

Richard FECISKANIN

PROBLÉMY MODELOV GEORELIÉFU TVORENÝCH TVAROVO OPTIMALIZOVANÝMI NEPRAVIDELNÝMI TROJUHLNÍKOVÝMI SÍŤAMI

Feciskanin, R.: Problems of georelief models created by shape optimized triangulated irregular networks. Kartografické listy 2010, 18, 3 figs., 16 refs.

Abstract: This paper focuses on procedures for the creation of triangulated irregular networks as a base for georelief model. It concentrates on the properties of triangle meshes generated by shape dependent triangulation, in particular on the most used Delaunay triangulation. Properties of these triangles are confronted with the requirements for optimal shape of a triangle for the modeled surface. We point to the negatives of shape optimized triangles. We separately notice unaccuracy arising from the use of contour lines as input data. Wide-spread softwares use shape optimized triangles which result in inaccuracies in the developed models and offer limited opportunities to minimize them. Therefore, we recommend a data dependent triangulations which consider the shape of triangle for the optimal replacement of modeled surface. Characteristics of an object of modeling are taking into account during the creation of a model as opposed to shape dependent triangulation.

Keywords: models of georelief, triangulated irregular networks, triangulation, Delaunay triangulation, shape dependent optimization, data dependent optimization, errors

Úvod

Vplyv georeliéfu a jeho geometrických vlastností na priestorovú diferenciáciu procesov v geografickej sfére je veľmi výrazný, a preto sú dôležité nielen informácie o priestorovom rozmiestnení výšok, ale aj štruktúrnych veličín z množiny morfometrických veličín a ďalších odvodených veličín. Práve model poskytujúci takúto škálu informácií je komplexný a môže byť podkladom pre širokú paletu úloh. Dôležitú úlohu rozhodujúcu o použiteľnosti modelu má správnosť informácií, ktoré je možné na základe modelu odvodiť.

Nepravidelná trojuholníková sieť sa často používa pri modelovaní georeliéfu. Trojuholníky, ktoré tvoria trojuholníkovú sieť tým, že sú tvarovo veľmi jednoduché, majú zároveň veľkú mieru flexibility tvaru. Z toho vyplývajú základné prednosti modelu vo forme nepravidelnej trojuholníkovej siete – možnosť prispôsobenia sa tvaru modelovanej (topografickej) plochy georeliéfu a tým efektívne reprezentovanie tejto plochy a tiež možnosť zachytiť kostru georeliéfu, ako aj línie nespojitosti.

Miera prispôsobenia sa modelu tvaru modelovanej plochy georeliéfu je však v používaných postupoch, implementovaných v rôznych softvérových riešeniach, nedostatočná. Hodnoty výšky, ktorú obsahujú vstupné body pre vytvorenie trojuholníkov trojuholníkovej siete sú základnou a dôležitou informáciou o tvare plochy georeliéfu, ktorej model trojuholníková sieť tvorí. Ignorovanie tejto informácie pri konštruovaní tvarovo optimalizovaných nepravidelných trojuholníkových sietí má významné negatívne dôsledky na presnosť vytvoreného modelu georeliéfu. Aj keď existujú rôzne praktické dôvody pre používanie tvarovo optimalizovaných trojuholníkových sietí, geometrická vernosť modelu by mala byť prioritná, obzvlášť pri modelovaní georeliéfu, kde požadujeme aj spoľahlivé odvodenie geometrických charakteristík ďalších rádov.

1. Tvarovo optimalizované trojuholníkové siete

Pre použitie v aplikáciách sa zvyčajne požaduje, aby trojuholníkové siete boli lokálne alebo globálne optimálne na základe nejakého kritéria (Kolingerová a Ferko, 2001). Ak je kritérium založené na tvare trojuholníka, hovoríme o tvarovo závislých trianguláciách vytvárajúcich tvarovo optimalizované trojuholníky tvoriace nepravidelné trojuholníkové siete. Kritéria tvarovo závislých triangulácií môžeme podľa Kolingerovej a Ferka (2001) rozdeliť do dvoch kategórií. Do prvej z nich patria kritériá vychádzajúce z váhy strán. Do druhej patria kritériá vychádzajúce z veľkosti uhlov v trojuholníkoch. V kategórii kritérií vychádzajúcich z váhy strán túto autori uvádzajú:

- minimalizáciu súčtu dĺžok strán,
- maximalizáciu minimálnej výšky trojuholníka,
- minimalizáciu maximálnej dĺžky strany,
- minimalizáciu pomeru najdlhšej strany a výšky na túto stranu.

V kategórii kritérií vychádzajúcich z veľkosti uhlov uvádzajú:

- minimalizáciu maximálneho uhla,
- maximalizáciu minimálneho uhla,
- minimalizáciu maximálnej excentricity (súčtu vzdialeností vrcholov od stredu opísanej kružnice trojuholníka).

