

INTERPOLÁCIA DÁT V 3D PRIESTORE ROZŠÍRENOU METÓDOU KRIGING

Eva STOPKOVÁ¹

¹ Katedra geodetických základov, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Radlinského 11, 813 68, Bratislava, Slovenská republika
eva.stopkova@stuba.sk

Abstrakt

Klasické interpolačné metódy (napr. kriging) umožňujú určiť neznámu hodnotu veličiny ako funkciu horizontálnej vzdialenosti bodov, na ktorých sú lokalizované jej známe hodnoty. Navrhované rozšírenie spočíva v odhadovaní neznámych hodnôt v závislosti od dvoch premenných: horizontálnej vzdialenosti a prevýšenia. Príspevok pojednáva o implementácii metódy do prostredia GRASS GIS formou modulu, ktorý bol testovaný na reálnych hodnotách (skutočné tiažové zrýchlenie). Testovanie zahŕňalo štatistické vyhodnotenie výsledkov a porovnanie s interpoláciou matematicky generovaných hodnôt (normálne tiažové zrýchlenie).

Abstract

Interpolation methods as kriging allow obtaining unknown values of various phenomena as functions of horizontal distance between points, where known values are located. Designed extension estimates unknown values as functions of two variables: horizontal distance and elevation. This paper deals with implementation of method to GRASS GIS environment. Developed module has been tested using real data (gravity). Results have been statistically interpreted and compared with interpolation of mathematically generated values (normal gravity).

Kľúčové slová: 3D GIS, 3D kriging.

Keywords: 3D GIS, 3D kriging.

1. ÚVOD

Súčasná riešenia geografických informačných systémov (GIS) poskytujú širokú paletu nástrojov na priestorovú analýzu geoobjektov, ktorých poloha na zemskom povrchu premietnutom do roviny je daná dvojicou súradníc. V prípade, že je potrebné pracovať aj s treťou súradnicou (absolútnou výškou alebo prevýšením), v klasickom 2D prístupe ku GIS táto informácia prislúcha k atribútovej zložke geoobjektu a nie je súčasťou samotnej jeho geometrie (Raper, 1992). Preto sa súčasný GIS zvykne charakterizovať aj pojmom 2,5D GIS.

Pre potreby práce s geoobjektmi v 3D priestore sa rozvíja tzv. 3D GIS, ktorý sa od klasických 2D (2,5D) riešení líši v princípe tým, že informáciu o výške chápe ako plnohodnotnú súradnicu, nie len ako atribút geoobjektu. S tým súvisia nové modely reprezentácie geodát, špeciálne dátové typy a taktiež zmena v prístupe k priestorovým analýzám, o čom na príklade interpolácie v 3D priestore pojednáva tento príspevok.

2. MOTIVÁCIA

Princíp interpolácie priestorových dát je založený na tom, že mnohé spojité javy v prírode (úhrn zrážok alebo miera znečistenia ovzdušia) vykazujú určitú závislosť od vzájomnej vzdialenosti. Interpolačné metódy (kriging, metóda najbližších susedov, Delaunayova triangulácia a iné) používajú ako argument funkcie, pomocou ktorej odhadujú neznámu hodnotu veličiny, vzdialenosť danú rovinnými súradnicami x , y .

Vývoj niektorých javov však súvisí predovšetkým so zmenou výšky (napr. teplota vzduchu). Pri interpolácii takýchto hodnôt možno siahnuť po interpolačných metódach, ako je *kriging s externým driftom* alebo

cokriging. Podľa (Wackernagel, 2003), *kriging s externým driftom* umožňuje matematické pripojenie vplyvu pomocnej premennej k interpolovanej veličine a *cokriging* rozširuje metódu *kriging* použitím variogramu alebo kovariančného modelu pre viacero premenných.

Tieto interpolačné metódy sú však použiteľné v prípade, že vstupné hodnoty sú vzťahované len k bodom na povrchu Zeme (t.j. v dvojrozmernom priestore jeho priemetu do roviny) a výsledkom interpolácie má byť 2D raster, ktorého 3D vizualizáciu možno prípadne vytvoriť pomocou digitálneho modelu reliéfu (DMR). Ak by šlo o dáta popisujúce vertikálne členené javy (napr. údaje z geologickej či archeologickej sondy), tzn. známe hodnoty veličiny by boli vzťahované k bodom v 3D priestore, potom aj odhadnuté hodnoty by mali byť v tvare 3D rastra (voxlera). Interpolácia dát popisujúcich takéto javy vyžaduje prostredie 3D GIS z dôvodu odlišného prístupu k vstupným aj výstupným dátam. Taktiež je užitočné definovať príslušnú interpolačnú funkciu pomocou premenných, ktorých východiskom je trojrozmerný priestor. Ide o trojicu súradníc a o kombináciu horizontálnej vzdialenosti s prevýšením, príp. so sklonom spojnice bodov voči horizontálnej rovine (Environmental Modeling Systems, 2012), zenitovým uhlom a pod.

3. TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ EXPERIMENTU

V tejto kapitole sú stručne zosumarizované poznatky z (Stopková, 2012a), potrebné na objasnenie praktickej realizácie experimentu v nasledujúcej stati.

Navrhované rozšírenie metódy *kriging* umožňuje interpolovať dáta vzťahované k bodom lokalizovaným trojicou súradníc v trojrozmernom priestore, pričom výsledkom sú hodnoty v 3D rasti. Riešenie bolo inšpirované metódou *ordinary kriging* (bežný *kriging*), ktorá je podľa (Wackernagel, 2003) spomedzi rôznych interpolačných metód typu *kriging* používaná najčastejšie.

3.1 Princíp interpolačnej metódy *ordinary kriging* (bežný *kriging*)

Interpolácia hodnôt metódou *ordinary kriging* (bežný *kriging*) spočíva najskôr vo výpočte experimentálneho variogramu a v určení koeficientov teoretického variogramu. Následne je možné určiť optimálne váhy známych hodnôt úpravou systému rovníc (Wackernagel, 2003):

$$\begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \dots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \dots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1^{OK} \\ \vdots \\ w_n^{OK} \\ \mu_{OK} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

w^{OK} sú váhy prislúchajúce vstupným hodnotám, μ_{OK} predstavuje Lagrangeov multiplikátor na pripojenie podmienky, podľa ktorej súčet váh musí byť rovný 1. Ľavá strana systému rovníc vyjadruje rozdielnosti medzi známymi hodnotami, napravo sú rozdielnosti medzi známymi hodnotami a odhadom neznámej na interpolovanom bode, získané pomocou teoretického variogramu. Výhoda bežného krigingu spočíva v tom, že ak sa výpočtový bod zhoduje s meraným, potom odhadovaná hodnota bude identická s hodnotou meranou na tomto bode (Wackernagel, 2003).

Po výpočte optimálnych váh je možné určiť neznámu hodnotu na výpočtovom bode pomocou vzťahu (Wackernagel, 2003), kde pravá strana predstavuje sumáciu vážených známych hodnôt vzťahovaných k vstupným bodom:

$$Z'(x_0) = \sum_{i=1}^n w_x \cdot Z(x_a) \quad (2)$$

3.2 Navrhované rozšírenia

Variogram, použitý pri riešení systému rovníc (1), je štandardne funkciou vzdialenosti dvoch bodov v priemete do roviny. Na to, aby mohol byť aplikovaný aj na analýzu vzájomných väzieb medzi hodnotami vertikálne členených javov, bola do funkčného vzťahu pridaná ďalšia premenná - prevýšenie Δz :

$$\gamma_{3D}(h, \Delta z) = 0.5 \cdot (z(x_a + h, z_a + \Delta z) - z(x_a, z_a))^2 \quad (3)$$

$\gamma_{3D}(h, \Delta z)$ predstavuje rozdielnosť hodnôt z , vzťahnutých k bodom, z ktorých jeden je daný polohou x_a v priemete do roviny a výškou z_a a poloha druhého je určená pomocou ich vzájomnej vzdialenosti (x_a+h) a prevýšenia ($z_a+\Delta z$).

Ďalšie zmeny spočívajú v aplikovaní obmedzenia dosahu výpočtu experimentálneho variogramu len do tretiny maximálnej vzdialenosti medzi bodmi podľa (Barnel, 2012). Uvedená úprava kladie menšie nároky na výkon počítača, pretože ak by boli použité všetky body (n), počet dvojíc (rozdielností medzi hodnotami vzťahnutými k týmto bodom) by bol $n \cdot (n-1)/2$. Zároveň do výpočtu nevstupujú body, ktorých prípadný vzájomný vplyv je zanedbateľný vzhľadom na ich relatívne veľkú vzdialenosť.

Teoretický variogram je namiesto rovinatej plochy modelovaný parabolickou funkciou, ktorá viac vystihuje vývoj veličiny v závislosti od vzdialenosti a prevýšenia bodov. Táto myšlienka je podrobnejšie popísaná v (Stopková, 2012a).

