

Richard FECISKANIN

METÓDY ZJEDNODUŠOVANIA MODELOV PLÔCH PRI MODELOVANÍ GEORELIÉFU NEPRAVIDELNOU TROJUHOVNÍKOVOU SIEŤOU

Feciskanin, R.: Simplification methods of surfaces models for georelief modelling by triangulated irregular network. Kartografické listy 2011, 19, 4 figs., 1 tab., 15 refs.

Abstract: Automatic creation of surfaces or common 3D objects models by simplifying detailed models become increasingly important. It is used for creating models of redundantly dense input data (eg. laser scanning). It plays a key role in the generation of models in various resolutions. Automatic model simplification procedures have a tradition especially in the field of computer graphics. The paper presents the possibility of using these methods for georelief modeling where geometrical accuracy is important – the accuracy of values of partial derivatives and from them derived morphometric parameters. The known algorithms from authors Lindstro-Turk and Garland-Heckbert are analyzed. Models consisted of a triangulated irregular network created by automatic simplification achieve very good accuracy of the derived geometric parameters. This is because the conditions that define the process of simplification of selected algorithms are related to the conditions of correct configuration of triangles with respect to mode-led surface. Therefore the resulting model with lower number of elements (vertices, triangles) sufficiently accurately represents the modeled surface. It is just efficiency of georelief model created by surface simplification with maintaining sufficient accuracy of derived geometric characteristics which is its greatest advantage.

Keywords: georelief modeling, simplification, accuracy, triangulated irregular network

Úvod

Používanie metód zjednodušovania modelov plôch, resp. všeobecných 3D objektov je rozšírené v rôznych oblastiach, kde je účelnejšie využívať upravený (zjednodušený) model namiesto originálneho modelu vytvoreného zo všetkých dostupných dát. Zjednodušovanie modelu má kľúčovú úlohu pri generovaní modelov vo viacerých rozlíšeníach. Postupy automatického zjednodušovania modelov majú tradíciu hlavne v oblasti počítačovej grafiky. Požiadavky na vlastnosti vytvoreného modelu sa rôznia, preto je používaných mnoho rôznych prístupov k procesu zjednodušovania.

V oblasti modelovania georeliéfu stále narastá dôležitosť a potreba používania metód zjednodušovania modelov s nárastom dostupnosti veľmi podrobných výškových dát získaných napr. laserovým skenovaním. Cieľom je potom vytvorenie zjednodušeného modelu, ktorý pri menšom počte elementov zachováva čo najviac informácií o modelovanej ploche. Zhotovenie modelu tvoreného interpolovanými hodnotami v pravidelnej mriežke s menšou hustotou, ako mali vstupné dáta môžeme tiež považovať za zjednodušený model. Tvorba zjednodušeného modelu však dáva možnosť vyniknúť prednostiam nepravidelnej trojuholníkovej siete, ktorá na základe podrobných informácií o tvare modelovanej plochy ju dokáže veľmi efektívne a pritom dostatočne presne reprezentovať. Preto sa zameriame práve na modely s takouto priestorovou štruktúrou.

Pri modelovaní georeliéfu je najdôležitejšia geometrická presnosť modelu, pretože jeho geometrické charakteristiky sú podkladom pre ďalšie modelovanie. Preto pre modely georeliéfu je potrebné zvoliť takú metódu, ktorá čo najlepšie zachováva geometrické charakteristiky originálneho modelu. Testovali sme dva známe algoritmy zjednodušovania modelov od autorov Lindstrom-Turk (1998) a Garland-Heckbert (1997), ktoré deklarujú splnenie uvedenej požiadavky.

Mgr. Richard FECISKANIN, Ph.D., Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra kartografie, geoinformatiky a DPZ, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava, e-mail: feciskanin@fns.uniba.sk

V prvej časti príspevku predstavíme základné skupiny metód zjednodušovania modelov plôch a objektov. Stručne charakterizujeme tradičné postupy tvorby zjednodušeného modelu georeliéfu. Načrtujeme aj hlavné smery prístupov k zjednodušovaniu modelov všeobecnejších plôch a objektov. V ďalšej časti potom opíšeme základné vlastnosti testovaných metód. V záverečnej časti uvedieme prehľad výsledkov testovania presnosti modelov zjednodušených algoritmami aplikujúcimi uvedené metódy.

1. Metódy zjednodušovania modelov plôch

Metódam zjednodušovania modelov plôch a objektov sa venuje nepreberné množstvo prác. Načrtujeme preto len základné typy postupov a najvýznamnejšie práce. Spomenieme metódy, ktoré boli vytvorené práve pre modely georeliéfu a z ďalších tie, ktoré vytvárajú zjednodušený model s najlepšou geometrickou vernosťou k originálnemu modelu.

