

**PODSTAWOWA ROLA GEODEZJI, FOTOGRAMETRII,
TELEDETEKCJI ORAZ GEOMATYKI W TWORZENIU
INFRASTRUKTURY INFORMACJI PRZESTRZENNEJ
W ZAKRESIE OPISU UKSZTAŁTOWANIA
POWIERZCHNI TERENU**

BASIC ROLE OF GEODESY, PHOTOGRAMMETRY,
REMOTE SENSING AND GEOMATICS IN CREATING
SPATIAL INFORMATION INFRASTRUCTURE
FOR DESCRIPTION OF TERRAIN CONFIGURATION

Jerzy Wysocki

Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Słowa kluczowe: dyrektywa INSPIRE, cyfrowe modele powierzchni terenu

Keywords: INSPIRE Directive, digital models of land surface

Wprowadzenie

Przyjęcie przez Parlament Europejski i Radę Europy dyrektywy ustanawiającej zasady tworzenia Infrastruktury Informacji Przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (*Infrastructure for Spatial Information In the European Community – INSPIRE*), która ma się opierać na infrastrukturach informacji przestrzennej ustanowionych i prowadzonych przez państwa członkowskie, powoduje potrzebę prowadzenia odpowiednich badań dotyczących również metod niezbędnych do opisu ukształtowania powierzchni terenu, ponieważ jednym z głównych tematów danych przestrzennych określonych w dyrektywie jest ukształtowanie terenu – cyfrowe modele powierzchni. Temat ten, obok funkcji poznawczych, wychodzi również naprzeciw pilnym potrzebom gospodarczym, ponieważ coraz więcej zagadnień planistycznych i projektowych (np. w zakresie budownictwa i inżynierii środowiska) ma charakter przestrzenny wymagający informacji 3D. W zagadnieniach tych szerokie zastosowanie znajduje geodezja, fotogrametria-teledetekcja oraz geomatyka.

Jak wskazują prowadzone badania, podstawowymi metodami pomiaru siatek punktów numerycznego modelu terenu (NMT) są: tachimetria elektroniczna, metody fotogrametryczne, teledetekcyjne, pomiary GPS oraz metody skaningu laserowego.

Dokładność generowania informacji 3D, która obejmuje opis ukształtowania powierzchni terenu, a w przypadku innych obiektów najczęściej odnoszona jest do tej powierzchni w podstawowym stopniu jest obecnie związana z dokładnością aproksymacji powierzchni terenu na podstawie cyfrowych modeli jego powierzchni, tworzonych w oparciu o dane źródłowe. Metody stosowane dotychczas do oceny dokładności aproksymacji powierzchni terenu za pomocą linii warstwicznych wykorzystują najczęściej jako podstawowy parametr tej oceny wartość zasadniczego cięcia warstwicznego. Jednak w metodach NMT ma miejsce inna geneza aproksymacji powierzchni terenu i do niej, w związku z tym, muszą być dostosowane metody oceny dokładności tej aproksymacji.

W artykule przedstawiono wyniki prowadzonych przez autora badań dotyczących metody oceny dokładności aproksymacji powierzchni terenu za pomocą modeli cyfrowych, w aspekcie implementacji dyrektywy INSPIRE, oraz ustalenia w jej ramach zasad opisu dokładności ukształtowania powierzchni terenu.

Zagadnienie metod tworzenia cyfrowych modeli terenu

Jak już wskazano w innych pracach autora (Wysocki, 1987, 1997, 2008), główne stosowane obecnie metody NMT uwzględniają korelacje pomiędzy punktami modelu (dotyczy to przede wszystkim terenów nizinnych o niedużej liczbie fragmentów nieciągłości powierzchni terenu, które jednak trzeba z odpowiednią dokładnością pomierzyć i wprowadzić do NMT). Traktują aproksymację jako proces stochastyczny o charakterze stacjonarnym tzn. wartość kowariancji zmiennych zależy tu od odległości punktów odniesienia. Jeżeli mamy n punktów odniesienia, to do aproksymacji z wyrównaniem metodą najmniejszych kwadratów można użyć n równań błędów, co w zapisie macierzowym można zapisać jako:

$$Z = H + h = BX + h$$

gdzie:

- Z – wysokości punktów odniesienia (punktów NMT),
- H – składowe decydujące opisane wielomianami (BX), określające charakterystyczne formy terenu,
- h – różnice wysokości pomiędzy pomierzonymi wysokościami punktów odniesienia, a wyznaczonymi na podstawie wielomianu.

