

Odhad sférických plôch z mračien bodov

Ing. Richard Honti,
Katedra geodézie,
Stavebná fakulta, STU v Bratislave

Abstrakt

Získať obrovské množstvo priestorových údajov je dnes možné za relatívne krátky čas. Po získaní týchto údajov, ďalším krokom, je ich spracovanie. Automatizácia jednotlivých krokov spracovania môže prispieť k zvýšeniu efektivity, k zníženiu času potrebného na spracovanie a k zníženiu potreby užívateľských interakcií. V článku je uvedený stručný popis možných metód pre odhad sférických plôch z mračien bodov. Ďalej bol navrhnutý inovatívny algoritmus na účel automatizácie detekcie a segmentácie sfér v mračnách bodov. Bolo vykonané experimentálne testovanie algoritmu na komplexných mračnách bodov. Navrhnutý algoritmus bol implementovaný do samostatnej aplikácie v softvéri MATLAB®.

Extraction of Spherical Surfaces from Point Clouds

Abstract

Nowadays huge datasets can be collected in a relatively short time. After capturing these data sets the next step is their processing. Automation of the processing steps can contribute to efficiency increase, to reduction of the time needed for processing, and to reduction of interactions of the user. The paper brings a short review of the most reliable methods for sphere segmentation. An innovative algorithm for automated detection of spheres and for estimating their parameters from 3D point clouds is introduced. The algorithm proposed was tested on complex point clouds. Finally the implementation of the algorithm proposed to a standalone application is described.

Keywords: automated data processing, point clouds, sphere extraction, segmentation

1. Úvod

Mračná bodov sa v súčasnosti dajú získať relatívne rýchlo a jednoducho, čoho výsledkom je, že sa stávajú čoraz viac používanou prvotnou digitálnou reprezentáciou stavebných objektov. Mračná bodov ale vo väčšine prípadov obsahujú obrovskú množinu údajov, niekoľko miliónov 3D bodov, práve preto je potrebný vývoj algoritmov na ich spracovanie. Mračná bodov hrajú dôležitú úlohu pri rôznych činnostiach, ako napr. pri tvorbe 3D modelov s vysokou detailnosťou v oblastiach, ako sú interiérový (exteriérový) dizajn, informačné modelovanie stavieb (z angl. Building Information Modeling – BIM), informačné systémy miest a obcí, dokumentácia skutočného vyhotovenia objektov, 3D kataster a pod.

V stavebnom priemysle sa často stretávame s objektmi, ktorých tvar je tvorený zo základných geometrických útvarov, ako sú rovina, valec, sféra. Z tohto dôvodu pri spracovaní mračien bodov zachytávajúcich takéto objekty jedným zo základných krokov je detekcia a odhad geometrických tvarov z mračna. Tejto problematike sa vo svete venuje viacero odborníkov. O možnostiach segmentácie rovín je možné sa dočítať v [1] o segmentácii valcových plôch v [2].

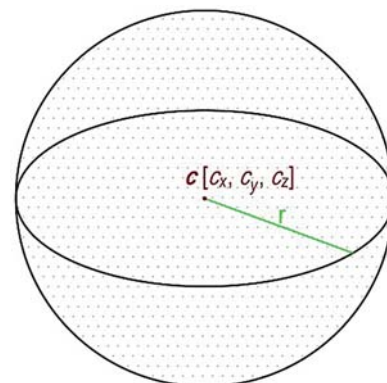
Po rovinných a valcových útvaroch, tretím najčastejšie sa vyskytujúcim geometrickým útvarom v stavebnom priemysle je sféra (resp. guľa). Identifikácia a modelovanie sférických plôch má využitie vo viacerých oblastiach, ako sú napr. reverzné inžinierstvo [3], lekárske zobrazovanie [4], kalibrácia terestrických laserových skenerov (resp. digitálnych kamier) [5], registrácia mračien bodov [6]. Keďže pri viacerých zo spomenutých aplikácií je nutné aby segmentácia sfér bola vykonaná automatizovane a s čo najvyššou presnosťou, tento článok je venovaný práve tejto problematike.

