

**BADANIA WRAŻLIWOŚCI NUMERYCZNEGO MODELU TERENU
NA WPŁYW OTOCZENIA**

**STUDIES ON THE SENSITIVITY OF DIGITAL TERRAIN MODEL
TO THE IMPACT OF ITS ENVIRONMENT**

Ireneusz Wyczałek

Zakład Geodezji, Politechnika Poznańska

SŁOWA KLUCZOWE: analiza wrażliwości, numeryczny model terenu

STRESZCZENIE: Analiza wrażliwości algorytmu użytego do modelowania powierzchni terenu ma na celu określenie zależności przyczynowo-skutkowych między parametrami modelu lub danymi wejściowymi a efektem modelowania. Im większy jest wpływ danych w przyjętym modelu, tym bardziej uważnie należy je traktować, albo zmienić algorytm interpolacyjny. W szczególności zachodzi pytanie, czy i w jaki sposób zmiana danych dotyczących jednego punktu wpływa na kształt modelowanej powierzchni i jaki jest zakres przestrzenny tego oddziaływania. Podjęcie takiej analizy powinno zatem prowadzić do wniosków odnośnie do zakresu przestrzennego analiz oddziaływania błędnych danych na kształt powierzchni modelowanej przy użyciu danego algorytmu.

Celem niniejszej pracy jest prezentacja wyników analizy kilku powszechnie stosowanych algorytmów generowania Numerycznego Modelu Terenu. Badaniu poddano jeden tylko czynnik – rzędne punktów z otoczenia modelowanego obszaru. Przeprowadzono szereg interpolacji fikcyjnego obiektu w trzech wersjach o mocno zróżnicowanym kształcie otoczenia – wypukłym, płaskim i wklęsłym. Wygenerowano mapy błędów dla poszczególnych metod oraz mapy różnic między wynikami dla różnych wariantów. Przeprowadzono globalną ocenę dokładności na podstawie uzyskanych błędów prawdziwych. Sformułowano wnioski wiążące wrażliwość z dokładnością uzyskanego NMT.

1. WPROWADZENIE

Programy geomatyczne i GIS oferują szereg metod interpolacji powierzchni terenu lub zjawisk zmiennych przestrzennie. Z uwagi na powszechność i łatwość użycia stosuje się te typowe metody do modelowania bez obaw o jakość wyników. Tymczasem ocena porównawcza modeli uzyskanych różnymi podejściami ukazuje ich niekiedy dość znaczne zróżnicowanie. Geodezyjna metoda interpolacji warstwic oraz metoda TIN reprezentują podejścia określające wartości pośrednie w oparciu o trzy punkty terenowe, ale istnieją też rozwiązania bazujące na większej liczbie punktów. Metody te mają charakter deterministyczny (B-spline, RBF), statystyczny lub łączny (Kryging). Użycie większej liczby punktów pomiarowych daje w nich lepszy obraz powierzchni dzięki zastosowanemu dopasowaniu. Rodzi się jednak pytanie, jak sobie te modele radzą ze zmianami rzędnych punktów leżących w dalszej odległości. Odpowiedź na tak postawione pytanie może dać analiza wrażliwości danej metody interpolacyjnej.

Analiza wrażliwości modelu matematycznego ma najczęściej na celu określenie zależności przyczynowo-skutkowych między parametrami modelu i danymi wejściowymi a efektem modelowania. Źródłami niepewności wyników są błędy modelu (algorytmu) i błędy danych. Te pierwsze mają charakter systematyczny, drugie powinny być błędami przypadkowymi. Testując model z wykorzystaniem przyjętych danych wzorcowych można zatem określić wrażliwość poszczególnych składników użytego algorytmu na zmienne dane. Rozpatruje się oddzielnie poszczególne kategorie danych w celu odrębnej oceny ich wpływu na wartość wynikową.

W ramach prezentowanej tu analizy wykonano szereg interpolacji fikcyjnego obiektu w trzech wersjach o mocno zróżnicowanym kształcie otoczenia – wypukłym, płaskim i wklęsłym. Wygenerowano mapy zmian między nimi i przeprowadzono globalną ocenę dokładności na podstawie uzyskanych błędów prawdziwych. Sformułowano wnioski wiążące wrażliwość z dokładnością uzyskanego NMT.