Tvarovo závislé triangulácie, pri ktorých sa optimalizuje tvar trojuholníka (využívajú sa informácie o polohe vrcholových bodov v rovine x, y), sa hodnoty výšok z bodov vstupného bodového poľa neberú do úvahy. Ako to bolo načrtnuté v úvode, je to príčinou väčšej nepresnosti vytvoreného modelu, detailnejšie sa tomu venujú nasledujúce kapitoly.

Najpoužívanejšia rovinná triangulácia je bezpochyby Delaunayova triangulácia DT (van Kreveld, 1996). Táto patrí medzi tvarovo závislé triangulácie. Využíva kritérium maximalizácie minimálneho uhla, ktoré je ekvivalentné podmienke opísanej kružnice trojuholníku, v ktorej neleží žiadny iný bod z množiny vrcholových bodov S . Základné vlastnosti Delaunayovej triangulácie DT(S) množiny bodov S vyplývajúce z uvedených kritérií sú podľa (van Kreveld, 1997; O'Rourke, 1998):

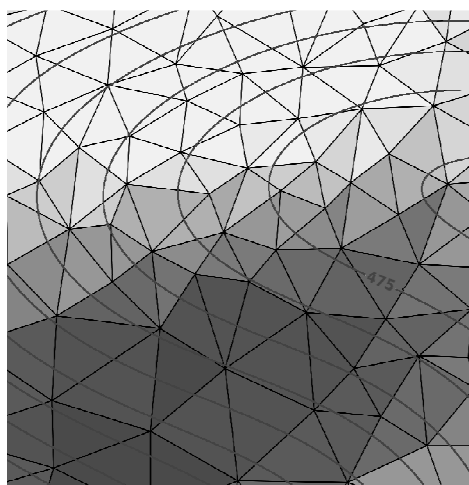
- hranica trojuholníkovej siete je konvexný obal bodov množiny S ,
- vo vnútri opísanej kružnice trojuholníka neleží žiadny bod z množiny S ,
- maximalizuje minimálny uhol v trojuholníku, ako aj v celej trojuholníkovej sieti,
- ak žiadna štvorica zo vstupných bodov nie je kocirkulárna (neleží na kružnici), je triangulácia jednoznačná.

Názor, že dlhé úzke trojuholníky nie sú vhodné pre reprezentáciu plochy (z dôvodu chýb pri interpolácii hodnôt), a preto je potrebná maximalizácia minimálneho uhla, je argumentom pre používanie Delaunayovej triangulácie. Skutočnosť, že tento názor je mylný, ukážeme ďalej. Rovnako tak jednoznačnosť triangulácie je výhodou pri niektorých aplikáciách. Bohužiaľ, Delaunayova triangulácia sa v literatúre zaoberajúcej sa modelovaním georeliéfu nezriedka uvádza ako jediný spôsob vytvorenia trojuholníkovej siete. Takmer všetky dostupné softvérové riešenia takisto využívajú pri tvorbe nepravidelnej trojuholníkovej siete Delaunayovu trianguláciu rozšírenú o viac či menej pokročilú správu obmedzení pre tvorbu trojuholníkov.

2. Nepresnosti modelov georeliéfu tvorených tvarovo optimalizovanými trojuholníkovými sieťami

Jedna z výhod nepravidelných trojuholníkových sietí je možnosť zachytiť kosť georeliéfu a línie nespojitosti. Tvarovo optimalizované trojuholníkové siete však vzhľadom k tomu, že nevyužívajú informácie o tvare plochy, nerešpektujú priebeh týchto línií a vytvárajú trojuholníky so stranami, ktoré križujú chrbátnice, údolnice, línie nespojitosti. Keďže tento nedostatok je už na prvý pohľad zrejmý a výrazne znižuje hodnotu modelu, obvyklým postupom je umožniť používateľovi pridať dodatočnú informáciu pre tvorbu trojuholníkov, tzv. obmedzenie. Toto obmedzenie tvorí súbor povinných strán trojuholníkov, ktoré sú takto predpísané, aj keď ovplyvnené trojuholníky potom nespĺňajú kritérium uvažované pri triangulácii. V prípade Delaunayovej triangulácie tak hovoríme o Delaunayovej triangulácii s obmedzením (angl. Constrained Delaunay Triangulation). V prevažnej väčšine sú obmedzenia vytvárané bez dôkladnej morfometrickej analýzy plochy, čo zvyšuje mieru subjektivity pri tvorbe modelu a môže byť nežiadúce.

