

NUMERYCZNY MODEL TERENU (NMT) JAKO BAZA DANYCH DLA PRZESTRZENNEGO URZĄDZANIA ZLEWNI I POTRZEB KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH

DIGITAL TERRAIN MODEL AS A BASE OF DATA FOR THE SPATIAL TRANSFORMATION OF THE WATERSHEDS AND ENGINEERING CONSTRUCTIONS

Jerzy Wysocki

Katedra Geodezji i Fotogrametrii

Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska

SGGW w Warszawie

Wprowadzenie

Rozwój gospodarczy wymaga racjonalnego zarządzania i gospodarowania terenami oraz zasobami. Jednym z podstawowych zagadnień w tym zakresie jest gospodarowanie wodą dla zrównoważonego rozwoju obszarów wiejskich poprzez przestrzenne urządzenie zlewni i lokalizację konstrukcji inżynierskich na tych obszarach. Do realizacji powyższych celów niezbędna jest odpowiednia informacja przestrzenna.

Przy realizacji prac np. w zakresie budowy zbiorników retencyjnych, regulacji rzek i ich obwałowań, budownictwa wiejskiego, budowy wodociągów wiejskich, sieci melioracyjnych itp. koniecznym jest posiadanie informacji o ukształtowaniu terenu. Podstawową formą dostarczania informacji przestrzennej o terenie jest w dalszym ciągu mapa sytuacyjno-wysokościowa. Coraz częściej jednak wykorzystywane są interaktywne metody planowania i projektowania, polegające na ciągłej współpracy człowieka z komputerem w procesie opracowywania projektu. Wymaga to, oprócz łatwej do percepcji informacji w formie graficznej, również informacji w formie numerycznej, np. w postaci numerycznego modelu terenu wprowadzanego do pamięci komputera. Model taki może być wykorzystywany np. do automatycznego projektowania i obliczania robót ziemnych, opracowywania niwelet jak również do monitoringu zmian środowiska. NMT może więc stanowić bazę danych przestrzennych o powierzchni terenu obszaru zlewni dla potrzeb jej urządzenia, konstrukcji inżynierskich oraz do monitorowania zachodzących w zlewni zjawisk.

W referacie przedstawiono uogólniony przegląd metod numerycznej aproksymacji powierzchni terenu oraz zagadnienia dokładności aproksymacji przy pomocy NMT, mające dla prac planistycznych, projektowych i badawczych podstawowe znaczenie.

Metody pomiaru punktów numerycznego modelu terenu

Rzeczywista powierzchnia topograficzna jest reprezentowana w NMT pomierzonym zbiorem punktów terenowych o wyznaczonych współrzędnych x, y, z nazywanych punktami odniesienia lub oparcia. Współrzędne punktów można otrzymać z geodezyjnych pomiarów klasycznych lub fotogrametrycznych (Sitek 1991, Wysocki 1987a, b, Wysocki 1995a) czy też metodami GPS (Czarnecki 1996, Karaszkiewicz, Wysocki, Kłaczyński 1998, Oszczak 1993, Zischinsky 1997). Pominiemy tutaj zagadnienie pomiaru NMT tachimetrami klasycznymi czy elektronicznymi jako dobrze znane. Natomiast wydaje się celowe poświęcenie trochę miejsca metodom fotogrametrycznym oraz GPS, podlegającym dalszemu dynamicznemu rozwojowi.

Istnieją szerokie możliwości wykorzystania metod fotogrametrycznych dla potrzeb tworzenia NMT. Jednymi z podstawowych instrumentów są autografy analityczne, sterowane cyfrowo. Pozwalają na szerokie zautomatyzowanie procesu pomiaru i rejestracji NMT. Numeryczny model terenu można również otrzymać w procesie wytwarzania ortofotografii. W trakcie skanowania profili, ich punkty mogą być rejestrowane numerycznie i utworzyć NMT. Do tego celu są także stosowane instrumenty posiadające systemy elektronicznej korelacji obrazu. Umożliwiają one automatyczne odczytywanie profili (w kierunku x, y) czy digitalizację modeli o założonej gęstości punktów

Coraz szersze zastosowanie dla potrzeb tworzenia osnów jak również do pomiaru punktów szczegółowych znajdują metody GPS (Global Positioning System). Proces pomiaru jest całkowicie zautomatyzowany a dane (współrzędne x, y, z) otrzymuje się w postaci cyfrowej, gotowej do dalszego opracowania komputerowego. Dokładności współrzędnych punktów wyznaczonych przy pomocy GPS mogą być konkurencyjne w stosunku do dokładności uzyskiwanych przy pomocy klasycznych metod geodezyjnych. Technologia ta ma również swoje ograniczenia. Do głównych należy warunek łączności z satelitami w czasie pomiaru tzw. czysty horyzont od 15 stopni wzwyż. Postęp w tym zakresie może przynieść integracja odbiornika GPS z tachimetrem elektronicznym tworząc uniwersalne narzędzie pomiarowe łączące technologie satelitarne i naziemne.