W dalszej części omówione zostaną wybrane aspekty oceny dokładności modeli terenu, sformułowany problem wrażliwości modelu na otaczające dane oraz omówiony eksperyment realizujący przyjęte cele. W podsumowaniu podane zostaną wnioski na temat poddanych badaniu metod modelowania wynikające z dokonanych analiz.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Jako miarę oceny użyteczności algorytmu modelującego można przyjąć jakość, rozumianą jako stopień zgodności modelowanego terenu z rzeczywistością, a jednocześnie odporność na złe dane. Jakość numerycznych modeli terenu była wielokrotnie analizowana zarówno przez ich autorów jak i użytkowników, począwszy od pionierskich opracowań z zakresu kartografii komputerowej do czasów współczesnych (Droj, 2008; Hejmanowska *et al.*, 2008; Karel *et al.*, 2006; Liu i Hu, 2007; Oksanen i Sarjakoski, 2006). Badanie algorytmów stanowi rutynową czynność w ramach procesu ich opracowywania, a uzyskane wyniki służą weryfikacji modelu i późniejszej jego implementacji. Również dociekliwi użytkownicy danej metody modelowania testują ją, aby ocenić stopień jej użyteczności w konkretnych aplikacjach i dla posiadanego zbioru danych źródłowych. Często skutkiem takich badań są propozycje modyfikacji danej metody, co prowadzi z reguły do zwiększenia jej niezawodności, podnosi użyteczność lub poszerza krąg zastosowań.

W odniesieniu do modelowania powierzchni terenu badania skupiały się głównie na:

- porównaniach dokładności odwzorowania terenu różnymi metodami (Droj, 2008),
- poszukiwaniu parametrów przyjętego modelu optymalnych z punktu widzenia użytkownika,
- analizie źródeł błędów modelowania wynikających z przyjętej konkretnej techniki pomiaru (Niko *et al.*, 2005; Paszotta i Szumiło, 2006),
- poszukiwaniu najlepszych dla użytkownika źródłowych danych przestrzennych lub porównaniu efektów użycia danych z różnych źródeł,
- badaniu możliwości generalizacji zbioru punktów (ograniczenia liczby) pod kątem uzyskania oczekiwanej precyzji odwzorowania terenu (Niko *et al.*, 2005) lub uwypuklenia ważnych obiektów (Kremeike, 2004),
- podniesieniu dokładności modelowania (Gousie i Franklin, 2005; Droj, 2008),
- doskonaleniu metod oceny modeli (Karel *et al.*, 2006; Liu i Hu, 2007).

Ocena numerycznych modeli terenu najczęściej ogranicza się do określenia ich podstawowych parametrów dokładnościowych. Obok błędów autorzy proponują też rozpatrywanie niepewności oraz wiarygodności modelu, a także jego przydatności dla danego zastosowania (*fitness-to-use*). W wielu współczesnych opracowaniach poruszane są dwie szczególne analizy modeli – dotyczące oceny ich niepewności (ang. *UA – Uncertainty Analysis*) lub wrażliwości (ang. *SA – Sensitivity Analysis*). Mają one charakter uniwersalny i znajdują powszechne zastosowanie w technikach informatycznych. Analizę niepewności stosuje się do oceny, czy przyjęta metoda modelowania (zjawisk zachodzących w świecie realnym) poprawnie odzwierciedla modelowane zjawisko, czy poszczególne jej składniki nie generują błędów. Natomiast wrażliwość modelu uwidacznia się poprzez generowanie różnych wyników wskutek zmiany danych wejściowych. Analiza wrażliwości ma więc na celu wykrycie, które z błędów danych oddziałują na wynik i w jakim stopniu mogą się zmieniać bez istotnej straty dla wyniku modelowania. Najczęściej wykorzystuje ona do tego celu metody teorii gier (Monte-Carlo) i analizy statystyczne (Katz, 2002 i inni).

W odniesieniu do modelowania terenu istotne może być pytanie, czy na wyniki modelowania mają wpływ czynniki zewnętrzne, odnoszące się bądź to do informacji dodatkowych (sieć hydrograficzna, linie nieciągłości) bądź do sąsiadującej przestrzeni. Pierwszy przypadek ma zastosowanie do metod zawierających mechanizmy wspomagające modelowanie i wymaga odrębnej analizy. Przypadek drugi występuje bardzo często w modelowaniu terenu. Można go określić jako wrażliwość modelu terenu na otaczające dane przestrzenne. Jemu jest poświęcona niniejsza praca.