Na začiatku článku sú stručne popísané možné prístupy a metódy na identifikáciu a odhad sfér z 3D mračien bodov. Následne je predstavený navrhnutý algoritmus na segmentáciu sfér. Algoritmus dokáže vykonať segmentáciu plne automatizovane, presne a robustne aj z mračien bodov, ktoré obsahujú šum. Príspevok ďalej predstavuje experimentálne testovanie a výsledky z testovania navrhnutého algoritmu. V poslednej časti je popísaná implementácia algoritmu do samostatnej aplikácie v softvéri MATLAB®.

2. Odhad sfér z mračien bodov

Vo všeobecnosti sférickú plochu je možné popísať so štyrmi parametrami, ktoré sú nasledovné (obr. 1):

- priestorové súradnice stredu sféry ($c [c_x, c_y, c_z]$),
- polomer sféry (r).



Obr. 1 Parametre sférickej plochy

Následne, rovnicu sféry je možné matematicky sformulovať pomocou (1):

$$(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (z - c_z)^2 = r^2, \quad (1)$$

kde x, y a z sú priestorové súradnice bodu na povrchu sférickej plochy.

Segmentácia sfér z mračen bodov sa vo väčšine prípadov vykonáva na základe dvoch prístupov, prvým je RANSAC (z angl. RANdom SAmple Consensus) [7] a druhým je využitie Houghovej transformácie (HT) [8].

Algoritmus RANSAC je definovaný ako iteratívna metóda na určenie parametrov matematického modelu z meryných údajov, ktoré môžu obsahovať aj vybočujúce merania [9]. Tento algoritmus sa dnes často používa na robustný odhad parametrov matematických modelov geometrických tvarov z mračna bodov. RANSAC používa na odhad parametrov modelu minimálny počet náhodne vybraných bodov. Minimálny počet predstavuje najnižší možný počet bodov, ktorý je potrebný pre jednoznačne definovanie daného geometrického útvaru (napr. pre odhad roviny v 3D priestore minimálny počet bodov je 3). Pomocou tejto metódy je možné vykonať segmentáciu rýchlo a presne, avšak v niektorých prípadoch je potrebné si nastaviť niekoľko prahových hodnôt. V prípade komplexných zašumených mračen to môže byť problematické. Ďalšou nevýhodou je, že výsledok segmentácie je závislý od ná-

hodného výberu počiatočného bodu, a v najhoršom prípade sa môže stať, že RANSAC nekonverguje k správnejmu výsledku, teda neodhadne sa sférická plocha, ktorá sa nachádza v mračne. Okrem toho prístupy založené na metóde RANSAC sú väčšinou obmedzené na odhad jednej sféry naraz.

Druhou metódou je HT [10]. HT je jedna z najviac používaných metód, ktorá bola vyvinutá na odhad priamok, následne ale bola rozšírená na odhad parametrických a neparametrických tvarov. Hlavným nedostatkom HT je, že v prípade rozsiahlych a komplexných mračnách segmentačný proces je časovo a výpočtovo náročný. Okrem toho sa takisto väčšinou využíva na odhad jednej sféry naraz. Každá metóda má svoje výhody, ale aj nevýhody, práve preto v praktických aplikáciách sa vo väčšine prípadov využíva ich kombinácia.

3. Navrhnutý algoritmus na automatizovanú segmentáciu a odhad sfér

V rámci tejto sekcie je predstavený navrhnutý algoritmus pre automatizovanú segmentáciu viacerých sfér z mračna bodov naraz. Pseudokód algoritmu je zobrazený na obr. 2. Vstupom do algoritmu je mračno bodov, predpokladaný počet sfér v mračne a prahová hodnota pre odhad sféry – vzdialenostný filter (t_d).