Zagadnienie numerycznej aproksymacji powierzchni terenu przy pomocy NMT

Na podstawie pomierzonych punktów NMT dokonywana jest aproksymacja powierzchni terenu za pomocą zbioru (kombinacji) powierzchni odpowiedniego stopnia (Gaździcki 1975, Piasek i in. 1981, Wysocki 1981).

Można przeprowadzić różne podziały proponowanych metod numerycznej aproksymacji powierzchni terenu. Najprostszy podział może wyróżnić metody bazujące na interpolacji liniowej i nieliniowej (Piasek i in. 1981, Wysocki 1981, 1987).

Na przykład oparta na interpolacji liniowej metoda komputerowa opracowana w SGGW (Wysocki 1987a, 1995b, 1997) wykorzystuje dwie procedury: z zadaną topologią oraz taką, gdzie topologia cyfrowego modelu terenu jest generowana automatycznie przez komputer na podstawie punktów odniesienia.

Jedną z podstawowych metod opartych na interpolacji powierzchniowej jest metoda zaproponowana przez Kraus'a (Kraus 1971). Przy obliczaniu interpolacji rozdziela on wielkości na trzy części:

1. trend-w formie funkcji wielomianowej
2. część korelowaną-w której wyszczególnia wariancje i kowariancje (korelacje pomiędzy sąsiednimi punktami terenu)
3. odchyłki (poprawki)

Wartość interpolacji u jest wyznaczana empirycznie:

$$u = c \cdot C^{-1} \cdot I_i \quad (3.1)$$

gdzie: I_i - wysokości w n punktach

c - wektor w którym zebrane są statystyczne zależności (kowariancje)

C - macierz zawierająca kowariancje między punktami odniesienia oraz wariancje v .

Postępowanie interpolacyjne służy do obliczania wysokości punktów cyfrowego modelu terenu stanowiących węzły dostatecznie gęstej siatki kwadratów.

Innego podziału metod modelowania powierzchni terenu funkcją interpolacyjną dokonał Schut (Schut 1976). Podzielił on je na sześć grup, przy czym najistotniejsza wydaje się grupa pierwsza i druga.

Pierwszą grupę nazwał metodami ruchomych powierzchni (moving surface). Wysokości punktów cyfrowego modelu stanowiących węzły regularnej siatki są obliczane z powierzchni aproksymujących, tworzonych każdorazowo dla obliczanego punktu w oparciu o leżące w sąsiedztwie pomierzone punkty odniesienia. Kształt powierzchni może być określony pełnym równaniem wielomianowym stopnia drugiego lub zredukowanym w postaci płaszczyzny

pochylonej, czy też poziomej. Wysokościom punktów odniesienia przyporządkowane są odpowiednie wagi (funkcje wagowe).

W drugiej grupie metod (sumation of surface-sumowanie powierzchni) zostało zastosowane rozwiązanie znane w matematyce w teorii korelacji. Wysokość punktu interpolowanego określana jest wzorem:

$$h = b^T \cdot B^{-1} \cdot z \quad (3.2)$$

Dla każdego interpolowanego punktu i -ty składnik wektora b jest funkcją odległości od punktu szukanego do i -tego punktu odniesienia, zaś z jest wektorem, którego składniki są wysokościami punktów odniesienia. Elementy macierzy B wynikają z funkcji odległości zwanej również funkcją korelacji.

Inną jeszcze w stosunku do poprzednich, systematykę podziału metod aproksymacji powierzchni zaproponowali Sierbieniuk i inni (Sierbieniuk 1990). Wybór funkcji aproksymującej powierzchnię terenu uzależnili od charakteru danych źródłowych, w których zbiór pomierzonych punktów odniesienia może być regularny, półregularny (po izoliniach i profilach) i nieregularny.

Jak wynika z powyższego ogólnego przeglądu metod, często jako CMT jest określany cyfrowy model terenu w postaci dyskretnej ze znanym algorytmem interpolacyjnym. Taki uniwersalny model cyfrowy budowany jest najczęściej w postaci regularnej siatki powierzchniowej utworzonej na podstawie punktów NMT (odniesienia). CMT jest modelem wtórnym w stosunku do NMT i jego dokładność jest niższa niż dokładność pomiaru punktów NMT. Dla prac planistycznych, projektowych i badawczych dokładność aproksymacji powierzchni terenu ma zasadnicze znaczenie.