2.1. Metody oceny dokładności modeli terenu

Każda metoda analizy niepewności lub wrażliwości modeli przestrzennych bazuje na ocenie ilościowej – w praktyce na przestrzennym rozkładzie błędów i globalnej ocenie średniego błędu odwzorowania modelowanego zjawiska. W modelowaniu wysokościowym istotne jest na ile w danym punkcie rzędna na powierzchni NMT różni się od faktycznej rzędnej terenu. Najczęściej zakłada się losowy charakter błędów odwzorowania, zgodny z rozkładem Gaussa. Wówczas błąd średni modelu można opisać wzorem (Hejmanowska *et al.*, 2008):

$$m_H = \sqrt{\frac{[H_{NMT} - H_{odn}]^2}{n}} \quad (1)$$

gdzie: H_{NMT} – wysokość (n.p.m.) obliczona dla powierzchni modelu terenu, H_{odn} – wysokość rzeczywista w punkcie odniesienia, n – liczba punktów (pikiet) przyjętych do weryfikacji modelu.

Zgodnie z tą hipotezą błąd końcowy opracowania jest pierwiastkiem sumy kwadratów błędów poszczególnych źródeł, takich jak pomiar (m_{pom}), obliczenie (m_{obl}), przyjęty model (m_{model}) itp., czyli:

$$m_H = \sqrt{m_{pom}^2 + m_{obl}^2 + m_{model}^2 + \dots} \quad (2)$$

Istnieją jednak badania prowadzące do wniosku, że głównym źródłem błędów przypadkowych w procedurze interpolacyjnej są wyniki pomiarów terenowych, natomiast błędy dopasowania modelu do terenu wynikają z uproszczeń algorytmu, a więc mają charakter systematyczny (Liu i Hu, 2007). Stąd wynikową dokładność odwzorowania powierzchni poprawniej jest opisać równaniem na obliczenie odchylenia standardowego z uwzględnieniem kowariancji:

$$\sigma_{\Delta Z_T}^2 = \sigma_{R_T}^2 + \sigma_{\delta_T}^2 \pm 2\sigma_{R_T\delta_T}^2 \quad (3)$$

gdzie: $\Delta Z_T = R_T \pm \delta_T$ – błąd modelu w punkcie T, $R_T = Z_T - H_T$ – błąd interpolacji, δ_T – błąd przypadkowy odwzorowania powierzchni terenu.

Należy też wspomnieć odmienne podejście do oceny modelu, które wiąże wielkości błędów z lokalnym zróżnicowaniem modelowanej powierzchni (Wysocki, 2007). Zgodnie z tym podejściem miarę średniego błędu modelu można przedstawić jako:

$$m_H = \sqrt{p_1 A^2 + p_2 (D \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2 + C^2} \quad (4)$$

gdzie: m_H – średni błąd wysokości punktu wyznaczony w efekcie użycia danej metody interpolacji, $p_1 A$ – czynnik charakteryzujący dokładność pomiaru punktów, $p_2 (D \cdot \operatorname{tg} \alpha)$ – czynnik uwzględniający nachylenie terenu, C – czynnik uwzględniający chropowatość terenu.

2.2. Wrażliwość metody modelowania terenu

Opracowując lub przyjmując gotową technikę modelowania należy zadać sobie pytanie, na ile zmiana danych wejściowych wpływa na wyniki modelowania, albo inaczej – na ile przyjęty algorytm jest odporny na zmienność danych. Takie odpowiedzi daje analiza wrażliwości modelu. Omawiane tu zadanie jest także poświęcone ocenie wpływu danych na wynik obliczeń. Jako przedmiot analizy wybrano jednak tylko jeden czynnik, zdaniem autora pomijany w ocenie metod interpolacyjnych – jest nim informacja o jakimś atrybucie charakteryzującym obiekty otaczające miejsce analizy. Zarówno ściśle jak i statystyczne techniki interpolacyjne powinny bowiem dawać wyniki niezależne od dalszego otoczenia, jeśli zakłada się, że nie ma ono wpływu na obiekt leżący w określonym miejscu przestrzeni. Szczególnie w modelowaniu terenu niedopuszczalne jest, aby wyznaczane rzędne były różne w zależności od ukształtowania powierzchni w okolicy.