Ďalším problémom, ktorý sa netýka len Delaunayovej triangulácie, prípadne iných tvarovo optimalizovaných trojuholníkových sietí, ale je pri nich výraznejší, sú striedajúce sa výrazné zalomenia na hranách trojuholníkov. V tomto prípade uvažujeme model v troch dimenziách – výška ne- tvorí atribútovú informáciu (priradený skalár výšky), ale predstavuje tretiu súradnicu – teda poly- edrický model založený na trojuholníkovej sieti. Takýto nedostatok sa najlepšie ukáže na mape osvetlenia odvodennej z modelu, kde sa nelogicky striedajú viac a menej osvetlené trojuholníky (obr. 1). Tento problém je takisto najčastejšie zjavný pri trojuholníkoch, ktoré nerešpektujú kosť georeliéfu a línie nespojitosti. Profil chrbátice a údolnice odvodennej z modelu je tvorený striedaj- úcimi sa viac a menej sklonenými časťami. Ako ďalej ukážeme, súvisí to s tým, že na týchto miestach plochy georeliéfu je normálová krivosť v smere dotyčníc k spádniciam výrazne menšia ako v smere dotyčníc k vrstevniciam. Naopak na miestach, kde je hodnota normálovej krivosti v smere dotyčníc k spádniciam výrazne väčšia ako v smere dotyčníc k vrstevniciam, sa táto nega- tívna vlastnosť prejaví v tvare odvodennej vrstevnice z modelu, ktorá má neprirodzené zmeny sme- ru, vytvára „zubý“.



Obr. 1 Osvetlenie reliéfu z tvarovo optimalizovanej trojuholníkovej siete

Z teórie aproximácie vyplýva, že optimálny trojuholník pre nahradenie plochy má byť „dlhý“ v smere minimálnej hodnoty druhej smerovej derivácie a „úžky“ v smere maximálnej hodnoty druhej smerovej derivácie. Pre prípady, kde je funkcia $z(x, y)$ výrazne tvarovaná v určitom smere, napr. $z \propto y$, je vhodné pre optimálnejšiu aproximáciu predĺžiť trojuholník v smere y (Melissaratos, 1993). S tým sa stotožňuje aj požiadavka odvodená z podmienky správnej konfigurácie trojuholníka (Krcho, 1999, 2001), na základe ktorej by trojuholník mal mať taký tvar, že jeho opísaná Steinerova elipsa je tvarovo zodpovedajúca Dupinovej indikatrix modelovanej plochy v jeho ťa- žisku (Feciskanin, 2009). Dupinova indikatrix je v každom bode georeliéfu grafom v jeho dotyko- vej rovine, ktorý v smere dotyčnice ku každému normálovému rezu znázorňuje hodnotu odmocni- ny polomeru normálovej krivosti plochy georeliéfu v danom smere. Trojuholníky by teda mali byť predĺžené v smere minimálnej absolútnej hodnoty normálovej krivosti a užšie v smere maximálnej absolútnej hodnoty normálovej krivosti modelovanej plochy.

S nesplnením uvedenej podmienky súvisí tiež vznik odchýlky normály trojuholníka δn – nor- mála vypočítaná pre rovinu trojuholníka nezodpovedá normále modelovanej plochy v mieste ťa- žiska trojuholníka. To spôsobuje odchýlky pri odvodení prvých parciálnych derivácií a tým aj po- mocou nich vyjadrených morfometrických veličín. Bližšie sa tomuto problému venujú práce (Kr- cho, 1999, 2001; Feciskanin, 2009).

Delaunayova triangulácia vytvára trojuholníky čo možno najviac rovnostranné (Worboys, Duckham, 2004), preto ňou vytvorené trojuholníky sú v súlade s uvedeným vhodné len na repre- zentáciu plochy, kde platí, že absolútne hodnoty extrémnych normálových krivostí sú podobné a Dupinova indikatrix je blízka kružnici alebo pravouhlej hyperbole. Na ploche georeliéfu sa často stretávame s miestami, kde je rozdiel absolútnych hodnôt extrémnych krivostí výrazný. Práve na

týchto miestach sa dá očakávať, že sa prejavia nedostatky Delaunayovej triangulácie. Ako bolo spomenuté, takéto miesta sú často na chrbátniciach a údolniciach, ktoré sú obvykle vstupom pre obmedzenie Delaunayovej triangulácie a to nedostatky zmierňuje. Takéto vlastnosti však majú aj ďalšie miesta, ktoré nie sú na prvý pohľad zreteľné a odhalí ich iba morfometrická analýza georeliéfu. Preto obmedzenia Delaunayovej triangulácie nie sú riešením pre minimalizovanie odchýlok hodnôt určených z trojuholníkov. Je potrebné zvoliť iné usporiadanie trojuholníkov na všetkých miestach, kde tvar trojuholníkov nezodpovedá tvaru reprezentovanej plochy.

