



Katarzyna Osińska-Skotak^{*}, Janina Zaczek-Peplinska^{}**

**PROBLEMATYKA TWORZENIA NUMERYCZNEGO MODELU
TERENU NA PODSTAWIE POMIARÓW GEODEZYJNYCH
NA PRZYKŁADZIE WYDMY ŁĄCKIEJ**

**ASPECTS OF GENERATING OF DIGITAL TERRAIN MODEL
BASED ON SURVEY MEASUREMENTS
(ŁĄCKA DUNE EXAMPLE)**

- ^{*} *Politechnika Warszawska, Instytut Fotogrametrii i Kartografii
Warsaw University of Technology, Institute of Photogrammetry and Cartography*
- ^{**} *Politechnika Warszawska, Instytut Geodezji Gospodarczej
Warsaw University of Technology, Institute of Applied Geodesy*

STRESZCZENIE: Numeryczny model rzeźby terenu jest dla wielu zastosowań elementem kluczowym. Jego wykorzystanie, jak również nowe techniki prezentacji, dają szeroki wachlarz nowych możliwości np. dla potrzeb zarządzania i planowania przestrzennego. Jednak jakość uzyskiwanych, na podstawie pomiarów geodezyjnych, modeli rzeźby terenu zależy od szeregu elementów. Zarówno technologie pomiaru obiektu, jak i sposób ich opracowania determinuje jakość uzyskanego na tej podstawie numerycznego modelu rzeźby terenu. Rozmieszczenie punktów pomiarowych (pikiet) lub krok siatki pomiarowej jak również stosowane algorytmy interpolacyjne mają kluczowe znaczenie dla rezultatu końcowego. Dla jednego obiektu można uzyskać różne zobrazowania rzeźby terenu w zależności od sposobu wykonania samego pomiaru terenowego, jak i od przyjętych założeń dotyczących opracowania.

Decyzja o zastosowaniu konkretnej metody pomiarowej do monitorowania szybkozmiennych elementów krajobrazu powinna być poprzedzona analizą wpływu rozmieszczenia pikiet wysokościowych na uzyskane wyniki oraz doбором najlepszych metod interpolacji i wizualizacji zmian obiektu. Istotne jest to ze względu na jakość efektu końcowego, ale również ma to znaczenie dla zoptymalizowania kosztów przeprowadzanych kampanii pomiarowych co ma dużą wagę w szczególności przy planowaniu i realizacji okresowych pomiarów obiektów szybkozmiennych.

Niniejsze opracowanie zostało wykonane na podstawie prac testowych mających na celu ustalenie wpływu różnych elementów zarówno pomiarowych jak i obliczeniowych na uzyskiwany na podstawie pomiarów geodezyjnych numeryczny model rzeźby terenu. Prace przeprowadzono dla dwóch obszarów testowych o różnej charakterystyce.

SŁOWA KLUCZOWE: GIS, pomiary geodezyjne, DTM, Linear Rubber Sheeting, Nonlinear Rubber Sheeting

WSTĘP

Monitorowanie ruchu obiektów lub zjawisk szybkozmiennych wymaga przeprowadzania okresowo pomiarów położenia obiektów. Na ogół wykorzystywane są pomiary geodezyjne o różnej dokładności, dopasowanej do charakteru badanego obiektu lub zjawiska. Pomiary na obszarze Wydmy Łąckiej prowadzone są od początku lat 80-tych przez Koło Naukowe Geodetów Akademii Górniczo-Hutniczej oraz od 2000 roku przez Instytut Geodezji Gospodarczej Politechniki Warszawskiej. Badanie zmian elementów krajobrazu (np. wydmy) na terenach parków narodowych lub krajobrazowych ma istotne znaczenie m.in. dla planowania i zarządzania obszarami chronionymi. Dotyczy to głównie przeprowadzania tras turystycznych czy też projektowania ścieżek przyrodniczych. Coroczne zmiany położenia i kształtu wydmy wymagają okresowej aktualizacji przebiegu tras turystycznych, tak aby przy równoczesnej ochronie wydmy możliwe było podziwianie walorów krajobrazowych tego unikalnego w Europie terenu. Dotychczasowo stosowane metody prezentacji wyników pomiarów wydmy polegały na kreśleniu warstw i na podstawie tego rodzaju materiałów podejmowano decyzje i zarządzano infrastrukturą techniczną Parku. Obecne techniki umożliwiają nowe sposoby wizualizacji przeprowadzanych pomiarów, bardziej przydatne i wygodne dla potrzeb planowania przestrzennego. Przy wykorzystaniu nowoczesnych technik GIS-owych, po wygenerowaniu numerycznego modelu terenu na podstawie danych pomiarowych, możliwa jest między innymi prezentacja trójwymiarowa obiektów i zjawisk, co zdecydowanie ułatwia w tym przypadku proces wytyczania nowych szlaków. Monitorowanie zmian położenia i kształtu wydmy w czasie można również przedstawić w postaci trójwymiarowych powierzchni przenikających się wzajemnie, co umożliwia dokładniejsze badanie zachodzących zmian. Nakładanie zdjęć lotniczych czy satelitarnych lub innych warstw tematycznych na tak uzyskany obiekt trójwymiarowy również wspomaga służby planistyczne obszarów chronionych.