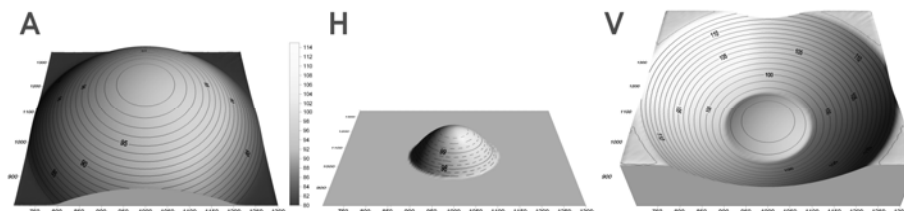
W takim ujęciu problemu naturalne wydaje się budowanie modelu w oparciu o najbliższe leżące punkty. Najlepszym rozwiązaniem takiego podejścia jest siatka trójkątów – płaskich, jak w modelu TIN lub o krzywiznie modelowanej jakąś powierzchnią 2-go lub wyższego rzędu (np. rozwiązania typu *thin-plate*). Najczęściej jednak stosuje się do modelowania typowe algorytmy, nie zawsze uświadamiając sobie wszystkie konsekwencje takiego wyboru. W kontekście wcześniejszej analizy wydaje się, że najlepiej ograniczyć liczbę punktów przyjętych do tworzenia modelu do trzech lub niewiele więcej.

3. EKSPERYMENT

Celem eksperymentu była analiza wrażliwości typowych metod modelowania terenu na wpływ otoczenia. Poszukiwano odpowiedzi na pytanie, czy wpływ na wynik interpolacji mają punkty leżące poza obszarem zainteresowania. Jeśli jednak okoliczne punkty mają wpływ na interpolację, to podobny wpływ mają także punkty znajdujące się wewnątrz obszaru opracowania. W efekcie każde miejsce modelowanego obszaru może mieć różną wysokość w zależności od ukształtowania terenu w jego sąsiedztwie.

3.1. Zakres eksperymentu

Aby uniknąć wpływu danych pomiarowych eksperyment przeprowadzono na modelu teoretycznym, którym w wariancie podstawowym jest fragment czaszy kulistej (wariant A na rys. 1), zaś w wariantach kontrolnych część czaszy zastąpiono płaszczyzną (wariant H) lub czaszą skierowaną w przeciwnym kierunku (wariant V). W każdym z wariantów część wewnętrzna czaszy ma niezmienny kształt, który powinien być tak samo zdefiniowany w kolejnych modelach. Obszar składa się z 13 przylegających do siebie trójkątów o boku 100 m, wpisanych w okrąg o promieniu 306,5 m. Wierzchołki trójkątów (12 szt.) i punkt centralny stanowią zbiór danych wysokościowych (pikiet), których rzędne obliczono analitycznie na podstawie równania czaszy kuli o promieniu 2500 m i rzędnej 100,00 m w punkcie centralnym. Linię załamania dla poszczególnych wariantów stanowi okrąg o promieniu 115,5 m odpowiadający rzędnej 97,33 m. Poszczególne analizy wykonano dla dwóch zestawów danych – podstawowego, opisanego powyżej (oznaczonego indeksem „100” lub „s”), oraz zagęszczonego dwukrotnie (indeks „50” lub „p”) i obejmującego 36 pikiet w wierzchołkach i jedną centralną.



Rys. 1. Testowane warianty modelowanej powierzchni: A – czasza kulista (widok przestrzenny i warstwicowy z siatką danych punktów wysokościowych), H – wycinek czaszy z płaskim otoczeniem i V – ten sam wycinek z otoczeniem o odwrotnej krzywiznie

Do kontroli modelu terenu wyliczono teoretyczne rzędne punktów w siatce co 2 m. Dzięki temu uzyskane odstępstwa pozbawione są niepewności wynikającej z błędów pomiaru, nieznanego kształtu powierzchni terenu, lokalnych nieciągłości itp.

3.2. Badane metody interpolacyjne

Analizy przeprowadzono na trzech metodach interpolacji:

- średniej ważonej odwrotności odległości (*IDW – Inverse Distance Weighted*) dla 3 lub 6 punktów referencyjnych (pikiet) – oznaczonych idw23 i idw26,

- powierzchni sklejanych (*spline*) dla 3 lub 6 pikiet – spln3 i spln6,
- powierzchni statystycznych (*kryging*) dla 12 pikiet i liniowego lub sferycznego modelu semiwariogramu – kry-l, kry-s.

