

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Dariusz Gościewski

**Wpływ rozmieszczenia punktów pomiarowych
na generowanie regularnej siatki typu GRID**

Słowa kluczowe: numeryczny model terenu, siatka regularna, redukcja ilości punktów

Numeryczne modele terenu są tworzone coraz częściej na bazie danych rejestrowanych w sposób automatyczny. W procesie przetwarzania takich zbiorów, często zachodzi potrzeba uporządkowania wielkości mierzonych i przedstawienia ich w postaci określonej struktury GRID lub TIN. Istotnym czynnikiem mającym wpływ na dokładność modelu terenu jest prawidłowe ustalenie kryteriów przetwarzania oraz odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych danej struktury. W artykule przeanalizowano wpływ rozmieszczenia punktów pomiarowych na dobór parametrów konstrukcyjnych regularnej siatki kwadratów przy tworzeniu numerycznego modelu dna.

**Effects of Measuring Point Distribution
on the Generation of a Regular GRID**

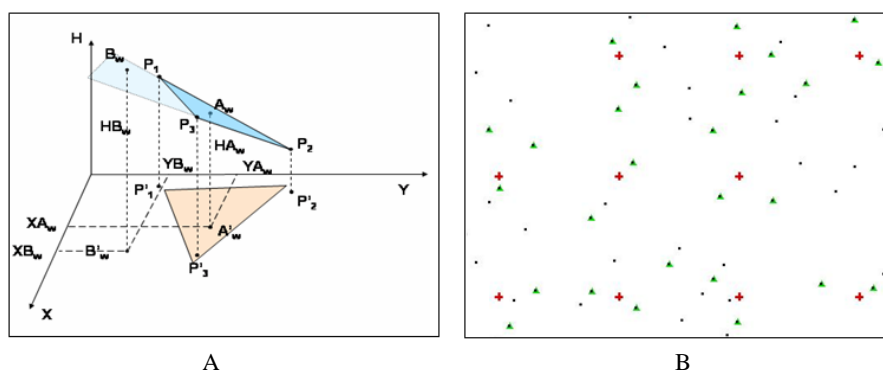
Key words: digital terrain model, regular grid, reduction of the number of points

Digital terrain models are often generated on the basis of data recorded automatically. If such sets are to be processed, the measured quantities must be ordered and represented as a GRID or TIN structure. Terrain model accuracy depends on establishing appropriate processing criteria and proper selection of design parameters of a given structure. The effects of measuring points distribution on the selection of design parameters of a regular square grid for the purpose of generating a digital bottom model have been analysed in the paper.

