

KRZYSZTOF BOJAROWSKI, DARIUSZ GOŚCIEWSKI*

GENEROWANIE NUMERYCZNEGO MODELU TERENU NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIARU SKANEREM LASEROWYM

DIGITAL TERRAIN MODEL GENERATION BASED ON LASER SCANNER MEASUREMENT RESULTS

Streszczenie

Na efektywność generowania numerycznego modelu terenu decydujący wpływ ma rozmieszczenie punktów pomiarowych. W przypadku klasycznych pomiarów geodezyjnych dobór punktów reprezentujących teren jest dokonywany w trakcie pomiaru i jest uzależniony przede wszystkim od doświadczeń zespołu pomiarowego. Zastosowanie nowoczesnych technologii pomiarowych, w których punkty rejestrowane są automatycznie, a o ich rozmieszczeniu decydują parametry ustalone w systemie sterującym pracą instrumentu, wymaga często wstępnego przetworzenia zbiorów pomiarowych w celu dostosowania ich struktury do tworzenia numerycznego modelu terenu. W artykule podano charakterystykę wyników pomiaru pozyskanych skanerem laserowym i przedstawiono propozycję przetwarzania takiego zbioru na przykładzie testowym.

Słowa kluczowe: numeryczny model terenu, skaning laserowy

Abstract

The effectiveness of digital terrain model generation is determined by positioning of measurement points. In case of classical land survey measurements the choice of points representing the terrain is done during the measurement and depends mainly on the experience of survey team. Application of modern measurement technologies where points are recorded automatically and their positioning is determined by parameters recorded in the system controlling the instrument operation often requires initial processing of measurement results to adjust their structure to generation of a digital terrain model. The paper presents a characteristic of measurement results obtained using a laser scanner and a proposal for processing such a set on test example.

Keywords: digital terrain model, laser scanning

* Dr inż. Krzysztof Bojarowski, dr inż. Dariusz Gościewski, Instytut Geodezji, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

1. Wstęp

Numeryczny model terenu jest istotnym elementem systemów informacji przestrzennej umożliwiającym realizację analiz przestrzennych, opracowanie projektów i wizualizację informacji w układach trójwymiarowych [7]. O dokładności opracowania rzeźby terenu w postaci numerycznej decydują w szczególności trzy czynniki:

- dokładność określenia położenia punktów i obiektów wykorzystywanych do generowania numerycznego modelu terenu,
- algorytm interpolacyjny i parametry przetwarzania,
- urozmaicenie rzeźby terenu.

Zatem rozmieszczenie punktów wykorzystywanych do tworzenia numerycznego modelu terenu oraz dobór efektywnych algorytmów interpolacji to dwa zasadnicze problemy, które należy uwzględnić przy projektowaniu warstw wysokościowych w mapie numerycznej. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wykonywania pomiarów przez instrumenty rejestrujące punkty w sposób automatyczny, według zadanych kryteriów (skaner lotniczy, skaner naziemny, echosonda wielowiązkowa) [1, 3].

2. Charakterystyka zbiorów obserwacji pozyskanych skanerem laserowym

Stosowane obecnie technologie pomiarów geodezyjnych pozwalają w zasadzie na uzyskiwanie większych dokładności pomiaru niż wymagają tego obowiązujące normy techniczne, szczególnie w zakresie pomiarów wykonywanych dla potrzeb numerycznego modelu terenu. Dokładność pozyskiwania danych może być w znaczący sposób ustalana przez dobór źródeł danych przestrzennych oraz metod pomiaru. W tym przypadku duże znaczenie ma również doświadczenie zespołu pomiarowego lub operatora urządzeń rejestrujących.