Zbiórce wyniki odwzorowania terenu (różnic i błędu średniego) przy użyciu różnych metod interpolacji zestawiono w 0.

Tabela 1. Oceny dokładności badanych metod interpolacji

Metoda IDW – boki 100 m				– boki 50 m		
3 punkty, potęga 2° (idw23)				pA	pH	pV
Wariant	sA	sH	sV	-0,29	-0,22	-0,15
Δh_{sr}	-0,49	-0,48	-0,47	0,28	0,25	0,32
$m_{\Delta h}$	0,27	0,28	0,31	-1,01	-0,79	-0,78
Δh_{min}	-1,21	-1,02	-1,02	0,29	0,49	1,12
Δh_{max}	0,22	0,28	1,78			
6 punktów, potęga 2° (idw26)				pA	pH	pV
Wariant	sA	sH	sV	-0,45	-0,28	-0,10
Δh_{sr}	-1,14	-0,61	-0,07	0,23	0,21	0,33
$m_{\Delta h}$	0,48	0,27	0,44	-1,00	-0,66	-0,50
Δh_{min}	-1,94	-1,07	-0,70	0,09	0,37	1,44
Δh_{max}	0,00	0,07	2,07			
Metoda krygingu – boki 100 m				– boki 50 m		
12 punktów, aproksymacja liniowa semiwariogramu (kry-l)				pA	pH	pV
Wariant	sA	sH	sV	-0,32	-0,18	-0,26
Δh_{sr}	0,47	-0,53	-1,62	0,13	0,12	0,25
$m_{\Delta h}$	0,29	0,14	0,69	-0,52	-0,43	-0,64
Δh_{min}	-0,36	-0,70	-2,64	-0,02	0,20	0,90
Δh_{max}	1,05	0,01	1,00			
12 punktów, aproksymacja semiwariogramu krzywą sferyczną (kry-s)				pA	pH	pV
Wariant	sA	sH	sV	-0,22	-0,21	-0,30
Δh_{sr}	-0,35	-0,86	-0,73	0,09	0,19	0,24
$m_{\Delta h}$	0,25	0,23	0,51	-0,38	-0,59	-0,70
Δh_{min}	-1,27	-1,12	-1,24	-0,01	0,34	0,82
Δh_{max}	0,01	0,02	1,52			
Powierzchnie sklejane – boki 100 m				– boki 50 m		
3 punkty (spln3)				pA	pH	pV
Wariant	sA	sH	sV	-0,01	-0,22	-0,43
Δh_{sr}	0,05	-0,20	-0,46	0,06	0,19	0,40
$m_{\Delta h}$	0,12	0,11	0,30	-0,13	-0,57	-1,18
Δh_{min}	-0,20	-0,40	-0,94	0,12	0,31	0,61
Δh_{max}	0,37	0,21	0,60			
6 punktów (spln6)				pA	pH	pV
Wariant	sA	sH	sV	-0,01	-0,21	-0,42
Δh_{sr}	0,02	-0,19	-0,41	0,06	0,19	0,38
$m_{\Delta h}$	0,08	0,13	0,31	-0,12	-0,59	-1,16
Δh_{min}	-0,19	-0,41	-1,03	0,12	0,34	0,66
Δh_{max}	0,16	0,14	0,42			

3.3. Ocena wyników modelowania

Przegląd uzyskanych wyników prowadzi do spostrzeżeń sformułowanych poniżej.

Metoda odwrotnych odległości źle dopasowuje model terenu do testowanego obszaru. Na poprawę nie wpływa ani liczba punktów, ani wykładnik potęgi wag, ani zróżnicowanie terenu w otoczeniu badanego obszaru.

Metoda krygingu daje o około 50% lepsze wyniki w modelu o bokach 50 m niż 100 m oraz aproksymacji semiwariogramu funkcją sferyczną. Rozwiązanie to daje bardzo dobre przybliżenie NMT do powierzchni modelowanej w wariancie A, i nieco gorsze wyniki w pozostałych wariantach. Widoczne jest jednakże wzrastające poszerzenie dziedziny wartości odchyłek wraz z pogarszaniem warunków otoczenia.