Numeryczny model terenu (DTM) jest obecnie niezbędnym elementem systemów informacji o terenie (SIT, GIS) [1, 7]. Pozwala on na wygenerowanie i wizualizację określonej powierzchni terenu czy dna morskiego. Rola systemów informacji o terenie nie sprowadza się jednak do numerycznej reprezentacji powierzchni. Istotną zaletą systemów informacji jest możliwość przeprowadzania wszechstronnych analiz ilościowych i jakościowych [7, 8]. Wśród wymagań stawianych przez użytkowników tych systemów, oprócz dokładności i wiarygodności otrzymywanych wyników, szczególny nacisk kładzie się również na dynamikę przetwarzania informacji oraz możliwości analiz porównawczych w czasie rzeczywistym. Realizacja tych zadań wymaga często wstępnego przygotowania danych w celu odpowiedniego i ekonomicznego przetworzenia ich przez system informacji. Najbardziej wiarygodne i dokładne dane, zasilające systemy informacji, pochodzą z pomiarów bezpośrednich. Współczesne urządzenia pomiarowe (skaner lotniczy, sondy wielowiązkowe, laserowe stacje pomiarowe) pozwalają na automatyczną rejestrację dużej ilości danych w stosunkowo krótkim czasie [2, 5, 8]. Rejestrowana w taki sposób informacja jest jednak zazwyczaj nieuporządkowana, a sekwencyjny sposób jej archiwizacji dodatkowo utrudnia przetwarzanie i analizę [5]. Sytuacja taka sprawia, że danych pomiarowych najczęściej nie wykorzystuje się bezpośrednio. Do reprezentacji numerycznej modeli powierzchniowych w systemach informacji są wykorzystywane struktury TIN lub GRID [1, 2]. Zaletą pierwszej z nich jest konstrukcja modelu oparta bezpośrednio na punktach pomiarowych. Takie założenie pozwala na utworzenie nieregularnej siatki trójkątów, na której opiera się generowanie modelu powierzchni. Ponieważ punkty tworzące model w tym przypadku są rozmieszczone nieregularnie, korzystniejszy do analiz jest model oparty na strukturze GRID. Reprezentacja powierzchni przez strukturę GRID wymaga interpolacji wartości w punktach węzłowych tworzących regularną siatkę kwadratów, równomiernie pokrywającą dany obszar pomiarowy. Dzięki temu możliwa jest znaczna redukcja ilości punktów pomiarowych oraz wszechstronne analizy porównawcze tych samych elementów powierzchni w różnych epokach pomiarowych [5, 6, 8]. Dodatkowo uproszczone zostają również algorytmy kompresji i archiwizacji zbiorów, co daje większą dynamikę przetwarzania danych [3, 4].

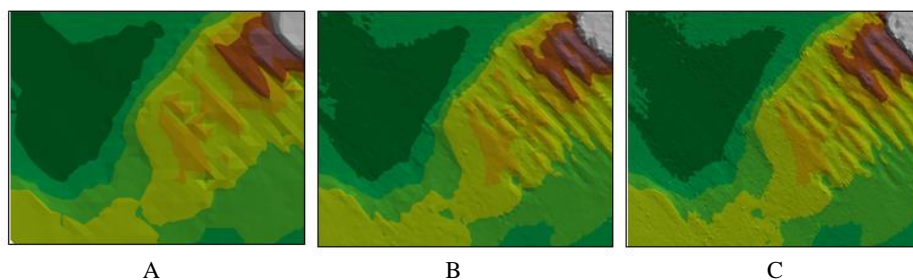
Istotnym zagadnieniem przy tworzeniu siatki typu GRID jest odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych. W zależności od zagęszczenia punktów pomiarowych i morfologii terenu tworzona siatka kwadratów powinna zapewniać odpowiednią dokładność modelu. Interpolacja wartości w punkcie węzłowym na podstawie otaczających węzeł punktów pomiarowych może być przeprowadzona różnymi metodami [3, 4, 6]. Dokładność wyznaczenia tej wartości zależy w głównej mierze od rozmieszczenia i odległości punktów pomiarowych od węzła. W pełni wiarygodne wyniki interpolacji są otrzymywane wówczas,

gdy punkty, na podstawie których jest wyliczana wartość w węźle, spełniają określone kryterium. Powinny one leżeć w założonym promieniu poszukiwań, najbliższym punktu węzłowego i jednocześnie tworzyć trójkąt opisujący z węzłem w środku. Takie założenie eliminuje przypadki ekstrapolacji wartości w punkcie węzłowym oraz pozwala na jej wyznaczenie w sposób ścisły (rys. 1A). Na rysunku 1B pokazano wybrane punkty pomiarowe biorące udział w interpolacji wartości w określonych punktach węzłowych.