W klasycznych metodach pozyskiwania danych sytuacyjno-wysokościowych zespół pomiarowy decyduje o rejestracji punktów, które są charakterystyczne dla odzwierciedlenia rzeźby terenu w mapie numerycznej. W szczególności są to punkty o pomierzonej wysokości, linie nieciągłości, linie grzbietowe i linie ciekowe. W tej technologii zasadniczą rolę odgrywają doświadczenie zespołu wykonującego pomiar, zróżnicowanie rzeźby terenu oraz zastosowany algorytm interpolacji w oprogramowaniu wykorzystywanym do generowania numerycznego modelu terenu.

Do bezpośrednich metod pomiaru terenu należy zaliczyć również najnowsze technologie pomiarowe, np. skanery naziemny i lotniczy oraz echosondy wielowiązkowe do pomiaru dna zbiorników wodnych. W tych przypadkach o rejestracji wybranych punktów decydują parametry ustawione w systemie sterującym pracą urządzenia pomiarowego. Najczęściej jest to zadana rozdzielczość ustawiona dla założonej lub pomierzonej odległości od skanera.

Istota pomiaru skanerem laserowym polega na wyznaczeniu współrzędnych mierzonych punktów na podstawie pomierzonych kątów oraz bezlustrowym pomiarze odległości. Pomiar realizowany jest w profilach, przy czym im wyznaczane punkty są bardziej odległe od instrumentu, tym wzajemna odległość profili jest większa. Przykładowy wynik pomiaru rzeźby terenu zrealizowany skanerem laserowym ScanStation firmy Leica na obiekcie testowym przedstawiono na rys. 1.

Rys. 1. Wynik pomiaru rzeźby terenu skanerem laserowym
 Fig. 1. Land relief measurement results using laser scanner



Cechą charakterystyczną zbiorów obserwacji zarejestrowanych skanerem laserowym jest stosunkowo duża liczba punktów wynikająca z ustawionej rozdzielczości skanowania. Na prezentowanym obiekcie testowym (rys. 1) zarejestrowano ich ok. 8 tys. Należy również podkreślić, że nie zostają wyróżnione szczególne cechy terenu typu linie nieciągłości, punkty charakterystyczne itp. Zazwyczaj nie prowadzi się szkicu polowego, ponieważ nie ma możliwości bezpośredniego przestrzennego powiązania treści szkicu numerycznego rejestrowanymi danymi. Powiązanie takie może być dokonane jedynie za pomocą specjalnych tarcz, rozpoznawalnych przez instrument i rozmieszczonych w wybranych punktach na mierzonej obszarze.

Analizując technologię pomiaru pionowego ukształtowania terenu skanerem laserowym, można stwierdzić, że szczególnie może być ona przydatna do pomiarów hałd, wyrobisk, wykopów. Generowane na podstawie tych pomiarów modele przestrzenne mogą być wykorzystane do różnego typu analiz, a przede wszystkim do obliczania objętości robót ziemnych.

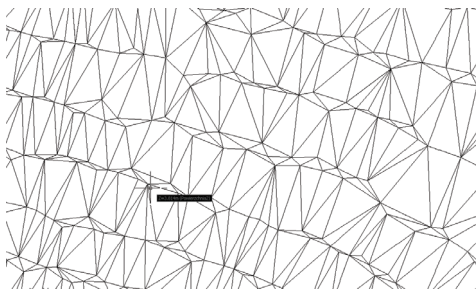
W przypadku stosowania technologii pomiaru rzeźby terenu skanerem laserowym dla obszarów naturalnych należałoby rozważyć możliwość opracowania wyników metodą kombinowaną. Polegałoby to na uzupełnieniu zbioru pozyskanych punktów informacjami o morfologii z pomiaru sytuacyjnego lub danymi uzyskanymi na podstawie przetwarzania graficzno-numerycznego istniejących opracowań kartograficznych.

3. Tworzenie numerycznego modelu terenu

Wygenerowany obraz numerycznego modelu terenu w znaczny sposób zależy od zastosowanego algorytmu interpolacji i ustawienia parametrów przetwarzania. Z reguły specjalistyczne oprogramowanie umożliwia utworzenie jednego z dwóch typów modeli terenu – TIN oraz GRID.