Prevažná väčšina prác predstavuje metódy, ktoré opakovane vykonávajú lokálnu zmenu geometrie, pokým nedosiahnu limit podľa stanoveného kritéria. Najčastejšie sa stretávame s dvomi základnými prístupmi k spomínanej lokálnej zmene vedúcej k tvorbe zjednodušeného modelu. Podľa nich môžeme metódy rozdeliť na zjemňovacie a decimačné.

Zjemňovacie metódy v počiatočnom stave začínajú s malým počtom bodov z originálneho modelu (a z nich vytvorených trojuholníkov) a ďalšie body (vrcholy trojuholníkov) pridávajú, pokiaľ presnosť modelu nie je na požadovanej úrovni. Body, ktoré sa pridávajú, sú volené podľa určitého kritéria – váhy. Prevažná väčšina metód využíva „pažravé vkladanie“ (angl. greedy insertion) bodu (prípadne bodov), ktorý má v danej fáze najvyššiu váhu. Váha sa určuje v každom kroku vkladania a konštrukcii trojuholníkovej siete. Najpoužívanejšou mierou hodnotenia váhy bodu je jeho rozdiel od aproximovanej plochy (pred jeho začlenením medzi použité vrcholy). Takéto hodnotenie je veľmi náchylné na presnosť vstupných hodnôt – náhodné odchýlky vo vstupných bodoch. Aj keď v priebehu algoritmu sa model zjemňuje (spresňuje), čo je opakom zjednodušovania, ide o zjemňovanie iniciálneho modelu a výsledný model predstavuje zjednodušenie oproti originálnemu modelu.

Decimačné metódy vychádzajú z opačného prístupu ako zjemňovacie metódy – algoritmus začína s originálnym modelom a znižuje počet prvkov (vrcholov, hrán, trojuholníkov), kým je úroveň presnosti modelu postačujúca podľa zvoleného kritéria. Metódy sa líšia podľa spôsobu znižovania počtu prvkov. Garland a Heckbert (1997) ich kategorizujú do troch skupín: vypúšťanie vrcholov, spájanie vrcholov a zlúčenie (kontrakcia) hrán. Výhodou decimačných metód, oproti zjemňovacím metódam, je možnosť porovnávať vplyv zmeny geometrie voči originálnemu modelu (nielen aktuálnemu stavu modelu). Pokročilé decimačné metódy sú rozšírené pri zjednodušovaní objektov a zložitejších typoch plôch (kap. 1.2).

1.1 Špecifické metódy zjednodušovania modelov plochy georeliéfu

Niektoré z metód zjednodušovania modelov plôch boli vytvorené konkrétne pre modely georeliéfu. Využívajú skutočnosť, že plochu georeliéfu uvažujeme za definovaných podmienok ako funkciu $z = f(x, y)$ (1), kde výška je iba funkciou polohy. To umožňuje metódam využívať jednoduchú Delaunayovu trianguláciu v rovine. Použitie tejto triangulácie už samo o sebe prináša do výsledného modelu mieru nepresnosti (Feciskanin, 2010). Naopak, využitie možností zobrazenia objektov plochy do roviny (x, y) znemožňuje zovšeobecnenie postupov pre iné typy plôch (a objektov), ako sú výškové a iné polia určené rovnicou (1). Týka sa to tiež možnosti merania odchýlok iba v smere osi z , čo využívajú hlavne zjemňovacie metódy. Zjemňovacie metódy dominujú pri výbere procesu zjednodušovania modelov georeliéfu.

Existuje mnoho variácií zjemňovacích metód založených na „pažravom vkladaní“. Zaujímavé vylepšenia základného postupu sú napr. v práci (Rippa, 1992), kde namiesto Delaunayovej triangulácie je použitá dátovo-závislá triangulácia. V práci (Garland a Heckbert, 1995) sú predstavené optimalizácie základného algoritmu – určenie bodov, v ktorých treba prepočítať váhu bodov a rýchlejšie vyhľadanie bodov s najvyššou váhou.

Mnohé z metód sa zužujú na vstupné dáta vo forme pravidelnej mriežky a dodatočné informácie pre výber bodov riešia operáciami v lokálnom susedstve. Týka sa to zjemňovacích metód, ktoré boli pre modelovanie georeliéfu doplnené o prípravnú fázu výberu bodov, ktoré majú vstupovať

do triangulácie v ďalšej fáze. Cieľom prvotného výberu bodov je lepšie zachytenie kostry georeliéfu a ďalších jeho významných tvarov. Tradičné postupy založené na výbere relevantných bodov pomocou analýzy susedstva v redundantne hustej mriežke, ktorá tvorí podklad pre vytvorenie nepravidelnej trojuholníkovej siete, sú metódy v prácach (Fowler a Little, 1979) a (Chen a Guevara, 1987). Prvý z postupov vyhľadáva vrcholy, sedlá a depresie, v ďalšom opakovaní body na údolniciach a chrbáticiach. Druhá z metód, nazývaná *very important points*, vyberá body podľa rozdielu oproti priemeru zo susedných ôsmich hodnôt. Body prekračujúce zvolenú limitnú hodnotu sú vstupom do následnej triangulácie. Identifikáciu miest najväčších zmien hodnôt, tvoriacu obmedzenia pre tvorbu trojuholníkov pred samotným vkladáním bodov, prezentujú (Chen a Schmitt, 1993).