Algoritmus pre automatizovanú segmentáciu viacerých sfér z mračna bodov	
➤ Vstupné údaje:	Point Cloud (*.pts, *.xyz, *.txt); predpokladaný počet sfér v mračne bodov (n_{sphere}); prahová hodnota pre vzdialenostný filter (t_d); $iter := 15$ – maximálny počet iterácií; $sk := 0$ – indikátor pre zle zvolený počiatočný bod.
for $i = 1 : n_{sphere}$	while $sk == 0$
	1. Náhodný výber počiatočného bodu a výber najbližších susedných bodov.
	2. Výpočet približných parametrov sféry $\{c_{init} [c_x; c_y; c_z]; r_{init}\}$ z vybraných bodov.
	for $j = 1 : iter$
	3. výpočet vzdialeností medzi bodom mračna a odhadnutou sférou.
	4. Extrakcia: aktualizácia množiny vyhovujúcich bodov Φ na základe vzdialenostného filtra.
	5. if $iter > 4$ && $size(\Phi) < 200$
	$sk := 0$
	break
	end
	6. if $iter > 5$ && $convergence > \epsilon$
	$sk := 0$
	break
	end
	7. if $iter > 13$ && $std_{fitting} > \vartheta$
	$sk := 0$
	break
	else
	$sk := 1$
	end
	8. Geometrické fitovanie: vyhovujúce body Φ sú použité na prepočet parametrov sféry $\{c [c_x; c_y; c_z]; r\}$.
	end
	9. Φ – body ležiace na povrchu odhadnutej sféry. $\{c [c_x; c_y; c_z]; r\}$ – parametre odhadnutej sféry.
	end
end	
➤ Výsledky:	parametre odhadnutých sfér $\{c [c_x; c_y; c_z]; r; inlier_{number}; std_{fitting}\}$; segmentované mračná (Φ) pre jednotlivé sféry.

Obr. 2 Pseudokód navrhnutého algoritmu

Prvým krokom algoritmu je náhodný výber počiatočného bodu, t. j. algoritmus vyberie jeden bod z mračna náhodne, kde sa začne výpočet. Následne prvý odhad sféry je vykonaný z 50 najbližších susedov pomocou metódy, ktorá minimalizuje ortogonálne vzdialenosti bodov od sféry. Odhadnutými parametrami sú už spomínané parametre ($c [c_x, c_y, c_z]$). Riešenie vychádza zo všeobecnej rovnice sféry (1), ktorá v rozšírenej a preusporiadanej forme vyzerá nasledovne:

$$x^2 + y^2 + z^2 = 2xc_x + 2yc_y + 2zc_z + r^2 - c_x^2 - c_y^2 - c_z^2. \quad (2)$$

Zápis rovnice do vektorovo-maticového tvaru:

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \\ x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2x_i + 2y_i + 2z_i & 1 \\ 2x_{i+1} + 2y_{i+1} + 2z_{i+1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 2x_n + 2y_n + 2z_n & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_{param} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \\ r^2 - c_x^2 - c_y^2 - c_z^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

kde vektor \mathbf{f} v (3), matica \mathbf{A} a vektor \mathbf{c}_{param} v (4) predstavujú konsolidované vzťahy rozšírenej rovnice sféry v (2), a x_i, y_i, z_i sú priestorové súradnice bodov mračna. Po úprave:

$$\mathbf{f} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{c}_{param}. \quad (5)$$

Rovnica (5) sa rieši pomocou rozšíreného systému lineárnych rovníc, ktoré sú podrobnejšie popísané v [11].

Druhým krokom algoritmu (obr. 2) je výpočet približných parametrov sférickej plochy. Tieto odhadnuté parametre sa následne použijú v iteračnom procese spresňovania odhadu a aktualizácie množiny vyhovujúcich bodov (extrakcia – 4. v pseudokóde – obr. 2), ktorý sa vykonáva na základe vzdialenostného filtra. Kritérium pre vzdialenostný filter vyzerá nasledovne:

$$|\Delta dist_i| < r \cdot t_{d(\%)} , \quad (6)$$

kde r predstavuje polomer sféry, a t_d je prahová hodnota pre vzdialenostný filter.

$$\Delta dist_i = |p_i - c| - r , \quad (7)$$

kde $\Delta dist_i$ je ortogonálna vzdialenosť medzi vybraným bodom p_i a povrchom odhadnutej sféry.