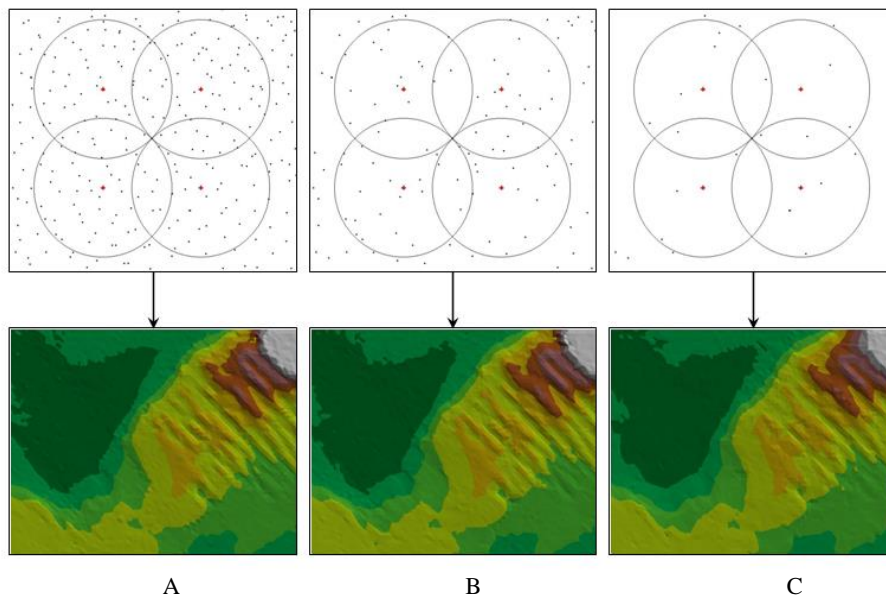
Rys. 1. Kryteria konstrukcji siatki kwadratów GRID
 Fig. 1. Design criteria for a GRID

Odległości między węzłami tworzącymi model terenu zależą w głównej mierze od ilości punktów pomiarowych przypadających na jednostkę powierzchni. Jeżeli dysponujemy dużym zagęszczeniem punktów pomiarowych (jak ma to miejsce w przypadku danych pomiarowych pochodzących z echosondy wielowiązkowej), odległości te mogą być małe, co pozwala na podniesienie dokładności modelu. Rysunek 2 przedstawia ten sam fragment powierzchni dna morskiego wygenerowany dla różnego zagęszczenia punktów węzłowych (A – 5 m, B – 2 m, C – 1 m).



Rys. 2. Modele dna utworzone przy różnych zagęszczeniach punktów węzłowych
 Fig. 2. Bottom models generated for different nodal point densifications

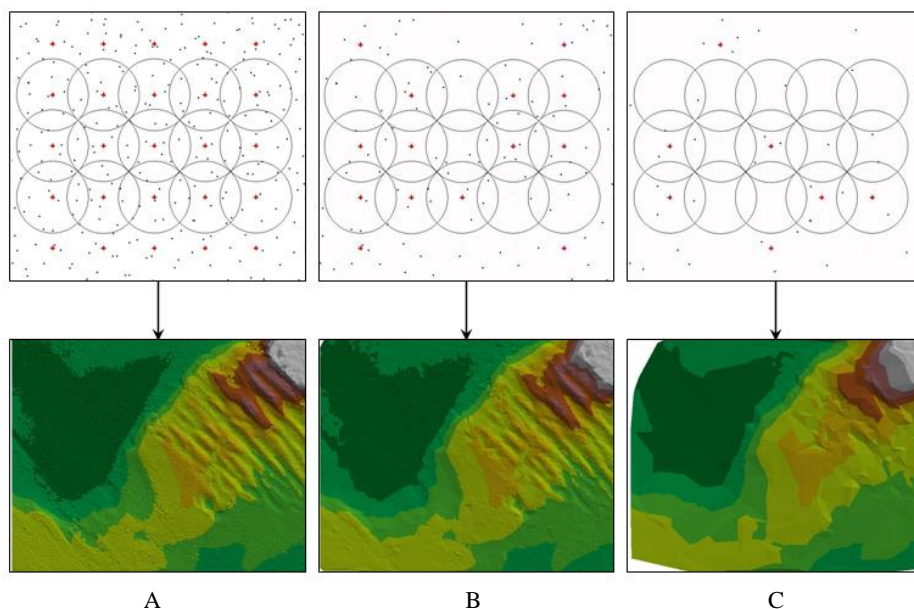
Ze względu na bezpośredni wpływ zagęszczenia węzłów na dokładność tworzonego modelu, kluczowym parametrem konstrukcyjnym siatki GRID jest odpowiednio dobrany odstęp między punktami tworzącymi. Większe zagęszczenie punktów tworzących model powierzchni powinno prowadzić do podniesienia dokładności modelu. Automatyzacja przetwarzania danych pomiarowych w algorytmach interpolacyjnych nie zawsze jednak pozwala na podniesienie tej dokładności. W większości algorytmów odległość między punktami węzłowymi decyduje o wielkości promienia poszukiwań punktów pomiarowych wokół węzła. Zakładając przeanalizowanie pełnego spektrum pomiarowego, przyjmuje się najczęściej promień poszukiwań równy połowie przekątnej kwadratu tworzącego siatkę. Przy poprawnym doborze odstępów między węzłami takie założenie pozwala na prawidłową interpolację wartości dla różnego zagęszczenia punktów pomiarowych. Na rysunku 3 przedstawiono modele dna utworzone według opisanych zasad. Przy założonym małym zagęszczeniu punktów węzłowych, odpowiednie układy (punkty pomiarowe znajdują się w narożnikach trójkątów opisujących z węzłami w środku) zostają odnalezione dla każdego zagęszczenia punktów pomiarowych. Pozwala to na prawidłową interpolację wartości w węzłach dla większości przypadków, a ilość punktów węzłowych wystarcza do wygenerowania dokładnego modelu.