Z decimálnych metód bola pre modelovanie georeliéfu primárne určená metóda *drop heuristic* (Lee, 1989), ktorá dočasne neuvažuje s jedným bodom a určuje jeho rozdiel od roviny trojuholníka, ktorý tvorí súčasť Delaunayovej triangulácie (bez vypusteného bodu). Pri každom kroku zruší jeden bod, ktorý má najmenšiu odchýlku. Algoritmus je výpočtovo náročný, vyžaduje vytvorenie triangulácie pre každý hodnotený bod a nevyužíva porovnanie s originálnym modelom. Autor prezentuje lepšie výsledky v porovnaní s napr. metódou *very important points*. Podobne Scarlatos a Pavlidis (1992) prezentujú decimálnu metódu s využitím odchýlky vrcholu od váženého priemeru okolitých hodnôt ako váhového kritéria.

Celkovo môžeme tradičné metódy, ktoré sú súčasťou aj GIS softvérových riešení, charakterizovať ako málo efektívne, s často nedostatočnou presnosťou. Využívané sú zväčša pri tvorbe modelu tvoreného nepravidelnou trojuholníkovou sieťou z pravidelnej mriežky. Pre potreby vytvorenia modelu z veľmi podrobných výškových dát je vhodné preto využiť iné metódy zjednodušovania modelov.

1.2 Všeobecné metódy zjednodušovania modelov plôch a objektov

Postupy zjednodušovania modelov všeobecnejších plôch a objektov, ktoré za nedajú popísať rovnicou (1), v prevažnej väčšine využívajú decimálne metódy. Zjemňovacie metódy sú zastúpené málo a využívajú najmä obmeny hierarchického delenia trojuholníkov, ako to plyní z prehľadu (Heckbert a Garland, 1997).

Základný postup z kategórie vypúšťania vrcholov prezentoval Schroeder et al. (1992). Základom bolo meranie odchýlok vrcholov a v každom opakovaní vypustenie vrcholov s odchýlkou menšou ako stanovený limit. Miesta vypustených vrcholov sa po každom kroku retriangulovali. Odchýlka vrcholu bola určovaná ako vzdialenosť k rovine, ktorá aproximuje okolité vrcholy. Na rozdiel od metódy *drop heuristic* určuje odchýlky iba raz pre každú iteráciu. V novšej verzii algoritmu tiež uchováva vypočítané hodnoty odchýlok, a tým zabezpečuje porovnanie s originálnym modelom. Rozdielom je tiež možnosť použitia aj pre všeobecnejšie plochy. Podobných postupov môžeme nájsť niekoľko, líšia sa hlavne spôsobom merania odchýlok.

Zjednodušovanie modelov, spájaním viacerých vrcholov do jedného, predstavuje menej presný spôsob. Vlastnosti výsledného modelu závisia najmä od spôsobu výberu bodov (vrcholov), ktoré sa majú zlúčiť do jedného. Najčastejšie je to blízka vzájomná poloha vrcholov.

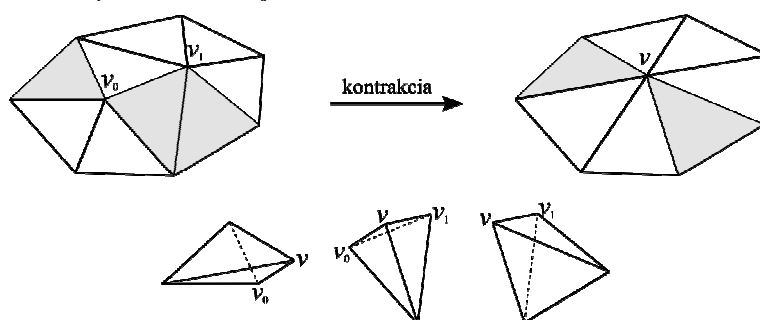
Kontrakcia hrán (zlúčenie jej dvoch vrcholov v_0 a v_1 do jedného vrcholu v) je najčastejšie používaný postup zjednodušovania modelov. Výhodou je, že je to viac atomická operácia ako zlučovanie, príp. vypúšťanie vrcholov a trojuholníkov. Pri tejto operácii sa odstráni 1 vrchol, 3 hrany a 2 trojuholníky (ak hrana nie je okrajová). Zároveň nie je potrebný zásah algoritmu triangulácie. Vďaka týmto prednostiam vzniklo viacero metód vychádzajúcich z tohto princípu. Dve základné rozhodnutia ovplyvňujú vlastnosti výsledného modelu. Prvým je určenie polohy nového vrcholu po zlúčení hrany a druhým je usporiadanie hrán (poradie), ako majú byť zlučované.