Ostatné úpravy sú predovšetkým praktického charakteru a vyplývajú z potreby prispôsobenia sa trojrozmernému priestoru. Preto sú spomenuté až v podkapitole 3.2.

4. PRAKTICKÁ REALIZÁCIA EXPERIMENTU

Ako bolo načrtnuté už v kapitole 1, je síce možné vykonať interpoláciu dát s využitím tretej súradnice, avšak nie v reálnom 3D priestore. (Horák, 2008) uvádza príklady softvérov, ktoré ponúkajú nástroje na simuláciu dát v 3D priestore (*SIMUL* v jazyku Fortran) alebo na interpoláciu 3D dát (*GSTAT* (GPL), *Voxler* (Golden Software)), tieto softvéry však nedisponujú inou funkcionalitou GIS.

Interpoláciu s využitím tretej súradnice ponúka napr. *ArcGIS* (ESRI) v sade nástrojov *Geostatistical Analyst*, avšak stále ide o prostredie 2,5D GIS a výsledkom interpolácie je naďalej 2D raster. Interpoláciu 3D dát v 3D prostredí deklarujú napr. softvéry *Aquaveo* (Environmental Modeling Systems) a *Gocad* (Gocad Research Group). Napriek kompatibilitate oboch softvérov s GIS produktmi (v prípade softvéru *Gocad* ide dokonca o implementáciu topologického modelu) nemožno hovoriť o komplexnom riešení 3D GIS.

4.1 Softvérové prostredie

Rozšírenie metódy *kriging* v priestore bolo najskôr vyvinuté a testované v prostredí výpočtového softvéru *Matlab* (MathWorks) s použitím modifikovanej, už existujúcej funkcie na výpočet variogramu (Alghalandis, 2012), o čom pojednáva (Stopková, 2012a). Riešenie bolo následne preprogramované v jazyku C a implementované formou modulu (s pracovným názvom *r3.kriging_3D*) do prostredia open source softvéru *GRASS GIS* s ambíciou neskoršieho zverejnenia.

Dôvody, prečo bolo použité prostredie softvéru *GRASS GIS*, sú podrobnejšie uvedené v (Stopková, 2012b). Stručne možno povedať, že *GRASS GIS* podporuje 3D dátové typy tak pre vektorové, ako aj pre rastrové dáta, poskytuje niekoľko alternatív priestorových analýz 3D dát a disponuje širokou základňou vývojárov a používateľov, ktorým otvorený zdrojový kód s množstvom zabudovaných funkcií umožňuje slobodne rozširovať a dopĺňať možnosti softvéru.

GRASS GIS už disponuje modulom *v.vol.rst* na interpoláciu dát v 3D priestore metódou regularizovaného splajnu s tenziou (Neteler a Mitasova, 2002).

Niektoré časti zdrojového kódu modulu *r3.kriging_3D* vznikli úpravou pasáží zdrojových kódov už existujúcich modulov, konkrétne vytvorenie grafického rozhrania modulu s načítaním nastavení a prevzatie hodnôt z atribútov tabuľky boli riešené na základe modulu *v.buffer2* (Blažek a Matev, 2008) a zápis hodnôt do 3D rastra bol vytvorený podľa *r3.gwflow* (Gebbert, 2006).

4.2 Špecifiká práce v prostredí 3D GIS

V rámci modulu *r3.kriging_3D* sú s využitím funkcií podľa (GRASS Development Team, 2012) realizované niektoré vyššie uvedené odlišnosti v spôsobe narábania s dátami v trojrozmernom priestore.

Vstupné dáta sú dodané vo vektorovej vrstve, ktorá obsahuje body lokalizované súradnicami v trojrozmernom priestore. Výšková súradnica je teda daná geometriou bodov, načítava sa spolu s ostatnými súradnicami, z atribútovej tabuľky je použitá len hodnota interpolovanej veličiny.

Interpolované hodnoty sú zapisované do 3D rastrovej vrstvy, ktorá analogicky k 2D rastru pozostáva z kvádrov (tzv. voxelov) s rozmermi danými rozlíšením v smeroch súradnicových osí. Pri vizualizácii však jednotlivé voxely nevidno, aplikácia *nviz* v prostredí *GRASS GIS* ponúka znázornenie 3D rastra formou rezov alebo izoplôch.