Rys. 3. Małe zagęszczenie punktów węzłowych dla różnego zagęszczenia punktów pomiarowych
Fig. 3. Low densification of nodal points for different densifications of measuring points

Wygenerowane na podstawie tak obliczonych punktów węzłowych modele powierzchni są podobne zarówno dla dużego zagęszczenia punktów pomiarowych (rys. 3A), średniego zagęszczenia (rys. 3B) i małego zagęszczenia (rys. 3C). Ponadto modele te charakteryzują się podobną dokładnością zarówno dla obszarów mało jak i mocno zróżnicowanych morfologicznie.

Stosowanie tej samej zasady poszukiwania punktów wokół węzła (promień poszukiwań jest równy połowie przekątnej kwadratu tworzącego siatkę), w sytuacji gdy parametr odległości między węzłami zostanie dobrane nieprawidłowo w stosunku do zagęszczenia punktów pomiarowych, może prowadzić do ograniczenia ilości odnajdywanych punktów. W rezultacie następuje pogorszenie tworzonego modelu powierzchni, mimo zastosowania większego zagęszczenia punktów węzłowych. Modele dna utworzone na bazie punktów węzłowych o dużym zagęszczeniu, przy różnym zagęszczeniu punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 4.

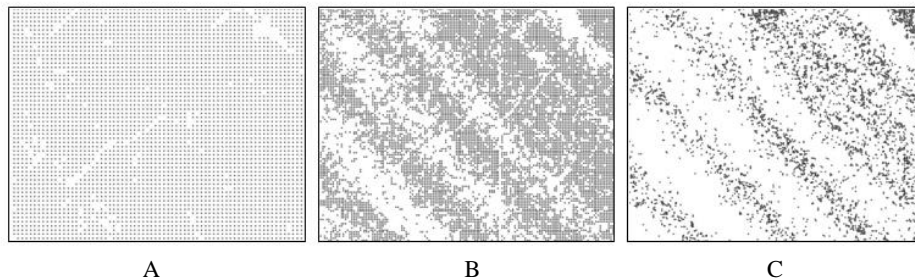


Rys. 4. Duże zagęszczenie punktów węzłowych dla różnego zagęszczenia punktów pomiarowych
Fig. 4. High densification of nodal points for different densifications of measuring points