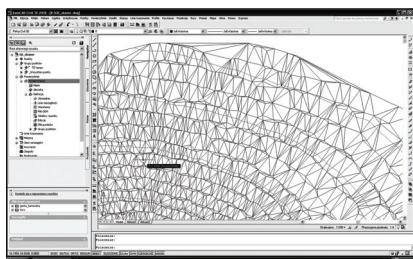
Tworzenie siatki typu TIN realizowane jest na podstawie pomierzonych punktów, na których oparte są wierzchołki trójkątów. Zatem o kształcie i wielkości trójkątów decyduje miejsce rejestracji punktów. Na rysunku 2 ukazano fragment siatki modelu typu TIN utworzonej na podstawie punktów pozyskanych skanerem laserowym. Już pobieżna obserwacja pozwala zauważyć ciągi wydłużonych mniejszych trójkątów wzdłuż profili pomiarowych i większych utworzonych pomiędzy profilami. Taki układ trójkątów jest niekorzystny, ponieważ szczególnie trójkąty o niewielkich rozmiarach i o kształtach znacznie odbiegających

od regularnych tworzą lokalne zniekształcenia. Również interpolacja punktów pośrednich może w takiej sytuacji być obciążona większymi błędami.



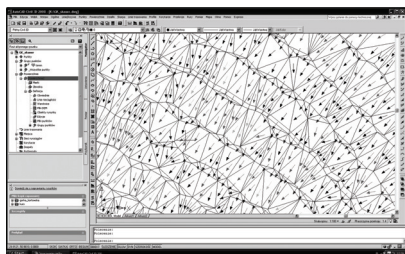
Rys. 2. Siatka modelu typu TIN
Fig. 2. TIN type model grid

Na rysunku 3 zaprezentowano fragment terenu wygenerowany w systemie Civil 3D z układem warstw. Wyraźnie widać, że układ trójkątów, szczególnie wzdłuż profili pomiarowych, ma wpływ na przebieg warstw. Wprowadź wartości zniekształceń dla rozpatrywanego obiektu testowego, który jest reprezentowany przez stosunkowo ubogi pod względem morfologicznym teren, są niewielkie, jednak w przypadku analiz deformacji obiektów budowlanych czy inżynierskich z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu może to mieć duże znaczenie.



Rys. 3. Układ warstw na tle siatki trójkątów
Fig. 3. System of contour lines against the background of the net of triangles

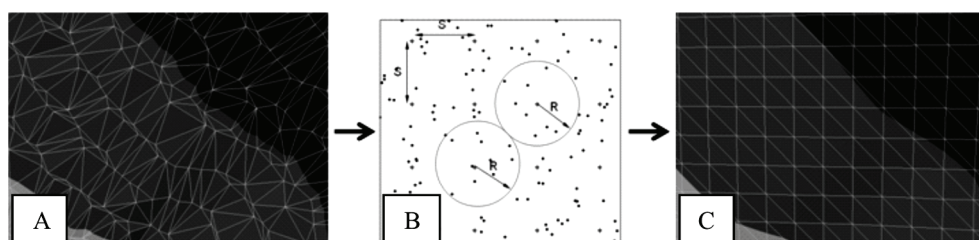
Również wyniki analiz przeprowadzanych z zastosowaniem tak utworzonego numerycznego modelu terenu są uzależnione od rozmieszczenia, kształtu i wielkości trójkątów. Na rysunku 4 ukazano wynik analizy „wektorów spadku” umożliwiającej ukazanie kierunku i wartości spadków za pomocą strzałek.