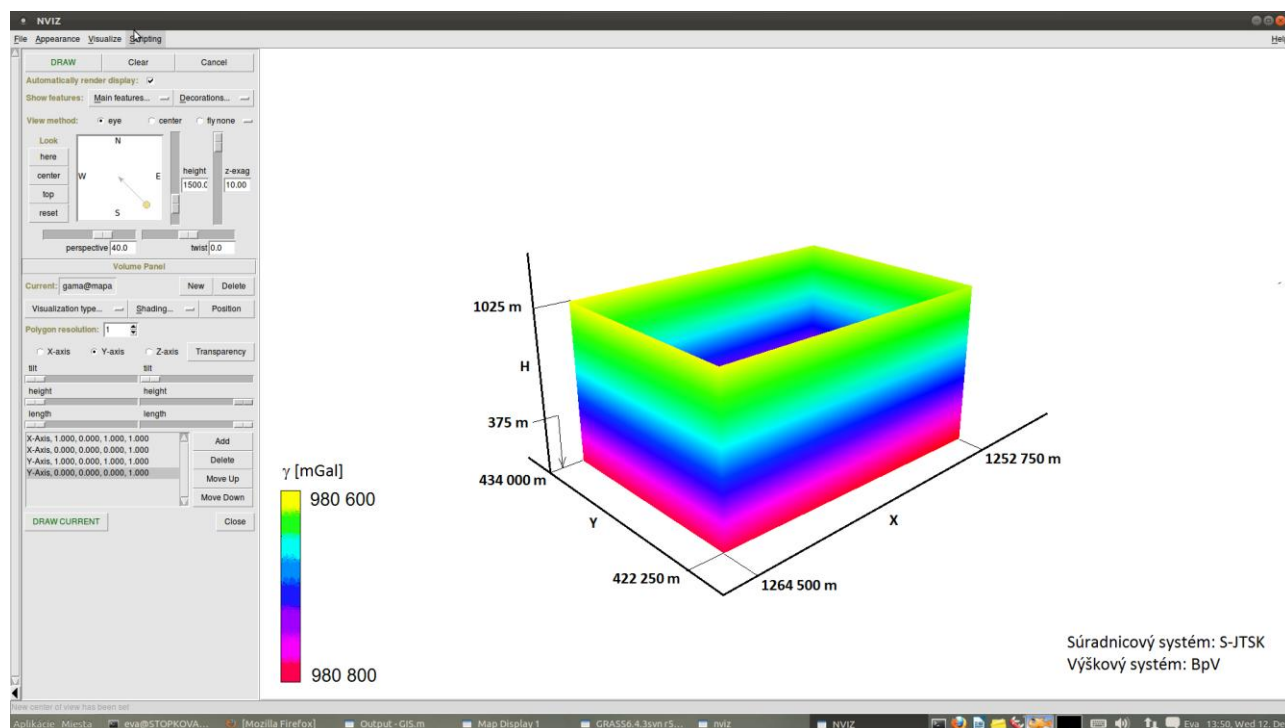
5. TESTOVANIE VÝSLEDKOV

Modul *r3.kriging_3D* bol testovaný na reálnych hodnotách skutočného tiažového zrýchlenia a na hodnotách normálneho tiažového zrýchlenia, ktoré boli matematicky vygenerované na tých istých bodoch. Testovanie zahŕňalo porovnanie interpolovaných hodnôt s výsledkami interpolácie vlastným, v predchádzajúcej práci (Stopková, 2012a) otestovaným skriptom v softvéri *Matlab* (MathWorks), pričom toto porovnanie bolo štatisticky vyhodnotené overením normality rozdielov.