W przypadku dużego zagęszczenia punktów pomiarowych można przeprowadzić interpolację (opierając się na odnalezionych trzech punktach opisujących) dla większości punktów węzłowych (rys. 4A). W sytuacji średniego zagęszczenia punktów pomiarowych ilość węzłów zmniejsza się i w rezultacie model dna jest mniej dokładny (rys. 4B). Ostatni przykład ilustruje sytuację,

w której z powodu małego zagęszczenia punktów pomiarowych, zostało wyznaczonych niewiele wartości w punktach węzłowych (rys. 4C). Model dna utworzony na bazie takiej ilości węzłów jest wyraźnie mniej dokładny, zwłaszcza dla obszarów zróżnicowanych morfologicznie.

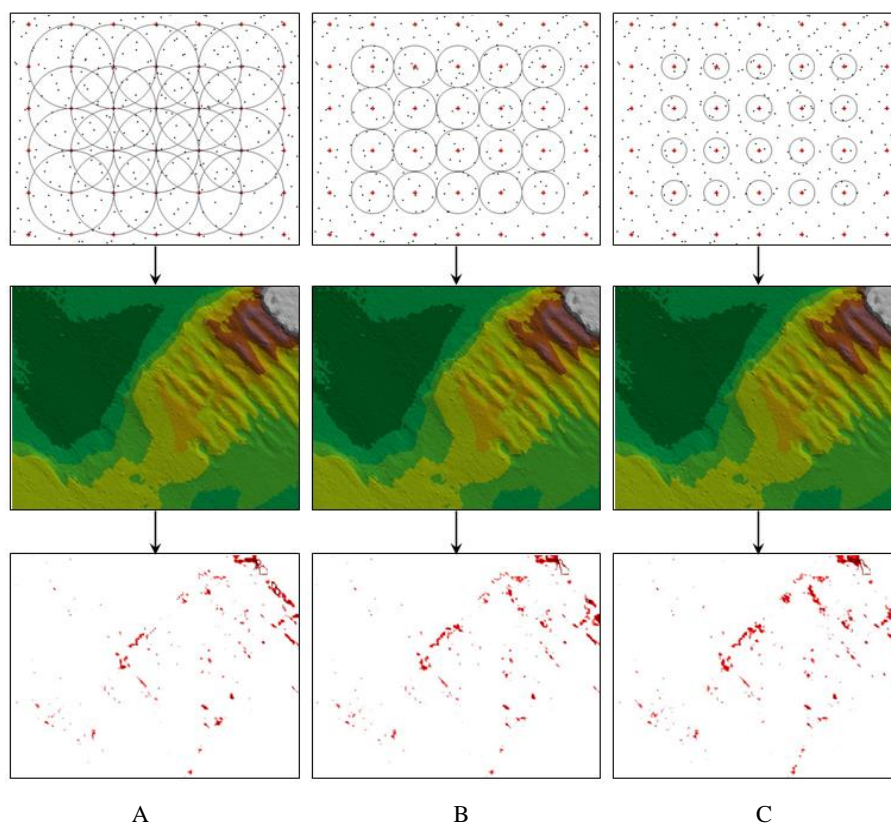
Zastosowanie kryterium, w którym promień poszukiwań jest równy połowie przekątnej kwadratu tworzącego siatkę, prowadzi do sytuacji, gdzie zagęszczenie odnajdywanych węzłów zależy od zagęszczenia punktów pomiarowych. Jeżeli punkty pomiarowe nierównomiernie pokrywają obszar (np. większe zagęszczenie punktów występuje w pasach zdublowanego pomiaru), również rozmieszczenie punktów węzłowych charakteryzuje się różnym zagęszczeniem. Rysunek 5 ilustruje rozmieszczenie punktów węzłowych o różnym odstępzie dla tego samego, nierównomiernego zagęszczenia punktów pomiarowych. Równomierne rozmieszczenie punktów węzłowych na analizowanej powierzchni możliwe jest do uzyskania jedynie przy stosunkowo małym ich zagęszczeniu (odstęp 5 m) (rys. 5A). Przy odstępzie wynoszącym 2 m pojawiają się wyraźne przerwy w rozmieszczeniu punktów węzłowych (rys. 5B). Zmniejszenie odstępów między węzłami do 1 m powoduje wyeliminowanie większości z nich, co praktycznie uniemożliwia utworzenie na takiej bazie prawidłowego modelu powierzchni (rys. 5C).