Medzi najpopulárnejšie metódy patria *quadric error metrics simplification*, predstavená v práci (Garland a Heckbert, 1997) a *memoryless simplification*, predstavená v práci (Lindstrom a Turk, 1998). Obe metódy, ako jednu z predností, prezentujú veľmi dobré charakteristiky geometrickej presnosti zjednodušeného modelu. Aj napriek rozdielne definovaným podmienkam, sú obe metódy veľmi podobné, čo dokumentuje ich charakteristika v nasledujúcej časti.

2. Charakteristika testovaných metód zjednodušovania modelov

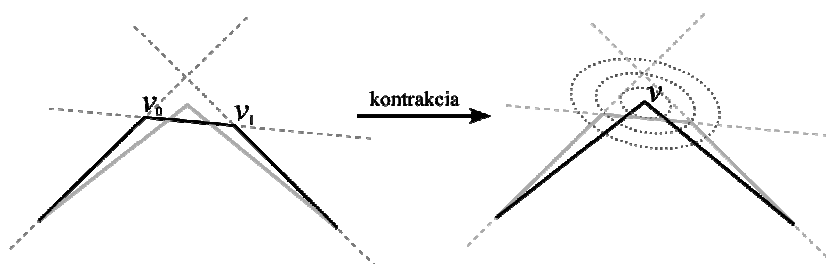
Ako bolo uvedené, obe metódy testované na tvorbu (úpravu) modelov georeliéfu, používajú na lokálnu zmenu geometrie modelu zlučovanie hrany. Metóda *quadric error metrics simplification* však umožňuje zlučovať aj dvojice vrcholov, ktoré nie sú spojené hranou. Je to výhodné v modeloch objektov pozostávajúcich z viacerých častí. V modeloch plochy georeliéfu je to však nevyužiteľné. Obe metódy používajú rozdielne kritériá na určenie polohy nového vrcholu po zlúčení hrany a tiež rozdielne kritériá pre ohodnotenie hrán na základe vplyvu ich zlúčenia.

Metóda *memoryless simplification* určuje váhu hrán na základe výpočtu zmeny objemu pri kontrakcii hrany. Hodnotu váhy tvorí suma objemov štvorstenov, ktoré vzniknú z okolitých trojuholníkov posunom pôvodných vrcholov v_0 a v_1 do nového vrcholu v (obr. 1). Metóda *quadric error metrics simplification* určuje váhu na základe hodnoty sumy kvadratickej vzdialenosti vrcholu v k jednotlivým rovinám trojuholníkov s vrcholmi v_0 a v_1 . Obe metódy tak potrebujú najskôr určiť polohu vrcholu po zlúčení hrany.



Obr. 1 Príklady vzniknutých štvorstenov používaných pri hodnotení metódou *memoryless simplification* (podľa Lindstrom a Turk 1998)

Určovanie polohy vytvoreného vrcholu v riešia tieto metódy minimalizáciou funkcií používaných na ohodnotenie zlúčenia hrán. Pri metóde *quadric error metrics simplification* vedie použitý postup za štandardných okolností k jednoznačnému určeniu polohy nového vrcholu. Je to miesto najmenej kvadratickej vzdialenosti k rovinám trojuholníkov s vrcholmi zlučovanej hrany v_0 a v_1 . Tieto roviny sa tak dotýkajú izopovrchu s určitou kvadratickou vzdialenosťou od nového vrcholu. Tento izopovrch má tvar kvadriky (kvadratickej plochy) – elipsoidu, z toho názov *quadric error metrics*. Príklad v rovine znázorňuje obr. 2. Ak je elipsoid degenerovaný, má tvar nekonečného valca alebo dvoch rovnobežných rovín, nie je možné uvedeným postupom zvoliť jednoznačne polohu nového vrcholu. V tom prípade autori vyberajú bod s minimálnou chybou na zlučovanej hrane v_0v_1 . Ak ani ten sa nedá jednoznačne určiť, bude to ten z pôvodných vrcholov v_0 alebo v_1 , ktorý má menšiu chybu (Garland a Heckbert, 1997).