Jednak jakość uzyskiwanego modelu rzeźby terenu zależy od szeregu elementów, takich jak: technologia pomiaru obiektu, sposób ich opracowania, rozmieszczenie punktów pomiarowych (pikiet) lub krok siatki pomiarowej, stosowane algorytmy interpolacyjne itp. Wszystkie te elementy wpływają na kształt otrzymywanego numerycznego modelu. W zależności od sposobu wykonania samego pomiaru terenowego, jak i od przyjętych założeń dotyczących opracowania wyników można uzyskać różne zobrazowania rzeźby terenu, czasem dość istotnie różniących się od siebie.

Niniejsze opracowanie zostało wykonane na podstawie prac testowych mających na celu ustalenie wpływu m.in. kroku siatki pomiarowej, sposobu wykonania pomiaru oraz rozmieszczenia pikiet, jak również konstelacji satelitów GPS przy prowadzeniu pomiarów GPS RTK na numeryczny model rzeźby terenu otrzymywany na podstawie pomiarów geodezyjnych.

OBSZAR BADAŃ

Wydma Łącka leży środkowej części Mierzei Łebskiej w Słowińskim Parku Narodowym, jest to pierwsza z czterech „ruchomych wydmy” w tej części Parku. Ze względu na jej nieustanne przemieszczanie prowadzone są systematyczne pomiary mające na celu

wyznaczanie jej kształtu i tempa zmian. Kierunek wędrowki wydmy z roku na rok jest w przybliżeniu stały i związany z kierunkiem przeważających w tym rejonie wiatrów wschodnich. Na tempo zmian wpływa wiele czynników i w ciągu ostatnich 20 lat obserwowano różne wielkości przemieszczania się wydmy w ciągu roku.

Wydma Łącka znajduje się na terenie rezerwatu ścisłego „Wydmy ruchome” i odpowiednio opracowane wyniki prowadzonych pomiarów są jednym ze źródeł informacji o konieczności zmian przebiegu szlaku turystycznego i leśnych ścieżek technicznych.

Część badań związanych z zastosowaniem różnych technologii pomiarowych przeprowadzono również na polu testowym „GRYBÓW” położonym w miejscowości Grybów w Beskidzie Niskim.

POMIARY GEODEZYJNE OBIEKTÓW SZYBKOZMIENNYCH

Pomiary geodezyjne przeprowadzone zostały dwoma technikami. Zastosowano metodę tachimetryczną oraz pomiary techniką GPS RTK. Pomiar tachimetryczny wykonano przy użyciu tachimetru Leica TCR110 wyposażonego w celownik i dalmierz laserowy. Do pomiaru GPS wykorzystano natomiast zestaw dwóch odbiorników firmy Leica system 500 – SR520, wyposażonych w radiomodemy i anteny AT502. Pomiary te przeprowadzono w tym samym czasie (pomiar odległości wykonywano do tarczy umieszczonej na stałej wysokości na tyczce pomiarowej pod anteną GPS).