W każdym punkcie odniesienia i , wartość h_i będąca funkcją obserwacji, może być podzielona na składowe:

$$h_i = s_i + r_i$$

gdzie:

- s_i – składowe współzależne tj. formy terenowe, które z powodu swej różnorodności nie mogą być opisane dostatecznie prostą funkcją matematyczną (wielomianami) i dlatego wyznaczone są metodami statystycznymi z użyciem wariancji i kowariancji,
- r_i – reprezentuje błąd pomiaru (tutaj pomiaru wysokości punktów odniesienia) – „szum”, czyli błędy przypadkowe pomiaru oraz wielkości związane z rodzajem terenu.

Można wydzielić dwie podstawowe grupy błędów związanych z rodzajem terenu i mających istotny wpływ na dokładność przedstawienia jego rzeźby (Wysocki, 1979):

- Błędy spowodowane „szorstkością” powierzchni terenu. Wynika ona z bardzo drobnych form naturalnych, powstałych pod wpływem warunków atmosferycznych oraz działalności człowieka. Wielkość błędów nie zależy w zasadzie od odległości (gęstości) pomierzonych punktów terenu. Wartość błędu można na podstawie badań eksperymentalnych oszacować **w przeciętnych warunkach** terenowych, średnio na ok. $\pm 0,05$ m.
- Błędy spowodowane „chropowatością” rzeźby. Jest ona zaczątkiem morfologii terenu i przejawia się małymi nierównościami (małymi formami) oraz niejednostajnymi spadkami pomiędzy punktami terenu. Wartość tych błędów jest uzależniona od odległości (gęstości) pomierzonych punktów aproksymujących powierzchnię terenu na danym obszarze – punktów odniesienia (punktów NMT).

Jak z powyższego wynika, błędy spowodowane szorstkością powierzchni terenu można zaliczyć do „szumu”. Błędy przypadkowe pomiaru mogą więc mieć wpływ jeżeli będą istotnie większe od tych błędów.

Natomiast błędy spowodowane chropowatością wejdą do składowej współzależnej. Zasadniczy wpływ na ich wartość będzie miała gęstość i poprawność rozmieszczenia mierzonych punktów odniesienia.

Jak już wyżej wskazano wysokości punktów odniesienia mogą być uzyskiwane różnymi metodami (Kurczyński, Preuss, 2000; Wysocki, 1987, 1999, 2001, 2003, 2007, 2008). Na przykład dokładność pomiaru tachimetrami elektronicznymi jest na tyle duża, że można praktycznie pominąć jej wpływ przy pomiarze punktów odniesienia. Natomiast istotne znaczenie będzie tu miał sposób wyboru punktów NMT, szczególnie w przypadku niedużych form rzeźby terenu, które przy mniejszych deniwelacjach terenu mają często istotne znaczenie przy aproksymacji jego powierzchni. Postęp w tym zakresie może przynieść proponowana metoda „elektronicznego stolika” (Wysocki, 2001). Koncepcja proponowanej metody powstała w rezultacie badań prowadzonych przez autora w zakresie analogowych i komputerowych metod opracowań warstwicznych, przede wszystkim dla map wielkoskalowych. Stosowane geodezyjne metody opracowania map warstwicznych powodują rozdzielenie procesu pomiaru punktowego (w terenie) od procesu aproksymacji powierzchni terenu za pomocą linii warstwicznych w warunkach kameralnych. Przy interpolacji warstwic, które dostarczają projektantowi podstawowej informacji o ukształtowaniu terenu, opracowujący warstwice nie ma naogół bezpośredniego kontaktu z terenem, co często może prowadzić do powstawania niedokładności w przedstawieniu jego rzeźby. W związku z tym proponuje się zobjektywizowanie tego procesu metodą ruchomego – „elektronicznego stolika”, realizowaną za pomocą przenośnego (lekkiego) komputera typu laptop, penpad czy też innego, przez połączenie numerycznej i graficznej rejestracji punktów NMT z procesem aproksymacji powierzchni terenu za pomocą linii warstwicznych, przy bezpośredniej konfrontacji opracowywanych warstwic z terenem. Realizacja tej koncepcji może być dokonywana przez odpowiedni program komputerowy wprowadzony do pamięci przenośnego komputera (Wysocki, Saczuk, Buczek, 2001). Program ten będzie rejestrował i wizualizował na ekranie komputera przesłane metodami zdalnymi dane mierzonych punktów określone np. przy pomocy tachimetru elektronicznego, kinematycznymi metodami GPS, czy też równolegle. Opracowujący, poruszający się po terenie z lekkim komputerem wyposażonym w odpowiedni ekran graficzny, będzie decydował o wyborze punktów NMT, kierując się przy tym uzyskaną poprawnością aproksymacji powierzchni terenu na podstawie opracowanych przy pomocy programu linii warstwicznych, przy bezpośredniej konfrontacji ich przebiegu z