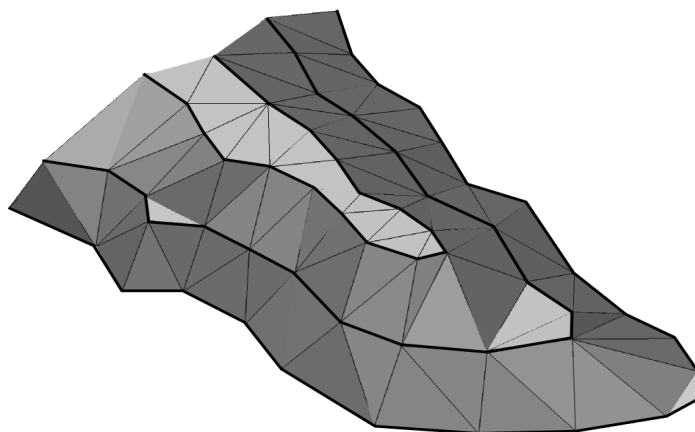
Rozšírené softvérové riešenia používajú zhodne pre vytváranie trojuholníkových sietí Delaunayovu trianguláciu s obmedzením, čím umožňujú vznik prezentovaných chýb. Používateľovi dávajú len možnosť korekcie chýb manuálnymi vstupmi. Bežne nie sú zastúpené iné postupy pre vylepšenie vlastností modelu. O niečo lepšia situácia je v prípade modelov vytvorených na základe vrstevníc, priblížime to ďalej.

3. Osobitné problémy pri tvorbe modelu na základe vrstevníc

So špecifickými problémami sa stretávame pri tvorbe trojuholníkových sietí, kde vstupom sú vrstevnice a ich lomové body sú použité ako vrcholy trojuholníkov. Na výslednom modeli nájdeme trojuholníky, ktorých všetky tri vrcholy majú rovnakú nadmorskú výšku, majú nulový sklon, z priebehu plochy nie sú očakávané (obr. 2). Môžeme rozlíšiť miesta, kde sa vyskytujú:

- v oblasti vrcholov príp. depresí,
- v oblasti sediel,
- na miestach výrazných zmien priebehu vrstevníc.

Prvé dve skupiny miest nie sú problémom triangulácie, ale nevhodného vstupného poľa bodov, kde absentuje dôležitá informácia o singulárnych bodoch poľa výšok – vrcholových, sedlových a depresných bodov. V oblasti sediel je možné tieto trojuholníky odstrániť ich zmenou usporiadania, pri vrcholových a depresných bodoch to možné nie je. Pre nás bude podstatnejší problém na miestach výrazných zmien priebehu vrstevníc. Horizontálne trojuholníky sú tu však len výraznejším dôsledkom problému striedajúcich sa zalomení na hranách trojuholníkov a nerešpektovania kostry georeliéfu a línií nespojitosti, spomínaného v predchádzajúcej časti. Dôvodom je skutočnosť, že trojuholníky nerešpektujú tvar modelovanej plochy. Opäť tu nastáva rozpor s optimálnym tvarom trojuholníka, keďže na miestach zmien priebehu vrstevníc je hodnota horizontálnej krivosti veľká (s ktorou úzko súvisí normálová krivosť v smere dotýčnice k vrstevnici), preto by mal byť trojuholník úzky v smere zmeny, čo znižuje možnosť jeho vytvorenia s tromi bodmi s rovnakou výškou. Ako bolo uvedené, pridanie obmedzení je riešením pre jednotlivé nevhodné trojuholníky. To znamená, že pre odstránenie nežiadúcich horizontálnych trojuholníkov musia predpísané hrany prechádzať cez všetky tieto trojuholníky.



Obr. 2 Trojuholníky vytvorené z vrstevníc

Použitie vrstevníc ako vstupu pre tvorbu modelu však prináša tiež topologickú informáciu, ktorú sa snažia rôzne automatizované postupy využiť pri korekcii chýb vo vytvorenom modeli. Na posúdenie nevhodnosti však využívajú len informáciu o tom, z ktorých vrstevníc má trojuholník vrcholy. Tým identifikujú horizontálne trojuholníky a môžu ich zmeniť. Jednou z možností je pridanie povinných hrán. Takýto princíp je použitý napr. v softvéri ATLAS DMT (Atlas, 2009). Iný spôsob spočíva v určení hrán horizontálneho trojuholníka, ktoré sú nevhodné, na nevhodnej hrane je pridaný bod a interpoláciou sa odhadne jeho výška. Postup založený na tomto princípe použili Barbalić a Omerbegović (1999). Body pridávali na základe generovanej spádnice cez nevhodné hrany a výšky interpolovali lineárne na základe koncových bodov určenej časti spádnice. Zamerali sa na rozšírenie možností produktu 3D Analyst firmy ESRI. Softvér IDRISI taktiež aplikuje tento postup, vyberá bod v strede hrany, výšku interpoluje na základe hodnôt výšky troch najbližších priesečníkov vrstevníc a priamok v štyroch hlavných smeroch. Týmto spôsobom dokáže doplniť aj chýbajúce body v oblasti vrcholov, sediel a depresii (Eastman, 2006).