O dokładności aproksymacji powierzchni terenu przy pomocy NMT

Do podstawowych metod numerycznej aproksymacji terenu należy wspomniana już metoda zaproponowana przez Krausa (3.1). Cechą charakterystyczną tej metody jest potraktowanie aproksymacji jako procesu stochastycznego o charakterze stacjonarnym tzn. kowariancja zmiennych zależy jedynie od ich odległości. Jeżeli mamy n punktów odniesienia, to do aproksymacji z wyrównaniem metodą najmniejszych kwadratów można użyć n równań błędów, co w zapisie macierzowym można wyrazić jako:

$$Z = H + h = BX + h \quad (4.1)$$

gdzie:

Z - wysokości punktów odniesienia

H - składowe decydujące opisane wielomianem (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, jest podzielona na składowe:

$$h_i = s_i + v_i \quad (4.2)$$

gdzie:

s_i - składowe współzależne tj. formy terenowe, które z powodu swej różnorodności nie mogą być opisane funkcją (wielomianami) i dlatego wyznaczane są metodami statystycznymi z użyciem wariancji i kowariancji.

r_i - reprezentuje błąd pomiaru - „szum”, czyli błędy przypadkowe pomiaru oraz wielkości związane z rodzajem terenu.

Dokładność pomiaru tachimetrami elektronicznymi jest na tyle wysoka, że można praktycznie jej wpływ przy pomiarze punktów odniesienia zaniedbać. Natomiast niższa jest dokładność wysokościowych pomiarów fotogrametrycznych i szybkich metod GPS. Kiedy dokładność ta będzie miała istotny wpływ na wartość r_i . Rozpatrzmy to zagadnienie w podejściu „klasycznym”.

Można wydzielić trzy grupy błędów mających istotny wpływ na dokładność przedstawienia rzeźby terenu (Wysocki 1985):

- 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 średnio na $\pm 0.05m$.

- Błędy spowodowane „chropowatością”, rzeźby. Jest ona zaczątkiem morfologii terenu i przejawia się małymi nierównościami (małymi formami) oraz niejednakowymi spadkami pomiędzy punktami terenu. Wartość błędu jest uzależniona od odległości (gęstości) pomierzonych punktów. Wartość tego błędu określoną na podstawie badań przeprowadzonych przez Langa (Lang 1970) oraz autora (Wysocki 1979) można dla przeciętnych warunków terenowych oszacować na co najmniej $\pm 0,10m$, a np. przy średniej odległości punktów co 50m błąd wysokości wg. badań Langa został oszacowany na $\pm 0,18m$.

- Błędy wynikające z kurczenia się gleby pod wpływem zmian wilgotności. Wartość tego błędu można oszacować na ok. 0,05m. Nie wywiera on wprawdzie wpływu na dokładność aproksymacji powierzchni terenu, lecz może się uwidocznić dopiero podczas realizacji projektu..

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 wielkość będzie miała gęstość i poprawność rozmieszczenia mierzonych punktów. Jak wynika z cytowanych badań przy średniej odległości punktów ok. 50m można uzyskać dokładność aproksymacji powierzchni terenu ok. $\pm 0,18m$.

Należy zauważyć, że zwiększanie gęstości mierzonych punktów NMT dużo mniej wpływa na ekonomikę pomiarów fotogrametrycznych niż pomiarów terenowych.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono uogólniony przegląd metod pomiaru punktów NMT oraz metod numerycznej aproksymacji powierzchni terenu. Wskazano na ciągły rozwój metod fotogrametrycznych oraz GPS i możliwości ich wykorzystania dla potrzeb pomiaru punktów dla utworzenia NMT. Z przedstawionego przeglądu metod numerycznej aproksymacji powierzchni terenu wynika, że metody aproksymacji uwzględniające korelacje pomiędzy punktami NMT mają podstawowe znaczenie.

Przedstawiono również zagadnienie dokładności aproksymacji powierzchni terenu. Wskazano na zasadnicze znaczenie błędów spowodowanych chropowatością powierzchni terenu i ich związek z gęstością i poprawnością rozmieszczenia punktów NMT. Na podstawie badań eksperymentalnych dokładność aproksymacji w przeciętnych warunkach terenowych oszacowano na $\pm 0,1 \div 0,2m$ przy średniej gęstości punktów co $35 \div 50 m$ i błędach przypadkowych pomiaru poniżej wartości „szumu”.

Wykorzystanie metod numerycznego modelu terenu pozwala na szybkie włączenie danych do systemów informacji przestrzennej (SIT-GIS) i ich szerokie wykorzystanie dla przestrzennego zarządzania zlewni i potrzeb konstrukcji inżynierskich.