Zdecydowanie najlepiej prezentuje się metoda wielomianowych powierzchni sklepanych, która w wariancie podstawowym (A) daje dobre wyniki niezależnie od gęstości punktów. Niestety, pogarszające się warunki otoczenia wpływają niekorzystnie na dokładność aproksymacji niezależnie od tego, ile punktów przyjęto do definiowania powierzchni.

Niezbyt ściśle odwzorowanie terenu przez każdą z omawianych metod wynika nie tyle z przyjętych modeli, co z niewystarczającej liczby punktów terenowych. Znany i powszechnie akceptowany jest bowiem wniosek, że dokładność odwzorowania spada wraz ze spadkiem liczby pikiet. Droj (2008) ujęła go w lakonicznym stwierdzeniu o konieczności zwiększenia liczby punktów danych, zaś Aguilar i in. (2005) opisali wynikający z tego spadek dokładności wzorem empirycznym:

$$\frac{m_H}{m_H^k} = 0,1906 \left(\frac{N}{M} \right)^{-0,5684} \quad (5)$$

gdzie: m_H – błąd średni wyznaczenia punktu na modelu terenu,

m_H^k – błąd średni pomiaru punktów kontrolnych,

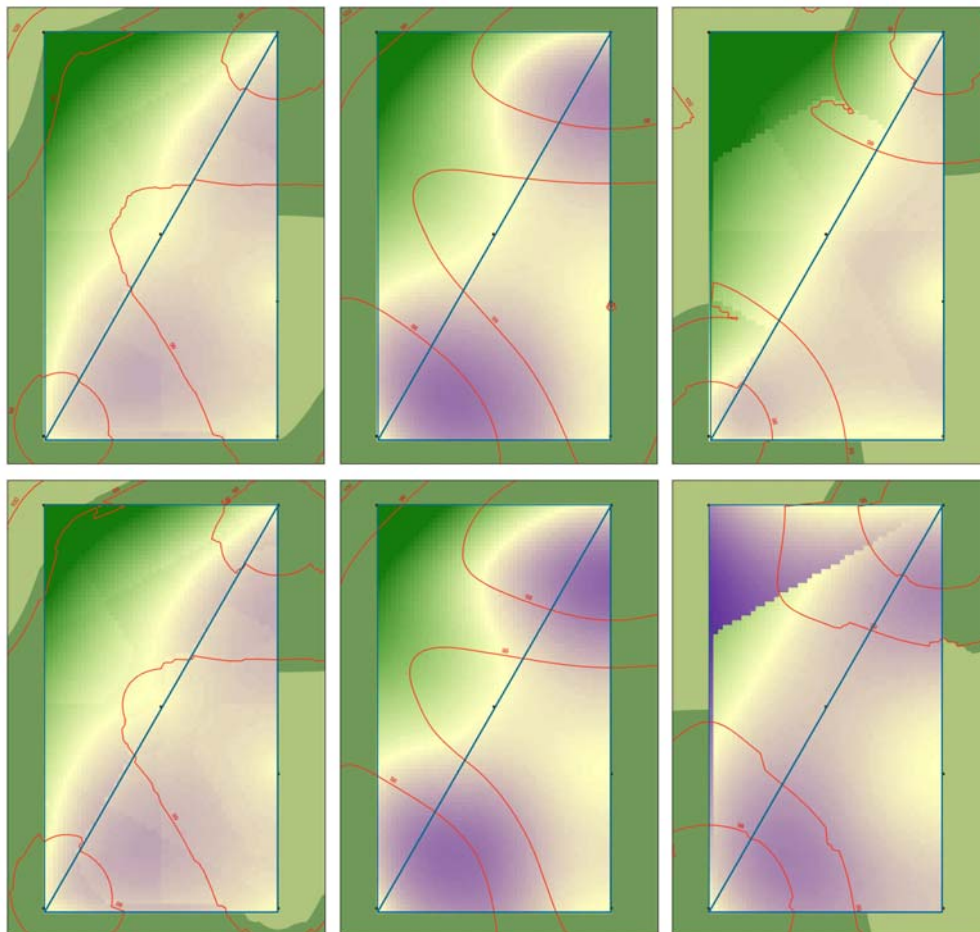
N – liczba punktów do interpolacji,

M – liczba niezależnych punktów kontrolnych.

Przyjęte w niniejszych analizach dwukrotne zwiększenie gęstości (między siatką „100” a „50”) powinno, zgodnie z wzorem (5), zwiększyć dokładność interpolacji o 15%. Jest to widoczne przy porównaniu wyników z obu zbiorów danych.