Vzhľadom k podstate vzniku, problém so striedajúcimi sa zalomeniami trojuholníkov v smere vrstevníc, ktorý spôsobuje lomený tvar vrstevníc, je výraznejší, ak sú trojuholníky dlhšie v smere spádníc. Preto je obvyklým postupom pri tvorbe modelu z vrstevníc obmedziť trojuholníky tak, aby mohli byť konštruované iba medzi najbližšími vrstevnicami. Tým sa spomínaný problém zmierňuje. Vrstevnice tvoria obmedzenie pre tvorbu trojuholníkov a neznamená to, že sa pri konštrukcii trojuholníkov berú do úvahy hodnoty výšok vo vrchoch. Takúto možnosť poskytujú všetky spomínané softvérové riešenia. V softvéri ATLAS DMT je možnosť automaticky vyhľadať tie trojuholníky, ktorých vrcholové body majú rozdiel výšok dvojnásobok intervalu vrstevníc a doplniť povinné hrany iba na tých miestach (Atlas, 2009).

S vytváraním trojuholníkov medzi vrstevnicami súvisí aj postup prezentovaný Herbertom et al. (1996), ktorý vytvára všetky trojuholníky iba z bodov dvoch susedných vrstevníc. Predpokladom je posúdenie topológie a určenie susediacich vrstevníc. Hrany sú potom tvorené najkrajšími spojnicami medzi vrstevnicami. Nejde tak čisto o tvarovo závislú trianguláciu. Riešenie zabráňuje tvorbe horizontálnych trojuholníkov na miestach zmeny priebehu vrstevníc. Ako uvádzajú autori, postup vyžaduje ošetrovanie rôznych možností priebehu vrstevníc, ktoré môžu nastať. Preto je vhodný len na miestach, kde vrstevnice nemajú výrazné zmeny priebehu a horizontálnej vzdialenosti.

4. Tvarovo závislá alebo dátovo závislá optimalizácia?

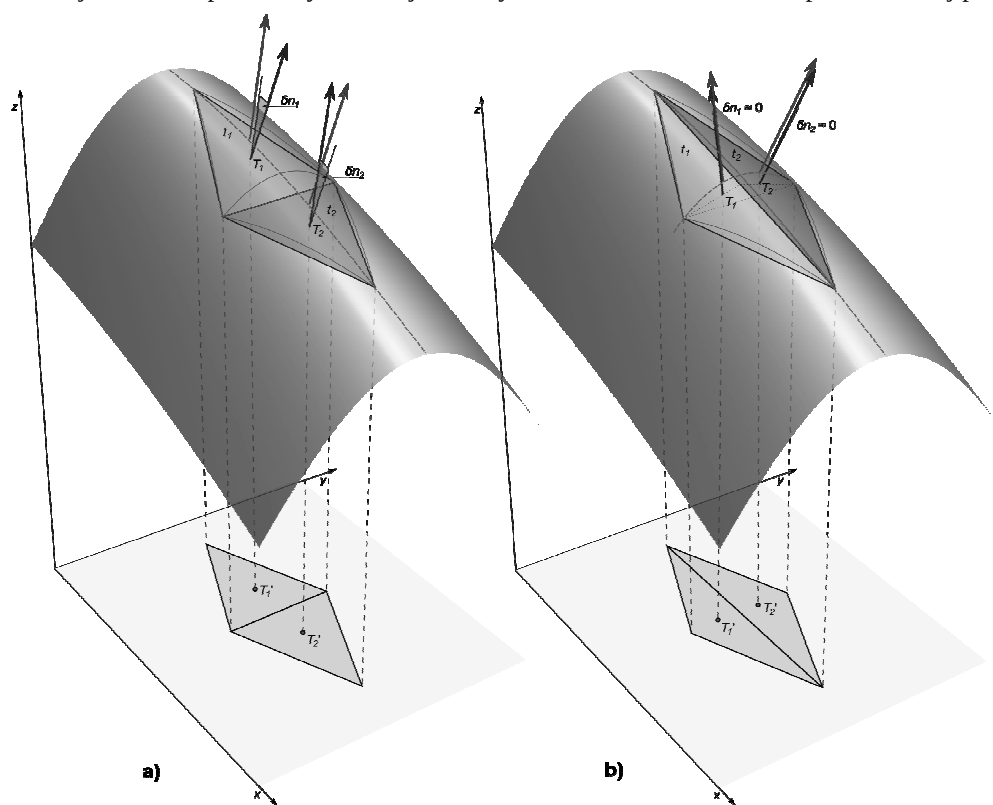
Nepravidelné primárne diskkrétne bodové pole, ktoré tvorí vstup pre vytvorenie nepravidelnej trojuholníkovej siete, môže byť podľa Krcha (1990) dvoch druhov. Prvého druhu, ak je vopred známe priestorové rozloženie skalárov skalárneho poľa, ktoré modelujeme, alebo druhého druhu, ak priestorové rozloženie skalárov nepoznáme a body nepravidelného primárneho diskkrétneho poľa sú dané a hodnoty v nich meriame.