formami rzeźby terenu w okolicy każdego wybieranego do pomiaru punktu. Zarejestrowane w pamięci komputera punkty NMT oraz opracowane numerycznie linie warstwiczne można łatwo wprowadzić do systemu informacji przestrzennej SIT/GIS.

Istnieją duże możliwości wykorzystania metod fotogrametrycznych dla potrzeb tworzenia NMT (Kurczyński, Preuss, 2000). Jednymi z podstawowych instrumentów są autografy analityczne sterowane cyfrowo. Pozwalają na szerokie zautomatyzowanie procesu pomiaru i rejestracji NMT. Numeryczny model terenu można również uzyskać w procesie wytwarzania ortofotografii. W trakcie skanowania profili terenu ich punkty mogą być rejestrowane numerycznie i utworzyć NMT. Obserwator może śledzić w świetle spolaryzowanym trójwymiarową przestrzeń modelu terenu. Do tego celu są także stosowane fotogrametryczne stacje cyfrowe, mające systemy elektronicznej korelacji obrazu. Pomiar punktów jest bardzo wydajny, gdyż mogą one być mierzone nawet setkami w czasie pojedynczych sekund.

Coraz szersze zastosowanie, również do pomiaru punktów szczegółowych terenu, znajdują metody GPS. Proces pomiaru jest całkowicie zautomatyzowany, a dane (współrzędne x, y, z mierzonych punktów) otrzymuje się w postaci cyfrowej, gotowej do dalszego opracowania komputerowego. Dokładności tak uzyskanych współrzędnych punktów mogą być konkurencyjne w stosunku do dokładności uzyskiwanych za pomocą innych metod geodezyjnych.

Technika naziemnego i lotniczego skaningu laserowego, chociaż jest znana zaledwie od kilku lat, już wychodzi z fazy eksperymentalnej. Zalety tej techniki wskazują, że w zakresie budowy NMT może być ona konkurencyjna np. w stosunku do fotogrametrii.

Wyniki badań eksperymentalnych w zakresie oceny dokładności cyfrowych modeli powierzchni terenu

Na podstawie prowadzonych badań oraz w oparciu o podane w literaturze opracowania zagraniczne, autor zaproponował metodę oceny dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu przy pomocy siatki punktów NMT (Wysocki, 1998), która w postaci ogólnej została zapisana przy pomocy formuły:

$$m_h^2 = p_1 A^2 + p_2 (D \operatorname{tg} \alpha)^2 + C^2 \quad (1)$$

gdzie:

- m_h – średni błąd wysokości wyznaczanego (interpolowanego) punktu powierzchni terenu, określający również dokładność aproksymacji powierzchni terenu na podstawie punktów odniesienia (punktów NMT),
- p_1 – współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji powierzchniowej,
- A – parametr charakteryzujący przy pomocy błędu średniego dokładność określenia (pomiaru) wysokości punktów odniesienia,
- p_2 – współczynnik wynikający z wpływu kąta α , występującego tutaj jako parametr związany z oddziaływaniem warunków terenowych (chropowatość terenu),
- D – przeciętna odległość punktów siatki odniesienia (NMT),
- α – przeciętny kąt nachylenia terenu na opracowywanym obszarze,
- $C = D t$ – charakteryzuje za pomocą współczynnika t wpływ chropowatości terenu na dokładność aproksymacji jego powierzchni przy małych (bliskich zera) wartościach kąta nachylenia terenu α i różnych wielkościach D .