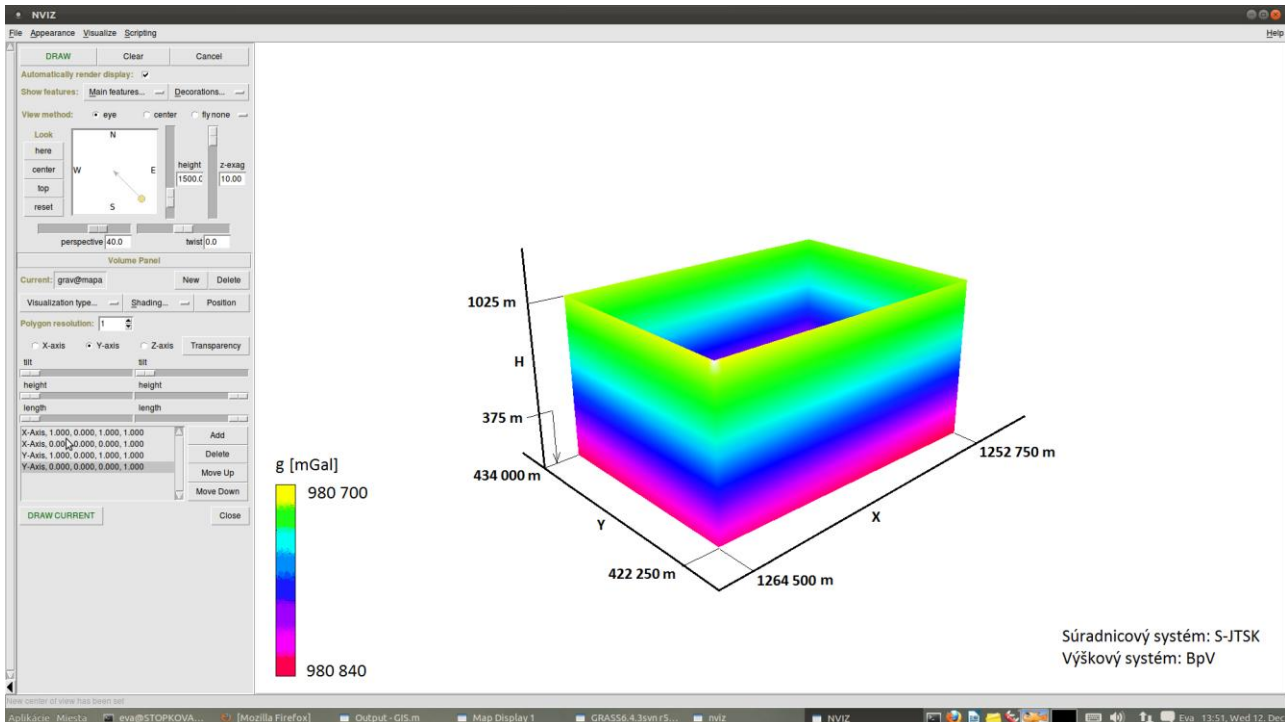
5.1 Výsledky interpolácie 3D dát v softvéri *GRASS GIS*

Vstupné hodnoty v tvare x_{S-JTSK} , y_{S-JTSK} , H_{BpV} , g (resp. γ) boli vzťahnuté k bodom na povrchu Zeme v záujmovom území s rozlohou približne 12 km x 8 km a s maximálnym prevýšením medzi bodmi 615 m. Hodnoty normálneho tiažového zrýchlenia boli vypočítané pomocou vzťahov podľa (Hofmann-Wellenhof a Moritz, 2006). Hodnoty skutočného tiažového zrýchlenia boli prevzaté z gravimetrického mapovania (Kubeš a kol., 2001).

Výsledkom interpolácií oboch súborov dát je 3D raster s rozmermi danými rozsahom záujmového územia a s rozlíšením 250 m x 250 m x 50 m. 3D rastre boli vizualizované v aplikácii *nviz* softvéru *GRASS GIS* (Obr. 1, Obr. 2), ktorá umožňuje zobrazovať aj 3D dáta, avšak zatiaľ pre ne nepodporuje pridávanie mimorámových údajov. Popis, súradnicové osi a približná legenda boli preto dokreslené dodatočne.



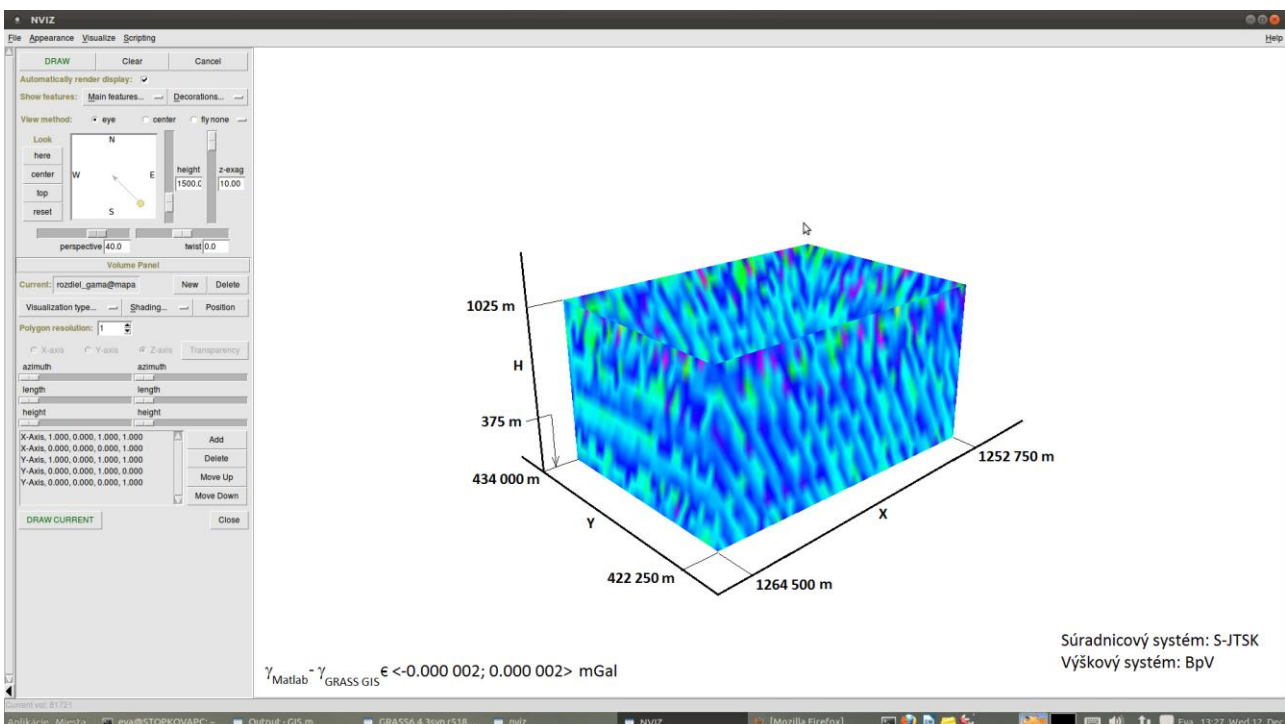
Obr. 1. Vizualizácia výsledkov interpolácie normálneho tiažového zrýchlenia formou bočných rezov.