Obr. 2 Kontrakcia hrany a lokalizácia nového vrcholu metódou *quadric error metrics simplification* v 2D (podľa Garland, 1999)

Pri druhej metóde, spomínané hodnotenie zmeny objemu štvorstenov nepostačuje. Určenie polohy vrcholu minimalizáciou tejto charakteristiky nie je jednoznačné. Z geometrického hľadiska ide od prienik dvoch rovín. Doplňujúcou podmienkou, ktorá definuje potrebnú ďalšiu rovinu, je

podmienka zachovania objemu. V tomto prípade majú jednotlivé štvorsteny priradené znamienko, podľa toho, či ide o zväčšenie alebo zmenšenie objemu modelu kontrakciou hrany. Táto podmienka zabezpečuje aj globálne zachovanie objemu modelu (objem sa nemyslí doslovne v prípade modelov plôch, kam spadajú aj modely georeliéfu). Ak je uhol medzi rovinami veľmi malý, je výpočet citlivý na presnosť. Ak je uhol nulový a riešenie je opäť nejednoznačné, autori dopĺňajú podmienku optimalizácie tvaru trojuholníkov. Poloha vrcholu v v definovanej rovine je určená minimalizáciou kvadratickej dĺžky hrán okolo neho (Lindstrom a Turk, 1998).

Ako poukazujú Lindstrom a Turk (1999), predstavené základné určenie optimálnej polohy nového vrcholu je veľmi podobné v oboch metódach. V podstate využíva rovnakú charakteristiku (dá sa previesť na rovnaký kvadratický tvar), líši sa iba v určení váhy jednotlivých trojuholníkov v súčte. Kým pri metóde *memoryless simplification* je váhou druhá mocnina plochy trojuholníka, pri metóde *quadric error metrics simplification* sú členy vážené rovnako, alebo na základe plochy trojuholníka.

Dôležitým rozdielom, ktorý sa týka správania algoritmu, je to, že Garland a Heckbert (1997) hodnoty váhy pre jednotlivé vrcholy uchovávajú, kým Lindstrom a Turk (1998, 1999) ich počítajú za behu. Práve jednoduché určenie váhy kontrakcie hrany určené súčtom váh priradených zlučovaným vrcholom je najdôležitejším faktorom, ktorý spôsobuje, že metóda *quadric error metrics simplification* je najrýchlejšia spomedzi podobných metód.

3. Hodnotenie presnosti testovaných modelov

Uvedené metódy zjednodušovania modelov objektov a plôch sme použili na vytvorenie zjednodušeného modelu plochy georeliéfu. Originálny model bol vytvorený z 62 001 bodov usporiadaných v pravidelnej mriežke. Metódou *memoryless simplification* bol vytvorený zjednodušený model plochy pozostávajúci z 1242 vrcholov a 2326 trojuholníkov. Model vytvorený pomocou metódy *quadric error metrics simplification* mal 1238 vrcholov a 2340 trojuholníkov. Ako ďalšie referenčné údaje sme použili modely georeliéfu vytvorené z nepravidelného diskrétného bodového poľa Delaunayovou trianguláciou a upravené lokálnou optimalizáciou na základe hodnoty odchýlky normály. Jedno vstupné bodové pole bolo získané manuálnym výberom bodov skúseným operátorom na podklade morfometrickej analýzy modelovanej plochy a druhé získané automatickým výberom relevantných bodov. Tieto modely už boli použité v prácach (Feciskanin, 2007, 2009). Porovnateľnosť predpokladá vyrovnaný počet elementov v modeloch, čo bolo splnené.

Hlavným hodnotiacim kritériom bola odchýlka normály roviny trojuholníka od normály modelovanej plochy v mieste ťažiska trojuholníka. Tento parameter má zásadný vplyv na presnosť odvodených hodnôt parciálnych derivácií, a tým aj na presnosť hodnôt morfometrických veličín (Feciskanin, 2009). Aby bol vylúčený vplyv ďalších faktorov, ako modelovaná plocha bola zvolená analyticky definovaná plocha, geometrickými vlastnosťami pripomínajúca plochu georeliéfu. Okrajové trojuholníky, ktoré negatívne ovplyvňujú hodnotenie presnosti, neboli do hodnotenia zahrnuté. Celkový počet trojuholníkov v jednotlivých modeloch vstupujúcich do hodnotenia prezentuje tab. 1.

Tab. 1 Priemerné odchýlky normál trojuholníkov v modeloch vytvorených rôznymi metódami

