering Based Planar Roof Extraction From Lidar Data*. ASPRS 2006 Annual Conference Reno, Nevada.
- Stankevičius, Ž.; Kalantaitė, A. 2009. LIDAR žemės paviršiaus taškų masyvo supaprastinimo algoritmų parametrų parinkimas, *Geodezija ir kartografija* [Geodesy and Cartography] 35(2): 44–49. doi:10.3846/1392-1541.2009.35.44-49
- Vieningas georeferencinių duomenų modelis. *Geoobjektų katalogas*. 2007. Lietuvos geografinės informacijos infrastruktūros (LGII) informacinių sistemų sukūrimas ir įdiegimas. VĮ Distancinių tyrimų ir geoinformatikos centras „GIS-centras“.
- Wang, C.; Tanahashi, H.; Niwa, Y. and Yamamoto, K. 2001. *Comparison of Local Plane Fitting Methods for Range Data*. Vol. 1: I-663-9, Vol. 2 (xxx+1186+806). Publisher: IEEE Comput. Soc Country of Publication: USA.
- William, H.; Saul, A.; William, T.; Brian, P. 1992. Numerical Recipes, in *C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University Press, 463–469.
- Žalnierukas, A.; Čypas, K. 2006. Žemės skenavimo lazeriu iš orlaivio technologijos analizė, *Geodezija ir kartografija* [Geodesy and Cartography] 32(4): 101–105.

Žilvinas STANKEVIČIUS, Associate Professor, Doctor. Vilnius Gediminas Technical University, Dept of Geodesy and Cadastre, Saulėtekio al. 1, LT-10223 Vilnius, Lithuania (Ph +370 5 2744703, fax. +370 5 2744705), e-mail: zilvinas.stankevicius@vgtu.lt.

A graduate of Vilnius Gediminas Technical University: engineer of geodesy, 1993; master of science, 1995; doctor, 2000. Author and co-author of 18 publications.

Research interests: processing data of aero scanning, 3D computational geometry and computer graphics, technology to manipulate geographic data base.