Wartości współczynników w powyższej formule wyznaczono w oparciu o badania przeprowadzone przez autora na obiektach doświadczalnych. Temu zagadnieniu autor poświęcił oddzielne opracowania podane w literaturze (Wysocki, 2005). Wyznaczone wartości współczynników dobrze odpowiadały wynikom badań przeprowadzonych na pięciu naturalnych obiektach doświadczalnych. Należy jednak dodać, że badania dotyczyły głównie terenów nizinnych o przeciętnych spadkach do kilku stopni i średnim kącie nachylenia terenu wynoszącym ok. 2° oraz NMT tworzonych na podstawie tachimetrii, gdzie dokładność pomiaru wysokości punktów można oszacować na ok. $\pm 0,05$ m, przy przeciętnej wzajemnej odległości mierzonych punktów NMT, $D = 40\text{--}60$ m. Zakres możliwości rozszerzenia takich badań jest w dużym stopniu zdeterminowany ich dużą pracochłonnością i kosztami.

Prace prowadzone przez autora nad tym zagadnieniem wskazały, że dobrym uzupełnieniem i rozszerzeniem badań terenowych mogą być badania na symulowanych modelach powierzchni terenu generowanych przy pomocy komputera. Dla potrzeb prowadzonych badań opracowano równania matematyczne $Z(H) = f(X, Y)$ przedstawiające powierzchnie o dość zróżnicowanych ale jednostajnych stokach, o zróżnicowanych kątach nachylenia terenu α . Tworząc równanie matematyczne powierzchni starano się przybliżyć jej ogólny kształt do naturalnej powierzchni terenu na wspomnianych wyżej obiektach doświadczalnych. Należy zauważyć, że wygenerowane powierzchnie nie zawierały jednak elementów naturalnej chropowatości powierzchni terenu. Uwzględnienie tej chropowatości tak, żeby generowana powierzchnia przedstawiała ciągły obraz powierzchni obiektu naturalnego okazało się dość trudne.

Ewentualne rozwiązanie tego problemu na drodze statystycznej uznano za niecelowe, ponieważ z teorii geostatystyki wynika, że w przypadku powierzchni terenu zróżnicowanie wartości zmiennych przestrzennych z reguły jest duże, a metody statystyczne ignorują strukturę przestrzeni. W celu rozwiązania tego problemu wykorzystano założenia teorii fraktali. Benoit Mandelbrot (1982) zaproponował, by za fraktal uważać obiekt zbudowany z części podobnych do całości (całość podobną do części). Dlatego w badaniach zastosowano procedurę polegającą na tym, że przez odpowiednie przeskalowanie powierzchni modelu całego obiektu otrzymano zróżnicowaną (chropowatą) powierzchnię części (50x50 m) obiektu eksperymentalnego, tworzącą fraktal, podobną do powierzchni całego obiektu i jednocześnie zbliżoną charakterem do powierzchni terenu na wspomnianych wyżej naturalnych obiektach doświadczalnych. Następnie otrzymaną powierzchnię tworzącą fraktal „dodano” w odpowiedni sposób do fragmentów powierzchni obiektu wygenerowanych na podstawie równania, otrzymując w ten sposób ciągły obraz powierzchni chropowatej dla całego obiektu, zbliżony do powierzchni obiektów naturalnych.

W związku z powyższym, wartości współczynników formuły (1) wyznaczono w oparciu o badania przeprowadzone przez autora na obiektach naturalnych oraz badania eksperymentalne na modelach powierzchni terenu generowanych za pomocą komputera z wykorzystaniem założeń teorii fraktali. Wyznaczone wartości współczynników przedstawiono w formule (2):

$$m_h^2 = 0,55 A^2 + 0,000015 (D^2 \operatorname{tg} \alpha)^2 + (D 0,0020)^2 \quad (2)$$

Opracowaną formułę porównano z podstawową metodą oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni terenu opracowaną przez prof. F. Ackermanna (1996), która została zapisana przy pomocy formuły:

$$m_{\text{NMT}}^2 = m_z^2 + (\alpha d)^2 \quad (3)$$

gdzie:

- m_{NMT} – błąd średni wyznaczenia interpolowanej wysokości punktu terenu na podstawie znanych punktów NMT (dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu),
 m_z – błąd średni wyznaczenia (pomiaru) wysokości punktów NMT,
 α – parametr opisujący charakter terenu,
 d – średnia odległość pomiędzy punktami NMT,
 $\alpha_1 = 0,004\text{--}0,007$ dla terenów łatwych o gładkich powierzchniach,
 $\alpha_2 = 0,010\text{--}0,020$ dla terenów o średniej trudności,
 $\alpha_3 = 0,022\text{--}0,044$ dla terenów trudnych (o nieregularnych i stromych powierzchniach).