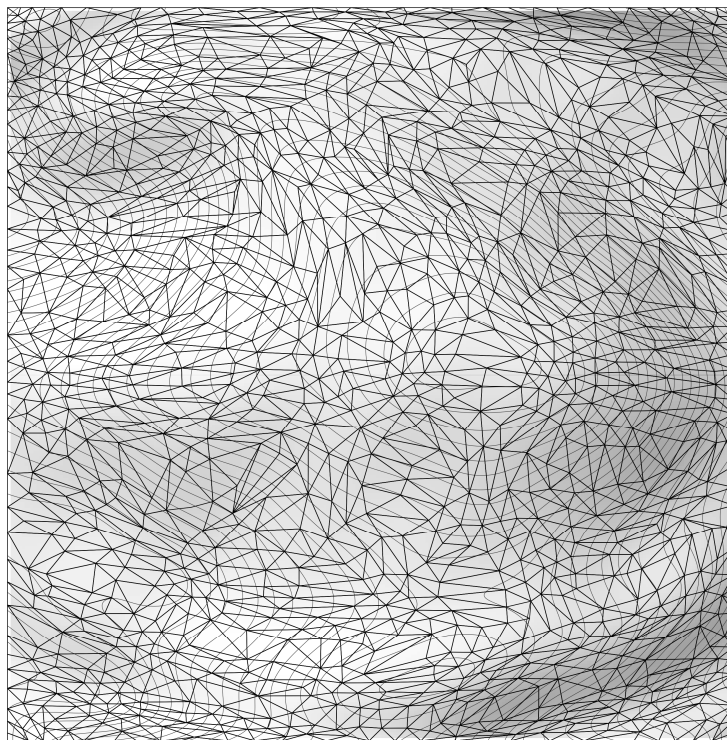
metóda	priemerná odchýlka [°]	počet trojuholníkov
<i>quadric error metrics simplification</i>	1,163	1959
<i>memoryless simplification</i>	0,981	1939
manuálne volené body – Delaunayova triangulácia	1,898	1977
manuálne volené body – po lokálnej optimalizácii	1,441	1977
automaticky volené body – Delaunayova triangulácia	1,788	1958
automaticky volené body – po lokálnej optimalizácii	1,071	1958

Z výsledkov hodnotenia presnosti uvedeného v tab. 1 jednoznačne vyplýva, že testované metódy zjednodušovania modelov objektov a plôch vytvárajú modely plochy georeliéfu s veľmi dobrou geometrickou vernosťou. Preto sú takéto modely vhodné pre komplexné modely georeliéfu, ktoré

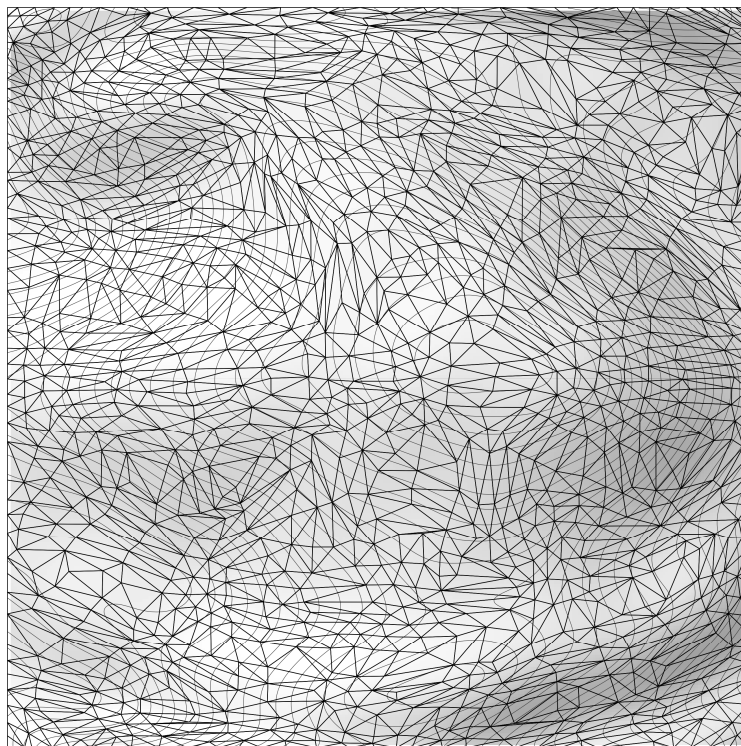
umožňujú dostatočne presne odvodiť hodnoty parciálnych derivácií a z nich vypočítané hodnoty základných morfometrických veličín. Pri porovnaní oboch decimálnych metód dosiahla lepšie výsledky metóda *memoryless simplification*. Aj keď v určitých hodnoteniach (maximálna hodnota vzdialenosti od originálneho modelu, presnosť určenia polohy vrcholov) dosahovala táto metóda väčšie odchýlky ako metóda *quadric error metrics simplification*, v prípade hodnotenia odchýlok normály má navrch. Poukazuje to na výraznejšiu autokoreláciu chýb určenia polohy vrcholov na základe podmienok metódy *memoryless simplification*.

Metóda *memoryless simplification* je na základe hodnotiaceho kritéria najpresnejšou zo všetkých testovaných metód vytvorenia modelu georeliéfu tvoreného nepravidelnou trojuholníkovou sieťou. Druhou v poradí bola metóda lokálnej optimalizácie trojuholníkov na základe odchýlky normály z automaticky selektovaného reprezentatívneho bodového poľa. Tento postup vychádza rovnako z princípu decimácie, model je však vytvorený v dvoch krokoch. Na rozdiel od testovaných metód zjednodušovania modelov patria vrcholy trojuholníkov do množiny vstupných bodov a nie je určovaná ich nová poloha. Treťou najpresnejšou bola metóda *quadric error metrics simplification*. Ostatné modely dosiahli výrazne nižšiu presnosť určenia normály, a tým aj prvých parciálnych derivácií. Podľa očakávania v presnosti zaostávali modely tvorené tvarovo optimalizovanými trojuholníkmi zhotovenými Delaunayovou trianguláciou.