Georeliéf so svojim skalárnym poľom výšok patrí k prvému druhu poľí. Práve preto môžeme hovoriť o možnosti prispôbenia sa tvaru modelovanej plochy – georeliéfu. Na vlastnosti trojuholníkov sa tak kladú rôzne požiadavky, ktorých cieľom je zabezpečiť čo najlepšiu geometrickú vernosť modelu vzhľadom k originálu, čiže modelovanej ploche georeliéfu. Tie vychádzajú z charakteristík tvaru plochy georeliéfu. Nevyhnutné je poznať (v praxi odhadnúť) základné geometrické charakteristiky modelovanej plochy georeliéfu. Informácie o tvare plochy predstavujú hodnoty skalára výšky z priradeného bodom z množiny bodov vstupného diskkrétneho bodového poľa.

Model je podľa Worboysa a Duckhama (2004) vytvorená konštrukcia, v ktorej časti zo zdrojovej domény sú reprezentované v cieľovej doméne. Najdôležitejšou vlastnosťou pre modelovanie georeliéfu sú jeho geometrické vlastnosti charakterizované množinou morfometrických veličín. Tým, že pri tvorbe modelu sú tieto geometrické vlastnosti uvažované, potom sú geometrické vlastnosti aj lepšie reprezentované vo výslednom modeli. Naopak pri tvarovo optimalizovaných trojuholníkoch sa neberie do úvahy žiadna informácia (okrem rozmiestnenia vstupných bodov) o geometrii plochy georeliéfu, ktorú majú reprezentovať. Znamená to, že pri procese tvorby trojuholníkovej siete, ktorý významne ovplyvňuje vlastnosti výsledného modelu sa úplne zanedbáva vzťah objekt modelovania – model!

Rovnako v práci Shojaei et al. (2006) je uvedené, že informácie o tvare reprezentovanej plochy georeliéfu „zakódované“ v hodnotách výšok vstupných bodov majú veľký vplyv na kvalitu výsledného modelu. Podobne Kolingerová (1999) zdôraznila, že tvarovo optimalizované trojuholníky nie sú vhodné pre reprezentovanie častí plochy, kde je krivosť v jednom smere dominantná. Odporúča používať dátovo závislé triangulácie. Tento typ triangulácií využíva okrem polohy bodov aj ďalšie informácie ovplyvňujúce tvorbu trojuholníkov. Keďže dátovo závislé triangulácie sa snažia prispôsobiť trojuholníky modelovanej ploche, nebráni sa použitiu dlhých a úzkych trojuholníkov, ak si to reprezentovanie plochy vyžaduje.

Dátovo závislá triangulácia, ktorá sa pridrižiava poznatkov o tvare optimálnych trojuholníkov pre reprezentovanie daného tvaru plochy georeliéfu, minimalizuje chyby spomínané v predchádzajúcich častiach. Minimalizuje odchýlky vypočítaných normál z trojuholníkov, čím zvyšuje presnosť odvodenia hodnôt morfometrických veličín, čo má veľký význam pri použití vytvoreného modelu ako vstupu pre ďalšie špecifické aplikácie. Zníženie hodnôt odchýlok potvrdili experimenty popísané v práci (Feciskanin, 2009). Takýto spôsob vytvorenia trojuholníkov tiež znižuje nerealistické zalomenia na hranách trojuholníkov. Neplatí to absolútne, len na miestach hladkého priebehu modelovanej plochy, pretože v kontraste s tým hrany trojuholníkov tiež kopírujú miesta najväčšej zmeny priebehu plochy georeliéfu. Z toho dôvodu, že na výrazných chrbátniciach a údolniciach je krivosť v smere ich priebehu výrazne nižšia ako v smere na neho kolmom, v súlade s vlastnosťami podmienok správnej konfigurácie trojuholníkov a určenia tvaru optimálneho trojuholníka, takto definovaná dátovo závislá triangulácia preferuje strany, ktoré ležia na chrbátniciach, údolniciach a na ďalších líniiach výraznej zmeny tvaru plochy (obr. 3). Pri vytváraní trojuholníkovej siete takýmto spôsobom optimalizácie nie je preto potrebné definovať obmedzenia pre vytváranie trojuholníkov, pretože vytvára trojuholníky na základe určenia tvaru reprezentovanej plochy.