Dla całego zbioru wygenerowano mapy odchyłek. Dla ilustracji zjawiska wydzielono fragment mapy obejmujący lewą połowę trójkąta centralnego (leżącego w całości wewnątrz obszaru stałego) i przylegającą z lewej strony połowę sąsiedniego trójkąta, obejmującego swym zasięgiem zmienne części opcji wariantowych testu. Wynik powinien ukazywać niezmienną postać modelu w części stałej i kontrastujący z nią fragment zmienny. Rys. 2 ilustruje mapy odchyłek uzyskanych za pomocą badanych metod (tj. kry-1 i kry-s, spln6 i spln3, idw23 i idw26) dla najbardziej niekorzystnego wariantu „V”. Porównanie niektórych wyników uzyskanych metodą spln6 przedstawiono na Rys. 3, odpowiednio:

- różnice między wariantami „A” i „H”,
- różnice między wariantami „A” i „V”,
- różnice między wariantem „A” dla 50- i 100-metrowych odstępów.

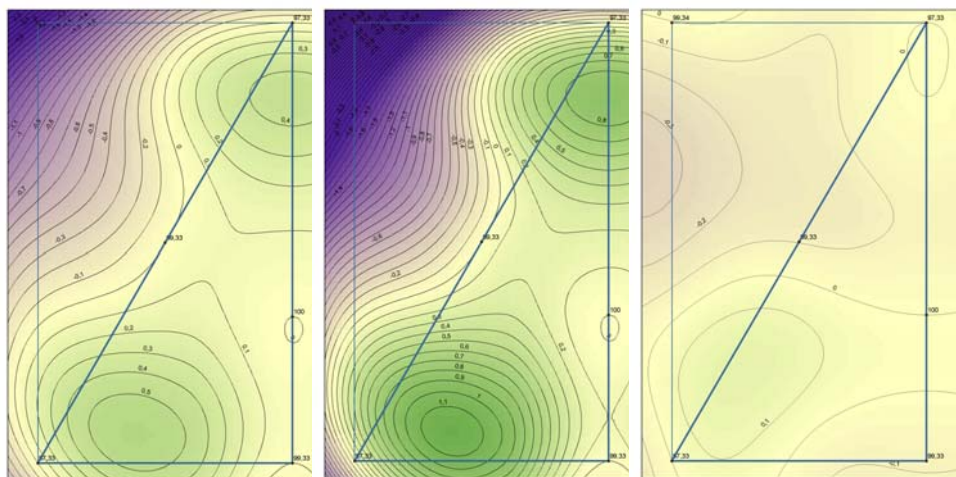


Rys. 2. Mapy błędów odwzorowania powierzchni w modelu V. Kolumna lewa: metoda kry-l i kry-s; kolumna centralna: metoda spln6 i spln3; kolumna prawa: metoda idw23 i idw26. Jasne odcienie odpowiadają zerowym błędom odwzorowania

4. WNIOSKI

Spośród dostępnych w oprogramowaniu GIS metod interpolacji nie wszystkie nadają się do modelowania terenu. Sposobem oceny przydatności danego algorytmu może być empiryczna analiza wrażliwości, rozumiana jako ocena stopnia oddziaływania na kształt modelu błędnie określonej rzędnej punktów leżących poza bezpośrednim sąsiedztwem miejsca interpolacji. Zaproponowana metoda analizy wrażliwości została sprawdzona w ten sposób, że badano obszar wewnątrz określonej figury, w której otoczeniu radykalnie zmieniano wartości rzędnych. Najlepiej test ten spełniły metody funkcji sklepanych oraz

kryging. Skrajne błędy dla siatki trójkątów o boku 50 m i modelu „A” w pierwszej z funkcji mieszczą się w granicach poniżej ± 50 cm, średnio ± 6 cm, zaś w drugiej – nie więcej niż ± 50 , średnio ± 10 cm. Dla najbardziej niekorzystnego modelu V większe przybliżenie daje kryging (skrajne poniżej ± 90 cm, średnie ± 25 cm), gorsze – funkcje sklejane i IDW.



Rys. 3. Mapy zmian odwzorowania terenu metodą powierzchni sklejaną kolejno – między modelem wyjściowym (A) o gęstości punktów co 50 m a modelami (H) i (V) oraz tym samym modelem o gęstości co 100 m. Jasne pola oznaczają zerowe różnice. W miejscach ciemnych różnice przekraczają wartość 100 cm.