Na polu testowym w Grybowie pomiary wykonane zostały dla różnych siatek pomiarowych w różnych momentach czasu (przy różnych konstelacjach satelitów GPS). Eksperyment ten miał na celu sprawdzenie, czy przy różnych układach i liczbie satelitów uzyskuje się takie same wyniki pomiarów. Ze względu na to, że obiekt taki jak wydma zmienia swój kształt dość szybko, eksperyment wykonany został na terenie o „stabilnej” rzeźbie terenu.

Dokładność pomiarów tachimetrycznych oraz pomiarów GPS RTK oszacowano na 10 cm, co ze względu na charakter obiektu jest wielkością wystarczającą.

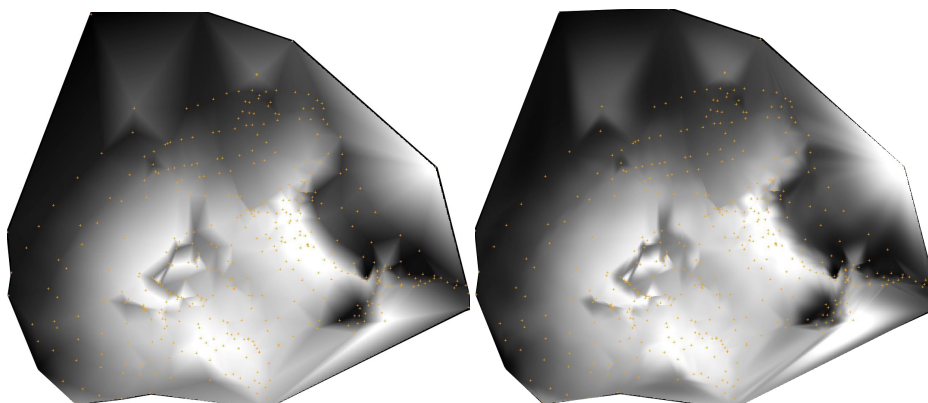
METODY INTERPOLACJI PRZESTRZENNEJ

Aby opracować numeryczny model rzeźby terenu na podstawie pomiarów geodezyjnych należy zastosować jeden z algorytmów interpolacyjnych. Istnieje szereg metod interpolacyjnych i mają one różne pochodzenie oraz zastosowania. Stosowane najczęściej w geodezji to te, których źródła sięgają nauk związanych z mechaniką. Ich stosowanie w przypadku naturalnej rzeźby terenu nie zawsze daje prawidłowy rezultat. W niniejszej pracy przetestowano metody interpolacji zawarte w systemie ERDAS Imagine: metodę interpolacji liniowej *Linear Rubber Sheeting* i nieliniowej *Nonlinear Rubber Sheeting*. Oba algorytmy stosowane są również przy procesie rektyfikacji zdjęć lotniczych i satelitarnych. Bazują one na idei sieci trójkątów TIN. Jest to szeroko stosowana technika interpolacji lokalnej w zastosowaniach geograficznych.

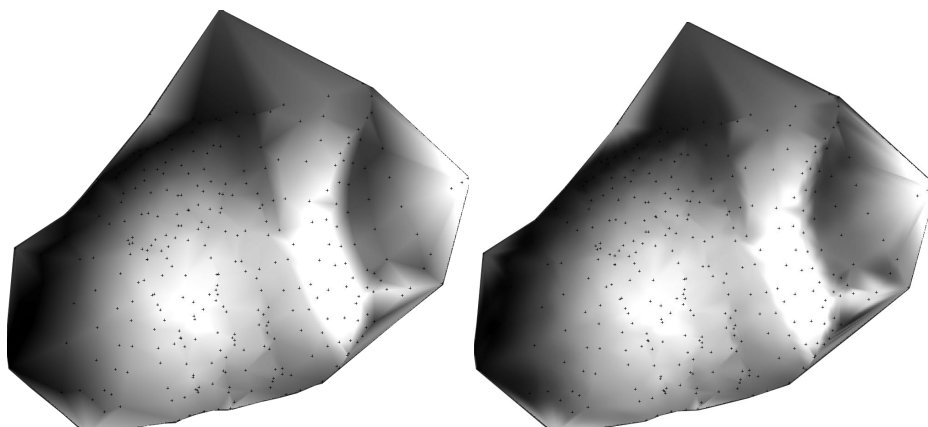
Interpolację metodą *Linear Rubber Sheeting* w przypadku rozważania dwóch współrzędnych wyraża wielomian pierwszego stopnia (Erdas Field Guide, 2002):

$$\begin{cases} x_o = a_0 + a_1x + a_2y \\ y_o = b_0 + b_1x + b_2y \end{cases} \quad (1)$$