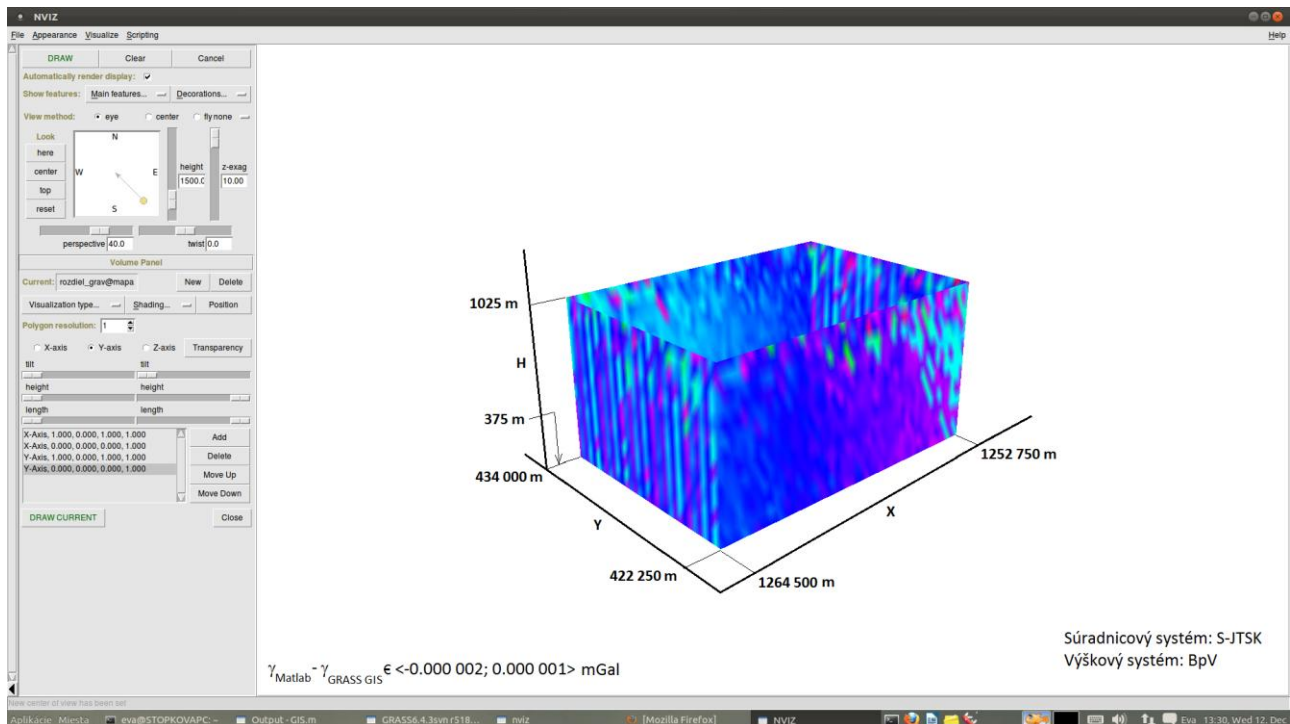
Obr. 2. Vizualizácia výsledkov interpolácie skutočného tiažového zrýchlenia formou bočných rezov.