Rys. 4. Rezultat działania analizy „wektory spadków”
Fig. 4. Result of operation of “slope vectors” analysis

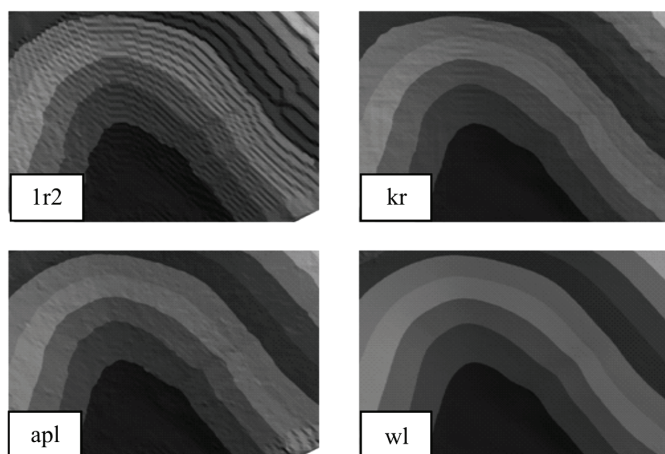
4. Analiza modelu terenu za pomocą struktury typu GRID

Do analizy numerycznego modelu powierzchni można również wykorzystać strukturę GRID opartą na regularnej siatce kwadratów [2, 5]. Warto zwrócić uwagę na kilka aspektów, które są kluczowe dla dokładności takich przekształceń, a co za tym idzie – dla jakości numerycznego modelu terenu. Po ustaleniu wielkości boku siatki struktura TIN (rys. 5A) jest zamieniana na strukturę GRID (rys. 5C) w drodze interpolacji. Wysokości w punktach węzłowych siatki kwadratów są obliczane na podstawie otaczających węzeł punktów pomiarowych, które lokalizowane są wokół węzła w określonym promieniu R (rys. 5B).



Rys. 5. Zamiana struktury TIN na GRID
Fig. 5. Transformation of TIN into GRID structure

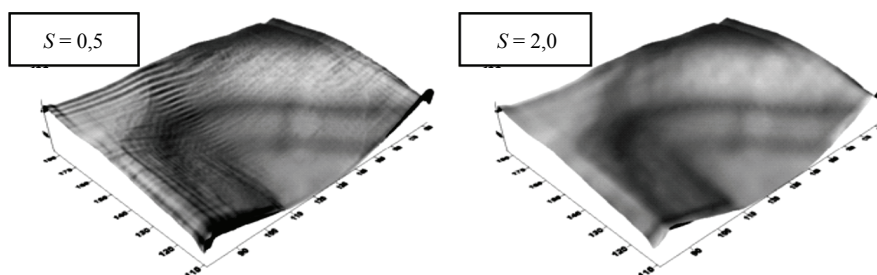
W omawianym przykładzie w celu porównania dokładności modelu wykorzystano cztery algorytmy interpolacyjne: wagowanie odwrotnością kwadratu odległości (1r2), kriging (kr), aproksymacja płaszczyzn lokalnych (apl) i wielomian lokalny (wl) [6, 4]. Modele terenu utworzone przez poszczególne algorytmy pokazano na rys. 6.



Rys. 6. DTM utworzony przez różne algorytmy interpolacyjne
Fig. 6. DTM generated using different interpolation algorithms

Ponieważ każdy z algorytmów charakteryzuje się innymi parametrami interpolacji, wygenerowane modele powierzchni różnią się od siebie. Każdy z algorytmów tworzy charakterystyczne zniekształcenia generowanej powierzchni. Powoduje to różnice w jakości modeli, jak również w interpolacji warstw wysokościowych (rys. 6).