Pri vzdialenostnom filtri kritérium $r \cdot t_{d(\%)}$ prakticky znamená, že ak odhadnutá sféra má polomer 10 cm, a za prahovú hodnotu t_d sa zvolí hodnota 5, iba body, ktoré sú bližšie k povrchu sféry ako 0,5 cm (predstavuje 5 % z polomeru sféry), sa považujú za vyhovujúce. Príliš vysoká prahová hodnota môže spôsobiť, že do procesu odhadu sa pridajú aj body, ktoré neležia na povrchu danej sféry (napr. šum v mračne, body z okolitých konštrukcií a pod.).

Pri každej iterácii sa postupne vyberajú body z mračna, ktoré spĺňajú kritérium vzdialeností. Následne sa vykoná odhad (resp. fitovanie) (8. krok v pseudokóde – obr. 2) sféry pomocou všetkých vyhovujúcich bodov, t. j. v každej iterácii sú prepočítané parametre odhadnutej sféry, a do

nasledujúcej iterácie sa tieto hodnoty použijú ako vstupné hodnoty. Tým pádom, postupom algoritmu sú odhadnuté parametre stále presnejšie.

Tieto dva po sebe idúce kroky algoritmu, extrakcia a odhad, sa vykonávajú až kým nie sú vybraté všetky body danej sféry, alebo kým nie je splnená niektorá z podmienok na prerušenie výpočtu. V algoritme sa používajú 3 podmienky na prerušenie výpočtu:

1. príliš malé množstvo vyhovujúcich bodov pre daný počiatočný bod (5. v pseudokóde),
2. parametre sféry sa nekonvergujú v jednotlivých iteráciách (6. v pseudokóde),
3. štandardná odchýlka fitovania odhadnutej sféry je príliš vysoká (7. v pseudokóde).

Prvé kritérium je splnené, ak segmentované mračno pre danú sféru obsahuje menej ako 200 bodov pre daný počiatočný bod po štvrtej iterácii. Druhá podmienka je založená na určení rozdielov medzi odhadnutými parametrami sféry po 5. iteračnom cykle v dvoch po sebe idúcich iteráciách. Kritérium je splnené, ak tento rozdiel presahuje hodnotu parametra konvergencie ($\epsilon = 10^{-4}$). Tretia podmienka zaručuje, aby štandardná odchýlka fitovania nebola príliš veľká. Táto odchýlka sa počíta na základe ortogonálnych vzdialeností vyhovujúcich bodov od povrchu odhadnutej sféry.

V prípade, ak je splnená aspoň jedna z podmienok, výpočet sa preruší a následne sa začne nový výpočtový cyklus s novým náhodným počiatočným bodom. Validácia, resp. uvedenie podmienky prerušenia výpočtu sú potrebné z dôvodu, že výsledok odhadu sféry je priamo závislý od počiatočného bodu a okolitej oblasti. V niektorých prípadoch odhadnuté sféry nemusia reprezentovať charakteristické útvary v mračne bodov. So spomínanými podmienkami sú takéto prípady eliminované.

Mračna bodov bez šumu a s malým počtom vybočujúcich bodov konvergujú k „dobré“ odhadnutým sféram už po niekoľkých iteráciách, lenže v prípade zašumených komplexných mračen je potrebné vykonať viaceré iterácie. Z toho dôvodu maximálny počet iterácií je nastavený na 15. Táto hodnota bola určená empiricky na základe testovania niekoľkých mračen bodov s rôznou hustotou, komplexnosťou a zašumením.