Literatura

- CZARNECKI K., 1996: *Geodezja współczesna w zarysie*. Wiedza i Życie, 490 ss.
GAŹDZICKI J., 1975: *Informatyka w geodezji i kartografii*. PPWK, 300 ss.
KARASZKIEWICZ W., WYSOCKI J., KŁACZYŃSKI M., 1998: *Możliwości wykorzystania numerycznego modelu terenu metodą GPS jako bazy danych dla nakładki wysokościowej do mapy katastralnej*. Mat. na konf. Lwów-Ukraina.

- KRAUS K.,1971: *Automatische Berechnung des digitale Höhenlinien*.Z.Vermessungsw.nr 6,s 14-27.
- LANG H.,1970: *Höhengenauigkeit tachymetrisch bestimer unvermarker Punktein freier Feldlage für die Ableitung grossmasstablicher Höhenschichtlinienpläne*.Vermessungstechnik,nr 3,s.8-15.
- OSZCZAK S.,1993: *Technologia GPS w praktyce geodezyjnej*.Przepl.Geodez.,nr 7,s.6-11.
- PIASEK Z.,MILBERT S.,PIERZCHAŁA H.,1981: *Przegląd numerycznych modeli terenu*.Zesz.Nauk.AGH,Geodez.,z.62,s.36-47.
- SCHUT G.H.,1976: *Review of interpolation methods for digital terrain models*.XIIth Congress of the International Society for Photogrammetry.Helsinki.
- SIERBIENIUK G.H.,i inni,1990: *Metody modelowania geopolitej po danym w nieregularno rozpołożonych toczkach*.Geodezja i Kartografia,Moskwa,nr 11,s.37-49.
- SITEK Z.,1991: *Fotogrametria ogólna i inżynieryjna*.PPWK,750 ss.
- WYSOCKI J.,1979: *Analiza dokładności opracowań warstwicznych do projektowania drenowania użytków rolnych*.Zesz.Nauk.SGGW,Melioracje Rolne 18,s.52-61.
- WYSOCKI J.,1981: *Comparative analysis of chosen methods of testing contour lines*.Ann.Wars.Agricult.Univ.SGGW,Land Reclam. 19,s.91-97.
- WYSOCKI J.,1985: *O dokładności map warstwicznych przy cięciu równym 0,25m*.Przepl.Geodez.,nr 4-5,s.13-15.
- WYSOCKI J.,1987a: *Problemy dokładności nowoczesnych technik opracowania wielkoskalowych map warstwicznych pod kątem potrzeb wodnomelioracyjnych*.Wyd.SGGW,94 ss.
- WYSOCKI J.,1987b: *On accuracy of the photogrammetric digital determination of elevations*.Ann.Wars.Agricult.Univ.SGGW-AR,Land Reclam. 23,s.53-60.
- WYSOCKI J.,1995a: *Geodezja z fotogrametrią*.Wyd.SGGW,wyd.IV,212 ss.
- WYSOCKI J.,1995b: *Porównanie dokładności wybranych metod komputerowych i analogowych wielkoskalowych opracowań warstwicznych*.Przepl.Geodez.,nr 5, s.3-4.
- WYSOCKI J.,1997: *Preparation of large scale contour maps using computer techniques*.Ann.Wars.Agricult.Univ.,SGGW,Land Reclam. 28,s.3-11.
- ZISCHINSKY R.,1997: *An investigation of GPS Post-Mission Single Point Positioning Errors*.AVN,nr 2,s.52-60.

Summary

Digital terrain model as a base of data for the spatial transformation of the watersheds and engineering constructions. For the sustainable development of rural areas is indispensable suitable spatial information. Engineering dealing with construction of water reservoirs storage tanks, rural water supply systems, country roads, buildings, irrigation and drainage networks etc. need information of land relief.

In the paper review of the methods of measuring points of the digital terrain model (DTM) and methods of numerical approximation of the land surface are presented. Development of photogrammetric and GPS methods are pointed, and possibilities of their application for measurements of the DTM points. The investigations prove that the methods of approximation which involve correlation between the terrain points having essential significance. Are presented also problem of accuracy of approximation of the land surface based on DTM. Are pointed essential significance of the area surface roughness and of small area configuration form and their connection with density and correctness of locate of the DTM points. On the base of the experimental investigations the accuracy of the approximation to be estimated as $0,1 \div 0,2$ m.

The use of DTM methods allows fast incorporation of the data into the spatial information systems (LIS-GIS) and their wide application for spatial transformation of the watersheds and engineering constructions.

Jerzy Wysocki

Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska SGGW

Katedra Gcodezji i Fotogrametrii

02-787 Warszawa

ul. Nowoursynowska 166