Analizę porównawczą przeprowadzono w oparciu o przedstawione wyżej modele powierzchni terenu generowane za pomocą komputera. Dla potrzeb badawczych wygenerowano dwa rodzaje modeli, dla których przyjęto średnie kąty nachylenia terenu wynoszące odpowiednio: 2° i 6° . Przyjmując podany zakres spadków starano się uwzględnić zakres spadków ($0\text{--}6^\circ$) najbardziej reprezentatywnych dla terenów na obszarze Europy. Dla obydwu wariantów wygenerowano siatki „pomierzonych” punktów NMT o gęstości co: $D=25$ m, $D=50$ m, $D=75$ m oraz $D=100$ m. W celu uwzględnienia wpływu dokładności określenia (pomiaru) wysokości punktów NMT, do ustalonych wysokości tych punktów wprowadzono odpowiednie błędy „pomiaru” przez wylosowanie tych błędów za pomocą programu statystycznego dla każdego punktu, przy założeniu normalności rozkładu wprowadzonych błędów. Do wszystkich powyższych wariantów wprowadzono oddzielnie dwa rodzaje błędów „pomiaru”: $A = \pm 0,5$ m oraz $A = \pm 1,0$ m. W ten sposób na podstawie odpowiednich kombinacji powyższych różnych wariantów otrzymano 20 modeli „obiektów”, które przedstawiono w tabeli.

Na podstawie tak otrzymanych numerycznych modeli terenu (NMT) wygenerowano cyfrowe modele powierzchni terenu (CMT), które poddano następnie ocenie dokładności. CMT wygenerowano wykorzystując metodę „funkcji sklejaných” uznawaną za jedną z lepszych przy tego typu zadaniach interpolacyjnych dla terenów o niezbyt skomplikowanych powierzchniach. Dla potrzeb oceny dokładności utworzonych CMT obliczono dla każdego z tych modeli wysokości H_K odpowiednich zbiorów punktów kontrolnych, które następnie wykorzystano do oceny dokładności aproksymacji powierzchni terenu. W tym celu, na podstawie wygenerowanych „prawdziwych” powierzchni modeli obliczono „prawdziwe” wysokości terenu w punktach kontrolnych. Na podstawie błędów wysokości dh w punktach kontrolnych, dla każdego modelu obliczono średni błąd M_h określający dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu według formuły:

$$M_h = \pm \sqrt{\frac{\sum dh^2}{n}}, \quad dh = H_m - H_K \quad (4)$$

gdzie:

- H_m – wysokości punktów kontrolnych określone na podstawie wygenerowanych cyfrowych modeli powierzchni terenu (CMT),
 H_K – „prawdziwe” wysokości punktów kontrolnych,
 n – liczba punktów kontrolnych.

W tabeli wartość błędu M_h porównano z błędami określającymi dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu oszacowanymi według formuły (2) oraz formuły (3). Dla

Tabela. Dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu

Nr modelu	α [g]	A m_z	D d	M_h	Wg formuły (2)		Wg formuły (3)	
					m_h	Δ_h	m_{NMT}	Δ_h
1	2 ^g	0,05	25	0,15	0,10	-0,05	0,18	+0,03
2		0,50	25	0,46	0,38	-0,08	0,53	+0,07
3		1,00	25	0,78	0,75	-0,03	1,02	+0,24
4		0,05	50	0,24	0,32	+0,08	0,35	+0,11
5		0,50	50	0,48	0,49	+0,01	0,61	+0,13
6		1,00	50	0,89	0,81	-0,08	1,06	+0,17
7		0,50	75	0,81	0,79	-0,02	0,72	-0,09
8		1,00	75	1,01	1,02	+0,01	1,13	+0,12
9		0,05	100	1,24	1,23	-0,01	0,70	-0,54
10		0,50	100	1,28	1,29	+0,01	0,86	-0,42
11		1,00	100	1,42	1,44	+0,02	1,22	-0,22
12	6g	0,05	25	0,46	0,23	-0,23	0,50	+0,04
13		0,50	25	0,65	0,44	-0,21	0,71	+0,06
14		1,00	25	1,00	0,78	-0,22	1,12	+0,12
15		0,50	50	0,88	0,99	+0,11	1,18	+0,30
16		1,00	50	1,13	1,18	+0,05	1,41	+0,28
17		0,50	75	2,04	2,11	+0,07	1,58	-0,46
18		1,00	75	2,10	2,20	+0,10	1,80	-0,30
19		0,50	100	3,75	3,68	-0,07	2,06	-1,69
20		1,00	100	3,82	3,74	-0,08	2,24	-1,58