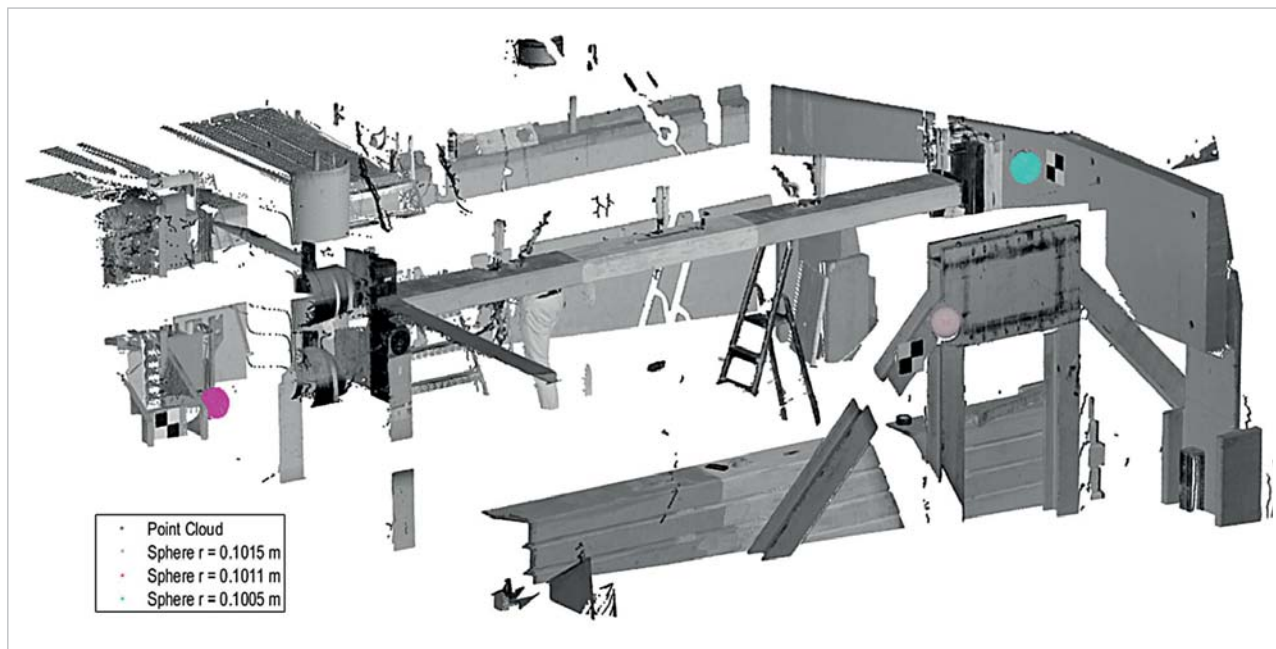
Predstavený proces segmentácie sa vykonáva automatizovane, až kým sa nevykoná segmentácia všetkých sfér z mračna bodov. Počet sfér sa zvolí na začiatku algoritmu.

Výhody uvedeného postupu sú nasledovné:

- vybočujúce body a šum sú z procesu odhadu iteračne vylúčené pomocou navrhnutého extrakčného kroku,
- „zle“ odhadnuté sférické plochy sú vylúčené počas validácie výpočtu (krok 5.-7. v pseudokóde),
- po úspešnej segmentácii danej sféry, vyhovujúce body tejto sféry sú odstránené z mračna, tým pádom segmentačný proces ďalších sfér je vykonaný iba na zvyšných bodoch mračna,
- krok extrakcie je vykonaný na celom mračne naraz, nie bodovo, čo výrazne zredukuje výpočtový čas.