Widoczne zróżnicowanie dokładnościowe występujące we wszystkich wariantach poszczególnych metod jest skutkiem niewystarczającej reprezentacji danych pomiarowych. Uzyskane rozrzuty wyników w granicach 1,5 do 2,5 m są wystarczające dla map topograficznych lecz nie wystarczają do opracowań wielkoskalowych. To wyjaśnia, dlaczego autorzy numerycznych modeli terenu preferują warstwice z map jako źródło wyjściowych danych do interpolacji.

W żadnym z omawianych wyżej algorytmów interpolacji korzystających z większej liczby punktów danych niż 3 nie stwierdzono odporności na zmieniające się otoczenie. W takich przypadkach zdecydowanie bardziej odporne wydają się metody bazujące na trójkątach, to jest model TIN i interpolacja geodezyjna. Ocena ich będzie przedmiotem odrębnej publikacji.

5. LITERATURA

Aguilar F.J., Agüera F., Aguilar M.A., Carvajal F., 2005. Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71, 7, s. 805-816.

Droy G., 2008. Improving the accuracy of Digital Terrain Models. *Studia Univ. Babeş-Bolyai, Informatica*, LIII, 1.

- Gousie, M.B., Franklin, W.R., 2005. Augmenting Grid-Based Contours to Improve Thin-Plate DEM Generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71, 1, s. 69-81.
- Hejmanowska B., Drzewiecki W., Kulesza Ł., 2008. Zagadnienie jakości numerycznych modeli terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18.
- Karel W., Pfeifer N., Briese C., 2006. DTM quality assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI – Part 2, s. 7-12.
- Katz R.W., 2002. Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies. *Climate Research*, 20, s. 167-185.
- Kremeike K., 2004. Generalization of dense Digital Terrain Models while enhancing important objects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vo. XXXV, B4, s. 403-408.
- Liu X.H., Hu P., 2007: Accuracy assessment of digital elevation models based on approximation theory. <http://ncg.nuim.ie/gisruk/materials/proceedings/PDF/4B2.pdf>
- NicoG., Rutigliano P., Benedetto C., Vespe F., 2005. Terrain modeling by kinematical GPS survey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, s. 293–299.
- Oksanen J., Sarjakoski T., 2005. Error propagation analysis of DEM-based drainage basin delineation. *International Journal of Remote Sensing*. 26, 14, s. 3085-3102.
- Paszotta, Szumiło, 2006. Weryfikacja numerycznego modelu terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16, s. 457-466.
- Wechsler S.P., 2003. Perceptions of Digital Elevation Model uncertainty by DEM users. *URISA Journal*, 15, 2, s. 57-64.
- Wysocki J. 2005. Dokładność aproksymacji powierzchni terenu w aspekcie badań eksperymentalnych. *Przegląd Naukowy Inż. i Kształtowanie Środowiska*, 1 (31), s. 102-113.

**STUDIES ON THE SENSITIVITY OF DIGITAL TERRAIN MODEL
TO THE IMPACT OF ITS ENVIRONMENT**

KEY WORDS: sensitivity analysis, digital terrain model

SUMMARY: A sensitivity analysis algorithm used to model the surface of the terrain is to determine cause and effect relationships between the input and the result of modeling. The larger is the impact, the more carefully have to be treated or the interpolation algorithm has to be changed. In particular, there is the question of whether and how the change of the data, i.e. the heights of the field points, affects the shape of modeled surface and what is the spatial scope over the impact. Such an analysis should lead to conclusions about the extent of the spatial impact of any erroneous data on the shape of the surface modeled by particular algorithm.

The purpose of this paper is to present the results of analysis of several commonly used algorithms to generate Digital Terrain Model. Only one factor had been studied - the point height in environment of modeled site. A number of interpolations have been done on fictional object in the three versions of the highly differentiated form of the environment - convex, flat and concave. Maps of errors for the diverse methods and maps of the differences between the results for some variants have been generated. A global accuracy on the basis of the true errors has been assessed. The conclusions binding sensitivity with the accuracy obtained NMT have been formulated.

Dr inż. Ireneusz Wyczalek
e-mail: ireneusz.wyczalek@put.poznan.pl
tel. +61 6652420
fax +61 6652432