*wartości liniowe podano w metrach.

poszczególnych modeli CMT podano różnice Δ_h pomiędzy wartościami błędów M_h określających dokładności tych modeli wyznaczone na podstawie przedstawionych wyżej badań eksperymentalnych a błędami m_h i m_{NMT} tych samych modeli obliczonymi według formuły (2) oraz formuły (3).

Jak wynika z tabeli, otrzymano dobrą zbieżność wyników na podstawie porównywanych metod. Wskazuje to na spójność podstawowych założeń przyjętych przy opracowywaniu tych metod. Należy jednak dodać, że formuła (2) jest bardziej uniwersalna ponieważ określa charakter terenu poprzez obiektywny parametr jakim jest kąt nachylenia α , zamiast subiektywnego doboru parametru α w formule (3). Formuła (2) posiada również współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji powierzchniowej. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano metodę „funkcji sklejaných” uznawaną za jedną z lepszych przy tego typu zadaniach interpolacyjnych – dla terenów o niezbyt skomplikowanych powierzchniach. Wykonanie powyższych opracowań z wykorzystaniem innych metod interpolacyjnych może dać w takich terenach trochę inne wyniki, na co wskazują wstępne badania przeprowadzone

przez autora w tym zakresie. Formuła (2) dała lokalnie lepsze wyniki w ocenie dokładności cyfrowego modelu terenu niż formuła (3), co wskazuje na celowość rekomendowania opracowanej metody w badaniach dotyczących implementacji dyrektywy INSPIRE i ustalenia w jej ramach zasad niezbędnych do oceny dokładności opisu ukształtowania powierzchni terenu – przy ustanawianiu infrastruktury informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej. Należy dodać, że bardziej szczegółowe porównanie przedstawionych wyżej metod wymagało by przeprowadzenia szerszych badań i analiz.

Podsumowanie

Szybki rozwój gospodarczy powoduje, że coraz więcej zagadnień badawczych, planistycznych i projektowych (np. związanych z budową dróg i autostrad, linii kolejowych, sieci przesyłowych, zbiorników retencyjnych czy też prac w zakresie osłony przeciwpowodziowej) ma charakter przestrzenny, wymagający informacji 3D. W zagadnieniach tych dokładność aproksymacji powierzchni terenu za pomocą modeli numerycznych/cyfrowych będzie miała duże znaczenie. W pracy przedstawiono opracowaną przez autora metodę oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni terenu, którą porównano z wynikami podanych w pracy innych badań w tym zakresie. Otrzymano dobrą zbieżność analizowanych wyników. Należy jednak dodać, że opracowana metoda zapisana przy pomocy odpowiedniej formuły jest bardziej uniwersalna od porównywanej metody F. Ackermanna ponieważ określa charakter terenu poprzez obiektywny parametr jakim jest kąt nachylenia, zamiast subiektywnego doboru parametru α w formule prof. Ackermanna. Opracowana metoda oceny dokładności cyfrowych modeli powierzchni terenu może znaleźć zastosowanie do:

- prognozowania dokładności numerycznej/cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu w zależności od dokładności wyznaczenia wysokości punktów NMT, przeciętnej odległości tych punktów oraz nachyleń terenu na rozpatrywanym obszarze,
- oceny przez odpowiednio wykształconego użytkownika (projektanta) dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu, którą może oszacować na podstawie posiadanej siatki punktów NMT, spełniającej założone, powyższe warunki.

Przeprowadzone badania wskazały, że opracowana i przedstawiona w pracy metoda może być rekomendowana przy ustanawianiu infrastruktury informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE) oraz ustaleniu w jej ramach zasad niezbędnych do oceny dokładności opisu ukształtowania powierzchni terenu.