4. Experimentálne testovanie navrhnutého algoritmu

Pre experimentálne testovanie uvedeného algoritmu bolo použité mračno bodov (obr. 3) obsahujúce približne 2 milióny bodov a 3 sférické objekty (referenčné sféry pre laserové skenery). Tieto referenčné sféry boli vyrobené s priemerom 200 mm. Skenovanie bolo vykonané pomocou lase-



Obr. 3 Mračno bodov zo statickej zaťažovacej skúšky

Tab. 1 Rozdiely medzi známymi parametrami a odhadnutými parametrami jednotlivých sfér

	Referenčné hodnoty [m]	Hodnoty z algoritmu [m]	Rozdiel [mm]
r_1	0,1015	0,1000	1,5
r_2	0,1011	0,1000	1,1
r_3	0,1005	0,1000	0,5

rového skenera Trimble TX5 3D. S uvedeným skenerom a s uvážením podmienok počas merania (maximálna vzdialenosť medzi prístrojom a skenovaným objektom, nastavenie rozlíšenia a kvality skenera, a pod.), presnosť v priestorovej polohe meraného bodu bola nižšia ako 2,5 mm vo všetkých prípadoch.

Na verifikáciu výsledkov segmentácie sa určili rozdiely (tab. 1) medzi známymi parametrami (polomer) a odhadnutými parametrami (pomocou navrhnutého algoritmu) jednotlivých sfér.

Rozdiely medzi známymi a odhadnutými parametrami sú 1,5 mm, 1,1 mm a 0,5 mm. V týchto odchyľkách sú zahrnuté aj chyby merania, systematické chyby prístroja a vplyvy prostredia. Okrem toho skutočnosť, že skenovanie bolo vykonané z jedného stanoviska, tým pádom nebol celý povrch sféry pokrytý meranými bodmi, mala tiež negatívny vplyv na odhad parametrov. Taktiež referenčné sféry sú vyrábané s určitou toleranciou.

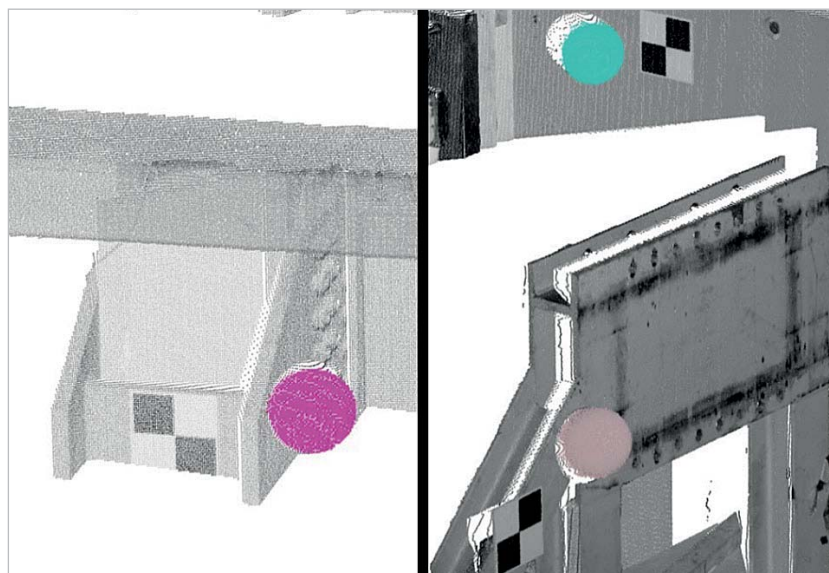
Na obr. 4 sú zobrazené segmentované body jednotlivých sfér, ktoré sú farebne rozlíšené. Obr. 5 zobrazuje snímky z experimentu. Štandardná odchyľka fitovania sféry na segmentované mračno bodov dosahovalo hodnoty menej ako 0,8 mm vo všetkých prípadoch. Parametre jednotlivých sfér sú zobrazené v tabuľke na obr. 6.

Na základe uvedeného porovnania (obr. 3, 4) verifikácia bola úspešná.

5. Realizácia navrhnutého algoritmu

Pre automatizáciu a jednoduché vykonanie uvedenej procedúry bola vyhotovená samostatná výpočtová aplikácia „Sphere Segmentation“ v softvéri MATLAB®. Aplikácia bola vyhotovená ako samostatná aplikácia, ale keďže výpočtové jadro prebieha v softvéri MATLAB®, k spusteniu je potrebné mať nainštalovaný Matlab Runtime, ktorý je voľne sťahovateľný.