Rys. 5. Punkty węzłowe odnalezione przy nierównomiernym zagęszczeniu punktów pomiarowych
Fig. 5. Nodal points found for uneven densification of measuring points

W celu podniesienia dokładności modelu powierzchni należy zastosować taki promień poszukiwań punktów pomiarowych wokół węzła, który jest niezależny od odległości między węzłami. Dodatkowo, w przypadku dużego zagęszczenia punktów pomiarowych, odpowiedni dobór promienia poszukiwań ogranicza czas przeszukiwania zbiorów, co znacznie przyspiesza proces przetwarzania danych. Na rysunku 6 przedstawiono modele dna utworzone na podstawie węzłów obliczonych z zastosowaniem różnego promienia poszukiwań. Porównanie tak utworzonych modeli z wzorcowym modelem powierzchni (utworzonym na bazie maksymalnego zagęszczenia punktów pomiarowych), pozwoliło graficznie

pokazać różnice (przekraczające 0,2 m) w wartościach obliczonych na poszczególnych punktach węzłowych. W pierwszym przykładzie promień poszukiwań jest równy odstępom węzłów (rys. 6A), co prowadzi do sytuacji, w której do obliczenia wartości w sąsiednich węzłach mogą być wykorzystywane te same punkty pomiarowe. Ponieważ zagęszczenie punktów pomiarowych w tym przypadku jest duże, zabieg taki nie zwiększa dokładności, a jedynie wydłuża czas obliczeń. W kolejnych przykładach promień poszukiwań został ograniczony do 1/2 odstępów między węzłami (rys. 6B), a następnie do 1/4 odstępów między węzłami (rys. 6C). W tych przypadkach przetwarzanie nie obejmuje wszystkich punktów pomiarowych, a jedynie te które leżą w pobliżu węzła. Wygenerowane w ten sposób modele dna oraz ich dokładność są zbliżone.