Obr. 3 Možnosti triangulácie a) tvarovo závislá, b) údajovo závislá

Záver

V tomto príspevku sme sa snažili poukázať na to, že tradičný postup vytvorenia modelu georeliéfu vo forme nepravidelnej trojuholníkovej siete pomocou Delaunayovej triangulácie je príčinou vzniku nepresností a chýb, ktoré znižujú kvalitu a použiteľnosť modelu. Softvérové riešenia pre vytváranie digitálnych modelov georeliéfu však presadzujú optimalizáciu na základe Delaunayovho kritéria ako nevyhnutnosť pre správnu reprezentáciu modelovanej plochy georeliéfu. Napríklad v (Atlas, 2009) je uvedené „pre správne modelovaný tvar terénu je optimalizácia nevyhnutná“. Toto vyjadrenie je pravdivé, skrýva sa za tým však použitá optimalizácia na základe Delaunayho kritéria s popisovanými dôsledkami.

V softvéroch sú zahrnuté možnosti opráv najzásadnejších problémov, ale tie umožňujú len korigovať vzniknuté problémy. Tie sa objavujú práve z dôvodu zvoleného postupu pre vytvorenie modelu. Použitím Delaunayovej triangulácie sa model optimalizuje pre reprezentovanie guľovej plochy, ako nejakého priemerného tvaru. Prečo však pri triangulácii nevyužiť informácie o tvare modelovanej plochy, ktoré máme dostupné a neprispôbiť model objektu modelovania?

Pritom vytvorenie dátovo závislej triangulácie je možné aj pomocou lokálnej optimalizácie, čiže veľmi jednoduchým algoritmom preklápania strán. Zásadným prvkom, ktorý ovplyvňuje výsledné vlastnosti, je použité optimalizačné kritérium. Ak sa pri jeho definovaní zohľadňujú vlastnosti optimálneho trojuholníka pre reprezentovanie tvaru modelovanej plochy, tak vo výslednom modeli by sa mali minimalizovať uvádzané problémy. V súčasnosti práve testujeme vlastnosti rôzne definovaných dátovo závislých optimalizačných kritérií. Výsledky by mali priniesť konkrétne odporúčanie pre použitie postupov, ktorých výsledkom bude skutočne optimalizovaná trojuholníková sieť pre reprezentovanie geometrických vlastností plochy georeliéfu. Zvýšenie kvality výsledného modelu by zároveň znížilo početnosť nutných nástrojov pre jeho vylepšenie, ktoré by mali obsahovať softvérové riešenia pre tvorbu digitálnych modelov georeliéfu vo forme nepravidelnej trojuholníkovej siete.

Príspevok vznikol s podporou grantov VEGA 1/0469/10 a VEGA 1/0457/10.

Literatúra

- ATLAS s.r.o. (2009). *Atlas DMT verzia 5 – Manuál*. [cit. 2010-01-14]. Dostupné na: <<http://www.atlasltd.cz/download.php?f=478>>
- BARBALIĆ, D., OMERBEGOVIĆ, V. (1999). Correction of Horizontal Areas in TIN Terrain Modeling - Algorithm. *Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference*. [cit. 2010-05-21]. Dostupné na: <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap924/p924.htm>>
- EASTMAN, J. R. (2006). *IDRISI Andes – Guide to GIS and Image Processing*. Worchester (Clark University).
- FECISKANIN, R. (2009). *Optimalizácia nepravidelných trojuholníkových sietí pre modelovanie georeliéfu*. [dizertačná práca]. Brno (Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita).
- HERBERT, M. J. et al. (1996). Local and global approaches for constructing TIN's from contour data. In *Proceedings, 2. The second joint European conference & exhibition on Geographical information*. Barcelona (IOS), s. 81-86.
- KOLINGEROVÁ, I. (1999). Genetic approach to data dependent triangulations. In *Proceedings of Spring Conference on Computer Graphics*. Budmerice, s. 229-238.
- KOLINGEROVÁ, I., FERKO, A. (2001). Multicriteria-optimized triangulations. *The Visual Computer*, 17(6), s. 380-395.
- van KREVELD, M.J. (1996). Digital elevation models and TIN algorithms. *Lecture Notes in Computer Science*, (1340), s. 37-78.
- van KREVELD, M.J. (1997). Algorithms for triangulated terrains. In *Proceedings of the 24th Seminar on Current Trends in Theory and Practice of Informatics*. (Springer-Verlag), s. 19-36.
- KRCHO, J. (1990). *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Bratislava (Veda).
- KRCHO, J. (1999). Modelling of georelief using DTM - The influence of point configuration of input points field on positional and numeric accuracy. *Geografický časopis*, 51, 3, s. 225-260.
- KRCHO, J. (2001). *Modelling of georelief and its geometrical structure using DTM: positional and numerical accuracy*. Bratislava (Q111).
- MELISSARATOS, E.A. (1993). *Lp Optimal d Dimensional Triangulations for Piecewise Linear Interpolation: A New Result on Data Dependent Triangulations*. Utrecht (Rijksuniversiteit).
- O'ROURKE, J. (1998). *Computational Geometry in C 2*. Cambridge (University Press).