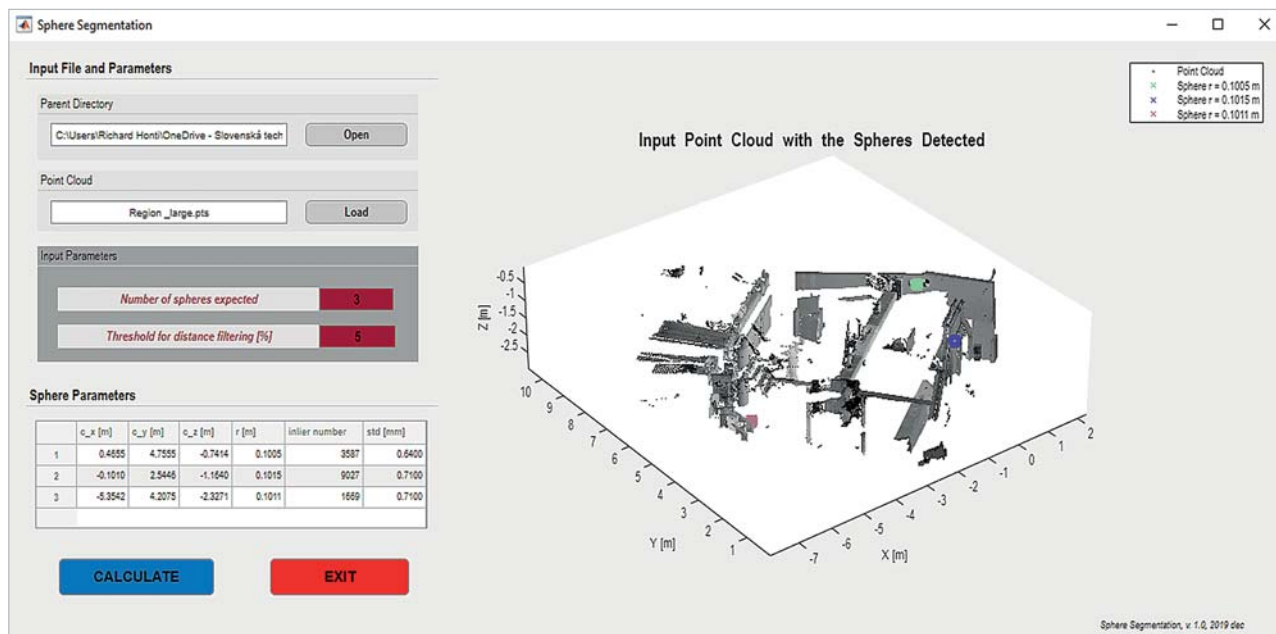
Dialogové okno aplikácie (obr. 6) je rozdelené do 3 hlavných častí. Prvá časť „Input File and Parameters“ slúži na načítanie vstupného mračna bodov a zadanie vstupných hodnôt, ktorými sú počet sfér nachádzajúcich sa v mračne a prahová hodnota pre vzdialenostný filter. V druhej časti je zobrazená tabuľka („Sphere Parameters“), kde sa vypíšu odhadnuté parametre jednotlivých sfér. A treťou časťou je grafické zobrazenie mračna bodov a odhadnutých sfér. V tejto časti je pôvodné mračno bodov zobrazené sivou farbou a počas priebehu aplikácie sú zobrazené



Obr. 4 Detaily výsledkov segmentácie



Obr. 5 Snímky z experimentu



Obr. 6 Dialógové okno aplikácie Sphere Segmentation

jednotlivé segmentované sféry, ktoré sú farebne odlišené. Výsledkom aplikácie sú segmentované mračná jednotlivých sfér uložené do textového súboru pre ďalšie spracovanie a parametre jednotlivých sfér zobrazené v tabuľke dialógového okna aplikácie.

6. Záver

Sférické plochy sú často používané pre geometrické útvary v stavebnom priemysle a majú využitie v rôznych oblastiach. V mnohých aplikáciách sa vyžaduje automatizácia ich detekcie a odhadu ich parametrov z mračna bodov.