Pri porovnaní tvaru trojuholníkovej siete je zreteľná podobnosť medzi modelmi vytvorenými metódou *quadric error metrics simplification* (obr. 3) a metódou *memoryless simplification* (obr. 4). Preto rozdiel v priemernej odchýlke normály trojuholníka je zaujímavý. Celkovo dosahujú trojuholníky pri metóde *quadric error metrics simplification* väčšie odchýlky, a aj početnosť trojuholníkov s väčšími odchýlkami je vyššia. Aj keď úzke a dlhé trojuholníky sú očakávané na miestach, kde je krivosť v jednom smere výrazne vyššia, touto metódou boli vytvorené nerelevantné, extrémne úzke trojuholníky s výraznými odchýlkami, ktoré viedli až k porušeniu topológie.



Obr. 3 Trojuholníková sieť vytvorená metódou *quadric error metrics simplification*



Obr. 4 Trojuholníková sieť vytvorená metódou *memoryless simplification*

Záver

Základné testovanie prezentované v tomto príspevku potvrdilo možnosť použitia vybraných metód zjednodušovania modelov objektov a plôch na modelovanie georeliéfu. Špeciálne metóda *memoryless simplification* od dvojice autorov Lindstrom a Turk dosiahla vynikajúce charakteristiky presnosti trojuholníkov s ohľadom na výpočet (prvých) parciálnych derivácií, a tým aj na výpočet hodnôt morfometrických veličín. Testované metódy dokázali zužitkovať detailné informácie o geometrii plochy a prispôsobiť jej tvar trojuholníkov. Použité podmienky v týchto metódach sú veľmi podobné a zároveň zodpovedajú požiadavkám na optimálny tvar trojuholníka na reprezentovanie časti plochy, čo je dokumentované v práci (Feciskanin, 2009).

Celkovo sú potom takýmto spôsobom vytvorené modely veľmi efektívne – na základe malého počtu elementov (vrcholov, trojuholníkov) vedú veľmi presne reprezentovať geometriu modelovanej plochy. Práve použitie takýchto metód dokonale využíva možnosti trojuholníkových sietí (polyedrických modelov s trojuholníkovými elementami) ohľadom prispôbitelnosti ich tvaru podľa špecifických požiadaviek. Ďalšou výhodou je, že zjednodušené modely sú menej citlivé na chyby vstupných hodnôt, ktoré negatívne ovplyvňujú hlavne presnosť odvodených parametrov.

Dostupnosť podrobných výškových dát narastá a tvorba kvalitných komplexných digitálnych modelov georeliéfu z nich je veľmi žiadaná. Výskum v rámci tejto oblasti je preto veľmi zaujímavý. Ďalej chceme testovať rôzne aspekty zjednodušovania, vplyv náhodných chýb vo vstupných bodoch, vplyv pomeru zjednodušenia oproti originálnemu modelu a pod. Takisto budeme prezentovať ďalšie miery hodnotenia geometrickej presnosti modelov a porovnania, ktoré tu nebolo možné kvôli rozsahu príspevku zaradiť. Spomenúť môžeme hodnotenie absolútnej a relatívnej polohovej presnosti vrcholov a ťažísk trojuholníkov, ako aj hodnotenie odvodených charakteristík, ako napr. lokalizácia údolnic a chrbátic.