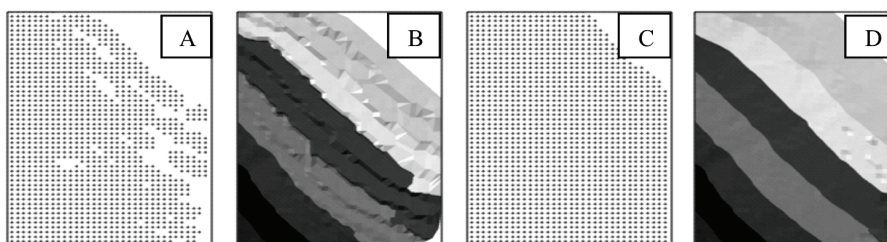
Podczas ustalania parametrów konstrukcyjnych siatki kwadratów kluczowe znaczenie ma odpowiedni dobór jej rozdzielczości. Wielkość boku kwadratu bazowego ustalana jest w zależności od zagęszczenia punktów pomiarowych, właściwości morfologicznych mierzonego terenu oraz przyjętej dokładności opracowania [8]. Z reguły jest ona wielkością stałą dla całego obszaru opracowania. W celu przeanalizowania wpływu rozdzielczości siatki na dokładność modelu w omawianym przykładzie przebadano cztery wielkości kwadratu bazowego: $S = 0,5$ m, 1 m, 2 m i 5 m.



Rys. 7. DTM dla różnej rozdzielczości siatki kwadratów
Fig. 7. DTM for different squares GRID resolution

Dobór wielkości siatki ma zasadniczy wpływ na dokładność modelu, jednak nie zawsze większa rozdzielczość powoduje polepszenie jakości DTM. Modele terenu wygenerowane algorytmem kriging przy różnej rozdzielczości siatki pokazano na rys. 7.

Istotnym czynnikiem mającym wpływ na jakość modelu jest również odpowiedni dobór punktów do interpolacji. W zależności od przyjętego promienia poszukiwań punktów pomiarowych wokół węzłów tworzona siatka może być kompletna lub nie.

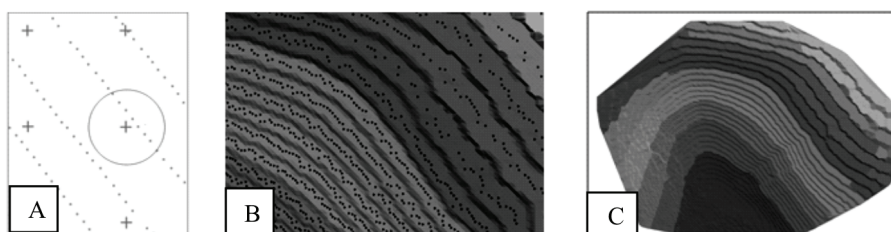


Rys. 8. Model terenu dla różnego promienia poszukiwań punktów
Fig. 8. Terrain model for different points search radius

Na rysunku 8 przedstawiono fragment analizowanej powierzchni, gdzie dla algorytmu (apl) przy promieniu poszukiwań $R = 2$ m siatka jest niekompletna (rys. 8A). Ten sam algorytm przy promieniu $R = 6$ m generuje siatkę kompletną (rys. 8C). Obok pokazano modele terenu utworzone na podstawie obu siatek (rys. 8B i D), gdzie widoczne są wyraźne różnice w jakości modelu powierzchni dla tego samego obszaru.

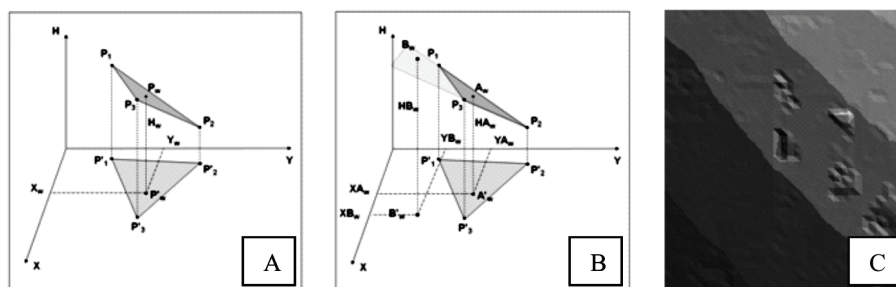
Dodatkowym mankamentem ustalenia zbyt małego promienia poszukiwań jest uzależnienie wyników interpolacji wyłącznie od punktów pomiarowych leżących blisko węzła (rys. 9A). Ponieważ dane pozyskiwane ze skanera charakteryzują się liniowym usytuowa-

niem punktów pomiarowych, węzły interpolowane są wtedy dla grupy punktów o podobnej wysokości (rys. 9B) i w efekcie model powierzchni jest niedokładny (rys. 9C).