V rámci uvedeného príspevku bol navrhnutý robustný algoritmus na automatizáciu segmentácie sférických plôch z mračen bodov. Algoritmus dokáže vykonať detekciu a segmentáciu podmnožín bodov prislúchajúcich k jednotlivým sféram v komplexných, rozsiahlych a zašumených mračnách na základe vzdialenostného filtra. Validačný krok zabezpečuje, aby boli odhadnuté práve tie charakteristické sféry meraného objektu. Experimentálne testovanie algoritmu na komplexnom mračne bodov, ktorý obsahuje približne 2 milióny bodov je tiež popísané. Pre automatizáciu bol algoritmus implementovaný do samostatnej aplikácie. Iba dve vstupné hodnoty sú potrebné k spusteniu aplikácie, predpokladaný počet sfér v mračne a prahová hodnota pre vzdialenostný filter. Výsledkom aplikácie sú segmentované mračná pre jednotlivé sféry uložené do textového súboru a parametre odhadnutých sfér zobrazené v tabuľke.

V rámci ďalšieho vývoja aplikácie bude doplnený algoritmus na výber počiatočných bodov na základe výpočtu zakrivenia lokálnej plochy v jednotlivých bodoch mračna, ktorý zvýši efektívnosť výpočtu a zníži výpočtový čas.

Podakovanie:

„Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0247“.

LITERATÚRA:

- [1] HONTI, R.-ERDÉLYI, J.-KOPÁČIK, A.: Plane segmentation from point clouds, Pollack Periodica, Vol. 13, No. 2, 2018, pp. 159-171.
- [2] HONTI, R.-ERDÉLYI, J.-KOPÁČIK, A.: Automation of cylinder segmentation from point cloud data, Pollack Periodica, Vol. 14, No. 3, 2019, pp. 189-200.
- [3] BENKŐ, P.-VÁRADY, T.: Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects, Computer-Aided Design, Vol. 36, No. 6, 2004, pp. 511-523.
- [4] van der GLAS, M.-VOS, F. M.-BOTH, C. P.-VOSSEPOEL, A. M.: Determination of position and radius of ball joints, Proceedings SPIE 4684, Medical Imaging, Image Processing, San Diego, California, United States, 9 May 2002, pp. 1571-xx.
- [5] WANG, L.-CAO, J.-HAN, C.: A calibration algorithm for 3D laser scanner based on spatial sphere, Journal of Xi'an Jiaotong University, Vol. 47, No. 4, 2013, pp. 79-85.
- [6] HUANG, J.-WANG Z.-GAO, J.-HUANG, Y.-TOWERS, D. P.: High-precision registration of point clouds based on sphere feature constraints, Sensors, Vol. 17, No. 1, 2017, pp. 72-xx.
- [7] SCHNABEL, R.-WAHL, R.-KLEIN, R.: Efficient RANSAC for point-cloud shape detection, Computer Graphics Forum, Vol. 26, No. 2, 2007, pp. 214-226.
- [8] CAMURRI, M.-VEZZANI, R.-CUCCHIARA, R.: 3D Hough transform for sphere recognition on point clouds, Machine Vision and Applications, Vol. 25, No. 7, 2014, pp. 1877-1891.
- [9] FISCHLER, M. A.-BOLLES, R. C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Communications of the ACM, 1981 Vol. 24, No. 6, pp. 381-395.
- [10] HOUGH, P. V. C.: Method and means for recognizing complex patterns. USA Patent 3069654, 18 12 1962.
- [11] JEKEL, C. F.: Digital image correlation on steel ball (Appendix A), in Obtaining non-linear orthotropic material, (diploma Thesis) Stellenbosch, South Africa, Stellenbosch University, 2016, pp. 83-87.

Do redakcie došlo: 8. 7. 2020

Lektoroval:
Ing. Jiří Lechner, CSc.,
Výzkumný ústav geodetický,
topografický a kartografický, v. v. i.