5.2 Porovnanie výsledkov s hodnotami interpolovanými v softvéri *Matlab* (MathWorks)

Rozšírenie metódy *kriging* v priestore bolo v minulosti vytvorené a testované v prostredí *Matlab* (MathWorks) (Stopková, 2012a). Preto boli výsledky interpolácie v prostredí *GRASS GIS* porovnané s výsledkami identického výpočtu pomocou už otestovaného skriptu (Obr. 3, Obr. 4).



Obr. 3. Vizualizácia (formou bočných rezov) porovnania interpolácie normálneho tiažového zrýchlenia v rôznych softvérových prostrediach.



Obr. 4. Vizualizácia (formou bočných rezov) porovnania interpolácie skutočného tiažového zrýchlenia v rôznych softvérových prostrediach.

5.3 Overenie normality rozdielov vo výsledkoch interpolácie dát v prostredí Matlab a GRASS GIS

Normalita rozdielov medzi hodnotami interpolovanými v dvoch rôznych softvérových prostrediach bola overená testami empirických koeficientov asymetrie a excesu. Testovacie štatistiky (empirický koeficient asymetrie $\hat{\gamma}_1$ a empirický koeficient excesu $\hat{\gamma}_2$) boli porovnané s kritickými hodnotami, ktoré vyplývajú z násobkov očakávaných stredných chýb pre testovacie štatistiky.

Empirický koeficient asymetrie $\hat{\gamma}_1$ (Kubáčková, 1990):
$$\hat{\gamma}_1 = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i - m]^3}{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i - m]^2\right)^{3/2}} \tag{4}$$

Empirický koeficient excesu $\hat{\gamma}_2$ (Kubáčková, 1990):
$$\hat{\gamma}_2 = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i - m]^4}{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i - m]^2\right)^2} - 3 \tag{5}$$

Násobky očakávaných stredných chýb pre testovacie štatistiky (Kubáčková, 1990):

$$\alpha = 0.05: |\hat{\gamma}_1| < 2 \cdot \sigma(\hat{\gamma}_1), \sigma(\hat{\gamma}_1) = \sqrt{6/n} \tag{6}$$

$$\alpha = 0.01: |\hat{\gamma}_2| < 3 \cdot \sigma(\hat{\gamma}_2), \sigma(\hat{\gamma}_2) = \sqrt{24/n} \tag{7}$$

Výčíslenie testovacích štatistík a kritických hodnôt na danej hladine významnosti sumarizuje **Tab. 1.**

Tab. 1. Výsledky testov empirických koeficientov asymetrie a excesu

	Testovacia štatistika		Hladina významnosti		Kritická hodnota	
	γ_1	γ_2	$\alpha(\gamma_1)$	$\alpha(\gamma_2)$	$2 \cdot \sigma(\gamma_1)$	$3 \cdot \sigma(\gamma_2)$
$\gamma_{\text{Matlab}} - \gamma_{\text{GRASS GIS}}$	-0.0261	0.7744	0.05	0.01	0.0345	0.1035
$\gamma_{\text{Matlab}} - \gamma_{\text{GRASS GIS}}$	-0.0493	-0.4460				

Podľa výsledkov v **Tab. 1** je potrebné na uvedených hladinách významnosti zamietnuť hypotézu o normálnom rozdelení rozdielov v interpolácii normálneho aj skutočného tiažového zrýchlenia v dvoch rôznych softvérových prostrediach. V prípade normálneho tiažového zrýchlenia je možné túto hypotézu prijať na základe testu empirického koeficientu asymetrie.

Napriek tomu, že pri oboch súborov nie je predpokladané ich normálne rozdelenie, výsledky interpolácie s použitím modulu *r3.kriging_3D* možno považovať vzhľadom na výsledky získané v prostredí *Matlab* (MathWorks) za dostatočne presné. Nasvedčuje tomu **Tab. 2** s charakteristikami presnosti rozdielov, ktoré sú v porovnaní s hodnotami interpolovaných veličín (rádovo 980 tis. mGal) zanedbateľné. Túto domnienku podporuje aj skutočnosť, že absolútna hodnota maximálnej povolenej strednej chyby v meranom tiažovom zrýchlení v rámci gravimetrického mapovania bola 0.05 mGal (Kubeš a kol., 2001).