- SHOJAEI, D., HELALI, H., ALESHEIKH, A. A. (2006). Triangulation for Surface Modelling. In *9th Symposium on the 3-D Analysis of Human Movement Proceedings*. Valenciennes.
- WORBOYS, M., DUCKHAM, M. (2004). *GIS: a computing perspective*. Boca Raton, Florida (CRC Press).

S u m m a r y

Problems of georelief models created by shape optimized triangulated irregular networks

Triangulated irregular networks are often used in georelief modeling. Main advantages of the model in the form of triangulated irregular network are adapting to the shape of modeled georelief surface, effective representation of the surface and also capturing the georelief skeleton and discontinuities. Adjustments of the model to modeled georelief surface are inadequate in procedures implemented in common software solutions. Height values included in entry points for creating triangles of triangulated networks are essential and important information about the shape of georelief surface. Ignoring this information when constructing the shape optimized triangulated irregular network has a significant negative impact on the accuracy of the generated georelief model. The most common planar triangulation is a Delaunay triangulation. This is the shape dependent triangulation as well. It uses the criterion of maximizing the minimum angle, which is equivalent to the condition circumcircle of triangle which no other vertex lies in.

Shape optimized triangulated networks due to the fact that they do not use the information about the shape of the surface create triangles with sides crossing ridge lines, valley lines and lines of discontinuity. This failure significantly reduces the quality of a model, so it is usual practice to allow the user to add additional information to create triangles – restriction. The restrictions are created manually in the majority which increases the degree of subjectivity in the creation of the model and may be undesirable. Another problem that is not only in Delaunay triangulation, but in the case has a worse effect, are alternating major folds on the edges of triangles. We consider a model in three dimensions now. This lack is the best to show on the shaded relief map derived from the model where we can find illogical more and less illuminated bordering triangles (Fig. 1). From approximation theory results that the optimal triangle for surface representation should be extended in the direction of the minimum absolute value of the normal curvature and narrower in the direction of the maximum absolute value of the normal curvature of modeled surface. Not fulfilling this condition the triangle normal deviation δn is resulted – calculated normal of the triangle plane is not the same as normal of surface at the triangle centroid. This causes deviations in the first partial derivatives and morphometric variables expressed with it. Delaunay triangulation produces as nearly equilateral triangles as possible, so it is appropriate representation only for areas where the absolute values of extreme normal curvature are similar. There are many places on georelief surface where the difference in absolute values of extreme curvature is significant. It can be expected that deficiencies of Delaunay triangulation in these places are shown. Constraints in Delaunay triangulation are not a solution to minimize the deviations because it can not be used for all the trouble spots. It is necessary to choose a different arrangement of triangles in all places where the shape of the triangle is inadequate to represent surface.

When creating a triangular network where the input are contour lines, we find triangles in the final model where all three vertices have the same altitude and triangle slope is zero (Fig. 2). Horizontal triangles are only more significant consequence of alternating folds on the edges problem and disregarding of georelief skeleton and lines of discontinuity. Possibilities to automatically refine triangles are bit better in common softwares in case of contour input.

The shape optimized triangles do not take into account any information (except for distribution of input points) georelief surface geometry, they have to represent. This means that the process of creating a triangulated network which significantly affects the properties of the resulting model is completely neglected relationship object of modeling – model! Together with other authors we recommend using of data dependent triangulation. This type of triangulation is using other information in addition to the position of points which affects the formation of triangles. Since the data dependent triangulation try to adapt the triangles to modeled surface, it use long and narrow triangles, if it is required for representing the surface. Data dependent triangulation defined with respect optimal triangle shape preferred edges on ridge lines, valley lines and other lines of changes in surface shape (Fig. 3).

Fig. 1 Shaded relief of shape optimized triangulated network

Fig. 2 Triangles created from contours

Fig. 3 Possibilities of triangulation: a) shape dependent, b) data dependent

Recenzovala:

RNDr. Margita VAJSÁBLOVÁ, PhD.,
Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta,
Bratislava