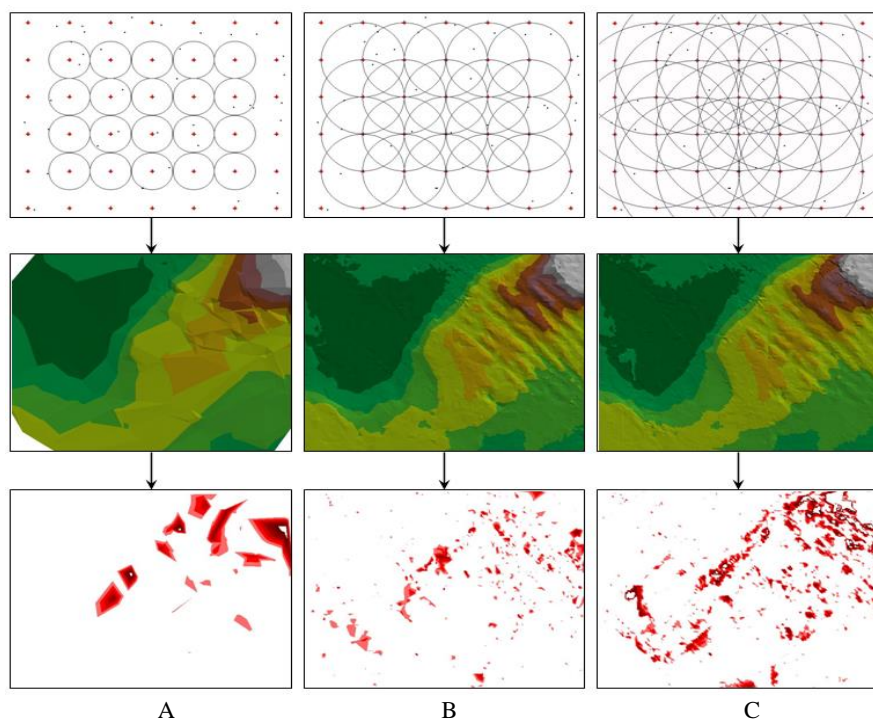


Rys. 6. Modele dna utworzone przy dużym zagęszczeniu punktów pomiarowych dla malejących promieni poszukiwań

Fig. 6. Bottom models generated for high measuring point densification at decreasing search radiuses

Zauważalna jest jedynie niewielka tendencja pogarszania dokładności w miarę ograniczania promienia poszukiwań. Nie wpływa to jednak znacząco na jakość tworzonych modeli powierzchni. We wszystkich przypadkach mniejsze dokładności (większe różnice w porównaniu z modelem wzorcowym) występują na obszarach bardziej zróżnicowanych morfologicznie.

Odstąpienie od zasady zależności doboru promienia poszukiwań od odległości między węzłami jest szczególnie korzystne w sytuacji małego zagęszczenia punktów pomiarowych. Zwiększenie promienia poszukiwań w takich przypadkach pozwala znacząco podnieść dokładność generowanych modeli powierzchni. Rysunek 7 ilustruje sytuację, w której w celu odnalezienia większej ilości punktów pomiarowych, sukcesywnie zwiększany jest promień poszukiwań. W pierwszym przykładzie, gdzie promień poszukiwań jest równy połowie odległości między węzłami, ilość węzłów z prawidłowo obliczoną wartością jest znikoma. Sytuacja ta nie pozwala na wygenerowanie dokładnego modelu dna (rys. 7A). Niską dokładność potwierdza również zamieszczony poniżej diagram różnic wartości obliczonych pomiędzy tym modelem, a modelem wzorcowym.

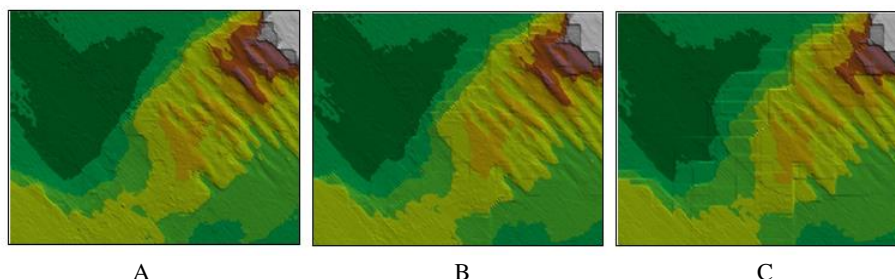


Rys. 7. Modele dna utworzone przy małym zagęszczeniu punktów pomiarowych dla rosnących promieni poszukiwań

Fig. 7. Bottom models generated for low measuring point densification at increasing search radiuses