Literatúra

- FECISKANIN, R. (2007). Lokálna optimalizácia nepravidelnej trojuholníkovej siete s rešpektovaním podmienky správnej konfigurácie trojuholníkov. *Geodetický a kartografický obzor*, roč. 53/95, č. 7-8, s. 151-155.
- FECISKANIN, R. (2009). *Optimalizácia nepravidelných trojuholníkových sietí pre modelovanie georeliéfu*. Dizertačná práca, Brno (Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta). Dostupné na: <http://is.muni.cz/th/183256/prif_d/FeciskaninTextDP.pdf>.
- FECISKANIN, R. (2010). Problémy modelov georeliéfu tvorených tvarovo optimalizovanými nepravidelnými trojuholníkovými sieťami. *Kartografické listy*, 18, s. 49-56.
- FOWLER, R. J., LITTLE, J. J. (1979). Automatic extraction of irregular network digital terrain models. In *Proceedings of the 6th annual conference on computer graphics and interactive techniques*. New York (ACM Press), s. 199-207.
- GARLAND, M. (1999). Quadric-based *polygonal surface simplification*. Ph.D. dissertation, Pittsburgh (Carnegie Mellon University, School of Computer Science).
- GARLAND, M., HECKBERT, P. S. (1995). *Fast polygonal approximation of terrains and height fields*. Pittsburgh (Carnegie Mellon University, School of Computer Science).
- GARLAND, M., HECKBERT, P. S. (1997). Surface simplification using quadric error metrics. In *Proceedings of SIGGRAPH*, s. 209-216.
- HECKBERT, P. S., GARLAND, M. (1997). *Survey of polygonal surface simplification algorithms*. Pittsburgh (Carnegie Mellon University, School of Computer Science).
- CHEN, Z., GUEVARA, J. A. (1987). Systematic selection of very important points (VIP) from digital terrain models for construction of triangular networks. In *Proceedings AutoCarto*, ASPRS/ACSM, s. 50-56.
- CHEN, X., SCHMITT, F. (1993). Adaptive range data approximation by constrained surface triangulation. In Falcidieno, B. a Kunii, T. eds., *Modeling in computer graphics: methods and applications*, Berlin (Springer-Verlag), s. 95-113.
- LEE, J. (1989). A drop heuristic conversion method for extracting irregular networks for digital elevation models. In *Proceedings of GIS/LIS '89*. Orlando, 1, s. 30-39.
- LINDSTROM, P., TURK, G. (1998). Fast and memory efficient polygonal simplification. In *Proceedings of the conference on Visualization '98*. Los Alamitos (IEEE Computer Society Press), s. 279-286.
- LINDSTROM, P., TURK, G. (1999). Evaluation of memoryless simplification. *IEEE Transactions on visualization and computer graphics*, 5, 2, s. 98-115.
- RIPPA, S. (1992). Adaptive approximation by piecewise linear polynomials on triangulations of subsets of scattered data. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 13, 5, s. 1123-1141.
- SCARLATOS, L., PAVLIDIS, T. (1992). Optimizing triangulations by curvature equalization. In *Proceedings of the 3rd conference on Visualization '92*. Los Alamitos (IEEE Computer Society Press), s. 333-339.
- SCHROEDER, W. J., ZARGE, J. A., LORENSEN, W. E. (1992). Decimation of triangle meshes. *Computer Graphics*, 26, s. 65-70.

Summary

Simplification methods of surfaces models for georelief modelling by triangulated irregular network

This paper presents simplification methods for models of georelief (terrain) surface. There is an overview of basic types of simplification methods in the first part. The most used traditional methods for georelief simplifying are described. The main categories of other, more general methods are mentioned. The second chapter shows basic characteristic of evaluated methods – *memoryless simplification* method from authors Lindstrom and Turk and *quadric error metrics simplification* method from authors Garland and Heckbert. Both methods belong to a group of methods based on edge contraction which is very popular. It is shown, that chosen methods use different conditions for new vertex placement and calculating edge contraction cost, but they can be seen in the same quadratic form. Fig. 1 and Fig. 2 present basic geometrical principles of conditions used in these methods.

Evaluation of the geometrical accuracy of models created by different methods was based on the triangle normal error – an angle between normal of triangle plane and a surface normal in the place of triangle centroid. This parameter has a major impact on accuracy of derived values of partial derivatives and then on accuracy of calculated morphometric variables as well (Feciskanin, 2009). Simplification methods were compared with previously created models of the same surface. Original model of analytical surface consisted of

62001 vertices was simplified. Both tested simplification method showed very good values of accuracy, which is a precondition for using them for creating digital terrain models. The best method in comparison was *memoryless simplification* method. The mean error of triangle normals was 0.981° . The second best was method creating locally optimal triangulated irregular network from automatically selected representative point set. The third was *quadric error metrics simplification* method with mean error of triangle normals 1.163° . All values are shown in Tab. 1. Comparison of shapes of triangulated irregular networks created by tested methods (Fig. 3, Fig. 4) shows high rate of similarity. Problem of model from *quadric error metrics simplification* method was extremely thin triangles which in some places lead to breaking topology.

Tested simplification methods very well use detailed information of surface geometry and their conditions adjust triangles to represent surface shape. They used an adaptability of triangulated irregular networks and provide the best possible efficiency for representing surface geometry. Accessibility of very dense input elevation data is raising and then creation of derived a high-quality complex digital terrain models is requested. That is why this research direction is attractive and we will continue with testing the possibilities.

Fig. 1 Examples of created tetrahedrons used by *memoryless simplification* method for evaluation (based on Lindstrom and Turk 1998)

Fig. 2 Edge contraction and new vertex placement by quadric error metrics simplification method in 2D (based on Garland 1999)

Fig. 3 Triangulated network created by quadric error metrics simplification method

Fig. 4 Triangulated network created by memoryless simplification method

Tab. 1 Mean errors of triangle normals in the models created by different methods

Recenzovala:

Ing. Renáta ĎURAČIOVÁ, PhD.,
Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta,
Bratislava