Rys. 9. Model terenu dla niewłaściwego promienia poszukiwań punktów
Fig. 9. Terrain model for inappropriate points search radius

Liniowy układ punktów pomiarowych (charakterystyczny przy skaningu laserowym) przy ich nieprawidłowym doborze może prowadzić do ekstrapolacji wartości w węzle. Na rysunku 10A pokazano przykład prawidłowej lokalizacji punktów pomiarowych wokół węzła, natomiast na rys. 10B zilustrowano przypadek ekstrapolacji. Podczas generowania DTM ekstrapolacja skutkuje lokalnymi zniekształceniami modelu (rys. 10C).

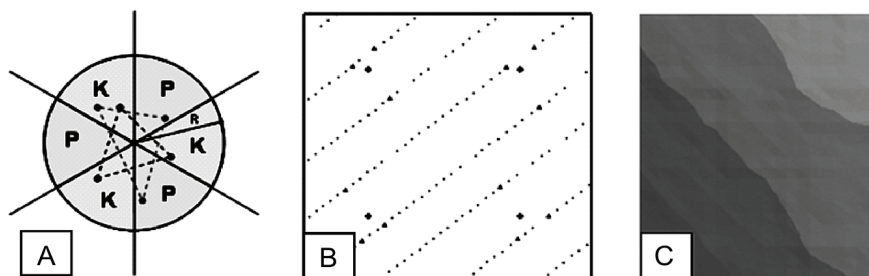


Rys. 10. Przykład ekstrapolacji wartości w punktach węzłowych
Fig. 10. Examples of extrapolation of values in nodal points

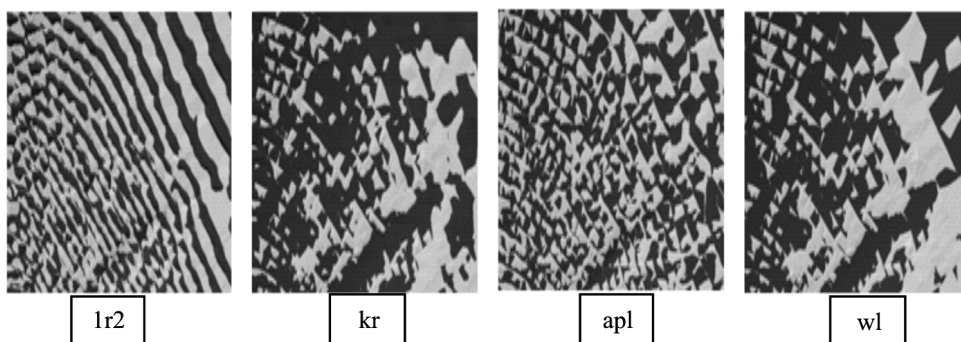
W celu uniknięcia przypadków ekstrapolacji przestrzeń poszukiwań wokół węzła może zostać podzielona na sektory, w których następuje wyszukanie punktów w określonej odległości R od węzła (rys. 11A). Tak zlokalizowane punkty powinny otaczać węzeł, tworząc figurę opisującą. Pozwala to na prawidłową lokalizację punktów pomiarowych, które mogą leżeć w sąsiednich pasach skanowania (rys. 11B). W rezultacie uzyskuje się znaczącą poprawę jakości modelu (rys. 11C).