Po zwiększeniu promienia poszukiwań do wartości równej odstępom węzłów (rys. 7B), sytuacja uległa radykalnej poprawie. Ilość odnalezionych punktów pomiarowych wokół węzłów znacznie wzrosła, co pozwoliło utworzyć dokładniejszy model powierzchni. Diagram różnic zamieszczony poniżej porównywalny jest do diagramu z rysunku 6C, gdzie zagęszczenie punktów pomiarowych było znacznie większe. Kolejne zwiększenie promienia poszukiwań (do wartości równej podwójnej odległości między węzłami) pozwoliło na wygenerowanie podobnej ilości punktów węzłowych, jak w przypadku B i utworzenie na ich podstawie przedstawionego poniżej modelu dna (rys. 7C). W tym przypadku jednak zauważalne są zniekształcenia modelu, wynikające z przyjęcia do interpolacji zbyt oddalonych punktów pomiarowych. Różnice pomiędzy danym modelem, a modelem wzorcowym zostały pokazane na diagramie poniżej. Wyraźnie zauważalna jest zależność pomiędzy morfologią badanej powierzchni, a wielkością i ilością błędów modelu. Znacznie więcej błędów występuje na obszarach zróżnicowanych morfologicznie. W ostatnim przypadku również na obszarach mało zróżnicowanych morfologicznie zauważalne są zniekształcenia, spowodowane zbyt dużym oddaleniem punktów pomiarowych od punktu węzłowego. Ponieważ liczba punktów pomiarowych jest tu stosunkowo mała, zwiększenie promienia poszukiwań i wielokrotne przeszukiwanie tych samych obszarów nie wydłuża znacząco procesu obliczeniowego.

Zbiory danych pomiarowych rejestrowanych i archiwizowanych w sposób sekwencyjny zawierają dużo zdublowanych obszarów pomiarowych. Przetwarzanie takich danych przy zbyt dużym promieniu poszukiwań, skutkuje dodatkowo tworzeniem modeli powierzchni, w których wyraźnie są zaznaczone podobszary o skokowej różnicy wartości w punktach węzłowych. Modele powierzchni obarczone tym defektem przedstawiono na rysunku 8. Kolejne przykłady dotyczą promienia równego pięciokrotnej odległości między węzłami (rys. 8A), dziesięciokrotnej odległości między węzłami (rys. 8B) i dwudziestokrotnej odległości między węzłami (rys. 8C).



Rys. 8. Podobszary o skokowej różnicy wysokości
Fig. 8. Subregions with significant height differences

W przypadku modeli powierzchni tworzonych z wykorzystaniem struktury GRID istotnym czynnikiem, mającym zasadniczy wpływ na dokładność opraco-

wania, jest prawidłowe ustalenie kryteriów przetwarzania oraz odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych siatki kwadratów. Należy zwrócić szczególną uwagę na prawidłowy dobór zagęszczenia węzłów w stosunku do zagęszczenia punktów pomiarowych. Warto pamiętać, że o dokładności modelu powierzchni nie decyduje wyłącznie zagęszczenie punktów tworzących model. Równie ważnym czynnikiem jest dobór odpowiednich algorytmów obliczeniowych, które pozwalają na dokładne dostosowanie parametrów przetwarzania do określonego zagęszczenia punktów.

Literatura

1. Ackermann F., *Techniques and Strategies for DEM Generation*. An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ASPRS 1996.
2. Bojarowski K., Gościewski D., *Some concepts of processing big spatial data sets*, Biuletyn Naukowy UWM, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2003.
3. Douglas D.M., Peucker T.K., *Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature*, Canadian Cartographer 1973.
4. Gościewski D., *System GRID v.3.0*, Instytut Geodezji UWM, Olsztyn 2003.
5. Gościewski D., *Optymalizacja struktury i wielkości zbiorów obserwacji wykorzystywanych do tworzenia numerycznego modelu dna*, XIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Rola nawigacji w zabezpieczaniu działalności ludzkiej na morzu”, Gdynia – Oksywie 2002.
6. Gościewski D., *Dobór parametrów przetwarzania zbiorów obserwacji przy tworzeniu numerycznego modelu terenu*, X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Inżynieria Ruchu Morskiego”, Szczecin 2003.
7. Maguire D.J., Goodchild M.F., Rhind D., *Geographical Information Systems*, London 1991.
8. Parker D., *Innovations in GIS*, University of Newcastle, Newcastle 1996.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzent

prof. dr hab. inż. Józef Sanecki

Adres Autora

dr inż. Dariusz Gościewski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Instytut Geodezji
ul. Heweliusza 12, 10-957 Olsztyn
tel. (0-89) 523 35 82, e-mail: chillis@uwm.edu.pl