Tab. 2. Charakteristiky presnosti rozdielov interpolácie v rôznych softvérových prostrediach

	$\gamma_{\text{Matlab}} - \gamma_{\text{GRASS GIS}}$	$g_{\text{Matlab}} - g_{\text{GRASS GIS}}$
Počet hodnôt	20163	20163
Minimum [mGal]	-2.15E-06	-1.62E-06
Maximum [mGal]	2.27E-06	1.18E-06
Stredná hodnota [mGal]	-7.80E-08	-3.43E-08
Rozsah [mGal]	4.42E-06	2.80E-06
Disperzia [mGal ²]	1.87E-13	1.11E-13
Štandardná odchýlka [mGal]	4.32E-07	3.34E-07

6. ZÁVER

Navrhované rozšírenie metódy *kriging* umožňuje interpoláciu dát lokalizovaných na bodoch v rôznych výškových hladinách, pričom výsledkom je 3D raster popisujúci správanie veličiny v trojrozmernom priestore. Interpolácie dát v prostredí 3D GIS sa môžu uplatniť v archeológii, geológii, meteorológii a iných vedných odboroch, ktoré sa zaoberajú výskumom vertikálne členených javov. V príspevku bol interpolačný nástroj vo forme modulu open source softvéru *GRASS GIS* testovaný na hodnotách normálneho a skutočného tiažového zrýchlenia. Interpolované hodnoty boli porovnané s výsledkami interpolácie toho istého algoritmu v softvérovom prostredí *Matlab* (MathWorks), ktorý bol testovaný v rámci minulej práce. Napriek tomu, že podľa štatistických testov bola pre rozdiely zamietnutá hypotéza o normálnom rozdelení pravdepodobnosti, výsledky možno považovať za korektné vzhľadom na hodnoty rozdielov, ktoré sú rádovo oveľa nižšie ako presnosť, s ktorou boli získané testovacie dáta.

LITERATÚRA

Alghalandis (2012). Stochastic Spatial Analysis (Algorithms and Software): 2D variogram. Dostupné z: alghalandis.com/?page_id=463 [cit. 2012-12-10]

Barnel, R. (2012). *Variogram Tutorial*. Golden Software, Inc. Dostupné z: www.goldensoftware.com/variogramTutorial.pdf [cit. 2012-12-10]

Blažek, R. a Matev, R. (2008) Zdrojový kód GRASS GIS 6.4.2: *v.buffer2*. Dostupné z: <http://grass.osgeo.org/download/software/sources/>

Environmental Modeling Systems (2012). 3D Kriging. Dostupné z: http://www.ems-i.com/gmshelp/Interpolation/Interpolation_Schemes/Kriging/3D_Kriging.htm [cit. 2012-12-13]

Gebbert, S. (2006). Zdrojový kód GRASS GIS 6.4.2: *r3.gwflow*. Dostupné z: <http://grass.osgeo.org/download/software/sources/>

GRASS Development Team (2012). GRASS Programmer's Manual 6.5.svn(2012). Dostupné z: <http://grass.osgeo.org/programming6/>

Hofmann-Wellenhof, B. a Moritz, H. (2006) Physical Geodesy. Springer-Verlag, Viedeň. ISBN-10 3-211-23544-7

Horák, J. (2008) Prostorové analýzy v područí software. In: 15 rokov vojenskej geografie na Slovensku. 12.-14.11.2008, Podbanské. Topografický ústav Banská Bystrica. Dostupné z:

www.topu.mil.sk/index.php?ID=15663&day=2012-09-01&art_datum_od=&art_datum_do=

Kubáčková, L. (1990) Metódy spracovania experimentálnych údajov. Veda, vydavateľstvo SAV, Bratislava. ISBN 80-224-0104-8

Kubeš, P., Grand, T., Šefara, J., Pašteka, R., Bielik, M., Daniel, S. (2001) Atlas geofyzikálnych máp a profilov : Záverečná správa geologickej úlohy, Časť gravimetria. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava.

Neteler, M. a Mitasova, H. (2002) Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Kluwer Academic Publishers, Boston. ISBN 1-4020-7088-8.

Raper, J. F. (1992). Key 3D modelling concepts for geoscientific analysis. In TURNER, A. K. Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. ISBN 0-7923-1550-2.

Stopková, E. (2012a) Návrh riešenia interpolačnej metódy kriging v priestore. In: Juniorstav 2012. 14. Odborná konferencia doktorského studia [CD-ROM]. 26.1.2012. Fakulta stavební VUT, Brno. ISBN 978-80-214-4393-8.

Stopková, E. (2012b) Aplikácia 3D analytických funkcií v priestorových analýzach. Písomná práca k dizertačnej skúške, 27.4.2012.

Wackernagel, H. (2003) Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications. Springer-Verlag, Heidelberg. ISBN 3-540-44142-5.