Porównania dokładności modeli terenu utworzonych przez różne algorytmy interpolacyjne można dokonać za pomocą diagramów różnicowych (rys. 12). Na prezentowanych diagramach pokazano różnice pomiędzy modelem TIN, utworzonym na podstawie punktów pomiarowych, a modelami GRID wygenerowanymi przez poszczególne algorytmy interpolacyjne dla boku siatki wynoszącego 1 m.

Diagramy ilustrują wyraźnie różnice w jakości modeli utworzonych przez poszczególne algorytmy interpolacji. Za pomocą takich diagramów można również przeanalizować charakterystyczne zniekształcenia powodowane przez dany algorytm interpolacyjny i wybrać najkorzystniejszy wariant dla danej morfologii terenu.



Rys. 11. Model terenu przy właściwej lokalizacji punktów pomiarowych
 Fig. 11. Terrain model in case of appropriate positioning of measurement points



Rys. 12. Modele różnicowe dla poszczególnych algorytmów
 Fig. 12. Differential models for individual algorithms

Modele typu GRID mogą być używane do przeprowadzenia analiz zmian powierzchni w czasie. Pozwalają one na porównanie modeli utworzonych na podstawie różnych sesji pomiarowych wykonanych w różnym czasie i przy różnej rozdzielczości skanowania. Jednak aby takie porównania były miarodajne, należy zwracać uwagę na sposób budowy numerycznych modeli terenu i eliminować wymienione zakłócenia powodowane nieodpowiednim doбором parametrów konstrukcyjnych.

5. Wnioski

Stosowanie nowoczesnych technologii do pomiaru rzeźby terenu, w których rejestracja punktów przebiega automatycznie, w sposób znaczący zmniejsza czasochłonność prac polowych. Należy jednak zwrócić uwagę na problemy pojawiające się przy opracowywaniu wyników pomiaru. W szczególności dotyczy to dużej liczby punktów pomiarowych oraz ich niekorzystnego układu przestrzennego rejestrowanych punktów w zadaniach interpolacji. Autorzy artykułu przeanalizowali rozwiązania tworzenia numerycznego modelu terenu z zastosowaniem różnych parametrów. Jak się okazuje, zasadnicze czynniki mające wpływ na wynik przetwarzania danych takiej struktury to dobór punktów w procesie interpolacji oraz efektywny algorytm.

Literatura

- [1] Bojarowski K., Gościewski D., Szacherska M.K., *Wizualizacja zmian ukształtowania dna morskiego jako etap modelowania procesów w systemach przestrzennych*, Materiały XII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Rola nawigacji w zabezpieczeniu działalności ludzkiej na morzu”, Gdynia 2000.
- [2] Carlisle B.H., *Digital Elevation Model Quality and Uncertainty in DEM-based Spatial Modelling*, Ph.D. Thesis, University of Greenwich, London, UK 2002.
- [3] Gościewski D., *Optymalizacja struktury i wielkości zbiorów obserwacji wykorzystywanych do tworzenia numerycznego modelu dna*, Materiały XIII Konferencji Naukowo-Technicznej „Rola nawigacji w zabezpieczaniu działalności ludzkiej na morzu”, Gdynia 2002.
- [4] Gościewski D., *Tworzenie numerycznego modelu terenu typu GRID z wykorzystaniem kombinacji algorytmów interpolacyjnych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 114, „Geoinformacja dla wszystkich”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [5] Hutchinson M.F., Gallant J.C., *Digital elevation models and representation of terrain shape*, Terrain Analysis, Principles and Applications, John Wiley and Sons, New York 2000.
- [6] Pitas I., *Digital Image Processing Algorithms and Applications*, John Wiley and Sons, New York 2000.
- [7] Kurczyński Z., *Technologiczne uwarunkowania budowy numerycznego modelu rzeźby terenu*, Prace IGiK, Warszawa 1999.
- [8] Sulebak J.R., *Applications of Digital Elevation Models*, Department of Geographic Information Technology, SINTEF Applied Mathematics, Oslo, Norway 2000.