Literatura

- Ackermann F., 1996: Technique and strategies for DEM generation. Digital photogrammetry: an addendum to the manual photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 135-141.
- Gaździcki J., 2007: Problematyka transpozycji dyrektywy INSPIRE do prawa polskiego. *Przegląd Geodezyjny*, nr 5, 14-18, Warszawa.
- Kurczyński Z., Preuss R., 2000: Podstawy fotogrametrii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Mandelbrot B.B., 1982: The fractal geometry of nature. W.H. Freeman and Co., New York.
- Wysocki J., 1979: Analiza dokładności opracowań warstwicowych do projektowania drenowania użytków rolnych. *Zesz. Nauk. SGGW-AR, Melioracje Rolne*, nr 18, Warszawa.
- Wysocki J., 1987: Problemy dokładności nowoczesnych technik opracowania wielkoskalowych map warstwicowych pod kątem potrzeb wodnomelioracyjnych. *Rozprawy naukowe i monografie*. Wydawnictwo SGGW-AR, 100 s., Warszawa.

- Wysocki J., 1997: On the approximation of the land surface in the computerised methods of working out contour lines. *Ann. Wars. Agricult. Univ. SGGW, Land Reclam* 28, Warszawa.
- Wysocki J., 1998: Numeryczny model terenu jako baza danych dla przestrzennego zarządzania zlewni i potrzeb konstrukcji inżynierskich. *Konf., SGGW, PAN „Problemy kształtowania środowiska obszarów wiejskich”, Przegł. Nauk. Wýdz. IiKŚ*, z. 15, 66-72 Warszawa.
- Wysocki J., 1999: Metody GPS i możliwości ich zastosowania do tworzenia numerycznego modelu terenu (NMT) dla inżynierii środowiska. *Przegład Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, z.17, 151-156. Warszawa.
- Wysocki J., Sączuk J., Buczek W., 2001: Możliwości wykorzystania pakietu GeoSET jako programu narzędziowego dla potrzeb geodezyjnych opracowań metodą „elektronicznego stolika”, (The possibilities of the application of the GeoSET as a computer program for the geodetic elaboration by the method of „electronic table”), Międzynarodowa Konferencja „Kataster, Fotogrametria, Geoinformatyka” Kraków 2001, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* Vol. 11, 21-24.
- Wysocki J., 2001: O metodzie „elektronicznego stolika” na potrzeby opracowania in situ rzeźby terenu oraz geodezyjnych opracowań realizacyjnych. *Przegład Geodezyjny* nr 11, 11-12. Warszawa.
- Wysocki J., 2003: Zagadnienie oceny dokładności aproksymacji powierzchni terenu przy pomocy metod geodezyjnych, (The problem of estimation of the accuracy of approximation of the land surface by the geodetic methods). Międzynarodowa Konferencja ”Cadastre, Photogrammetry, Geoinformatics”, Lwów 2003. *Zeszyty Naukowe Politechniki Lwowskiej, Geodezja, kartografija i aerofotosjomka*, Vyp. 64. 16-21, Lwowska Politechnika, Lwów.
- Wysocki J., 2005: Dokładność cyfrowych modeli terenu w aspekcie badań eksperymentalnych. *Przegład Geodezyjny*, nr 6, 3-7, Warszawa.
- Wysocki J., 2007: Wpływ spadków terenu oraz dokładności określenia wysokości punktów NMT na dokładność cyfrowego modelu powierzchni terenu. (Influence of the land gradient and accuracy of height of DTM points on accuracy of digital model of the land surface). Międzynarodowa Konferencja ”Cadastre, Photogrammetry, Geoinformatics”, Lwów 2007. *Zeszyty Naukowe Politechniki Lwowskiej, Geodezja, kartografija i aerofotosjomka*, Vyp. 68. 156-162, Lwowska Politechnika, Lwów.
- Wysocki J., 2008: Geodezja z fotogrametrią i geomatyka dla inżynierii i ochrony środowiska oraz budownictwa. Wydawnictwo SGGW, 362 s. Warszawa.

Abstract

Rapid economic development causes that more and more research, planning and design issues have spatial character requiring 3D information. For these issues, accuracy of land surface approximation with the use of digital models will be of vital importance. This paper presents a method of accuracy assessment of a digital surface model developed by the author as compared with the results of other studies in this field. A good convergence of the analyzed results has been obtained. The proposed method of accuracy assessing of digital terrain models can be used to prediction of accuracy of digital approximation depending on the accuracy of the DTM points, the average points distance and land slopes of the researched area.

dr hab. inż. Jerzy Wysocki, prof. SGGW
jerzy_wysocki@sggw.pl
wysockijerzy@aster.pl