Jest to metoda najprostsza i najszybsza do wykonania. Transformacja liniowa jest łatwa i szybka do wykonania ale przemiany zachodzące pomiędzy kolejnymi analizowanymi trójkątami nie zawsze są płynne. Autorzy „Erdas Field Guide” (2002) sugerują, że dla generowania rzeźby terenu powinno się stosować raczej transformacje nieliniowe. Aby wygładzić zmiany zachodzące na granicy poszczególnych trójkątów, powinno się stosować transformację nieliniową ze stopniem wielomianu wyższym niż jeden gdyż uwzględni się wówczas różny gradient informacji.



Rys. 1. Pomiar tachimetryczny – porównanie metod interpolacji liniowej i nieliniowej.
Fig. 1. Tachymetric survey – comparison of interpolation methods (linear and nonlinear)

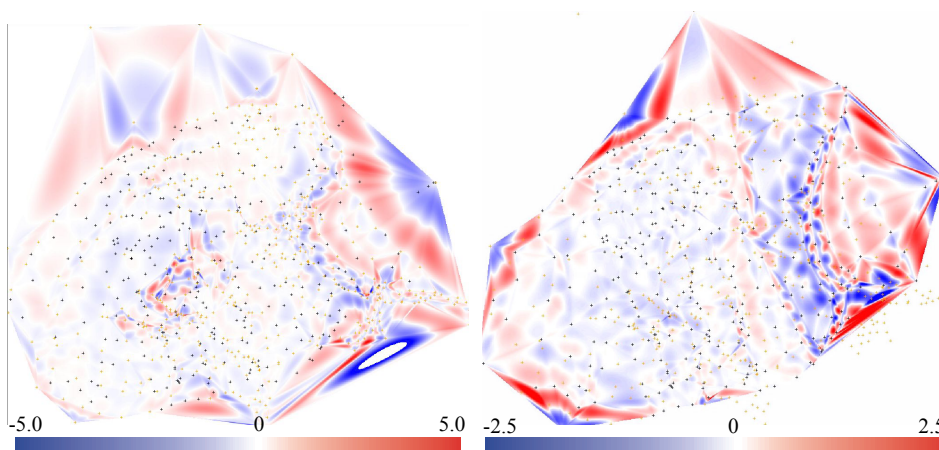


Rys. 2. Pomiar GPS – porównanie metod interpolacji liniowej i nieliniowej
Fig. 2. GPS measurement – comparison of interpolation methods (linear and nonlinear)

Interpolacja metodą *Nonlinear Rubber Sheeting* jest transformacją wielomianową piątego stopnia i wyraża się następującym wyrażeniem (ERDAS Field Guide, 2002) przy rozważaniu dwóch współrzędnych:

$$\begin{cases} x_0 = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^i a_k \cdot x^{i-j} \cdot y^j \\ y_0 = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^i b_k \cdot x^{i-j} \cdot y^j \end{cases} \quad (2)$$

Jest to funkcja gładka. W wyrażeniu inny sposób realizuje ona interpolację tam gdzie są największe gradienty, czyli w pobliżu skarpy. W tym miejscu można zauważyć największe różnice pomiędzy interpolacją liniową i nieliniową, co jest również widoczne na załączonych rysunkach (Rys. 1, 2 i 3).



Rys. 3. Wpływ metody interpolacji na uzyskany numeryczny model rzeźby terenu. Różnice między metodą interpolacji liniowej a metodą interpolacji nieliniowej dla pomiaru tachimetrycznego (po lewej) oraz w przypadku pomiaru GPS (po prawej)

Fig. 3. The influence of interpolation methods on DTM. Differences between linear and nonlinear Rubber sheeting interpolation methods for tachymetric survey (left figure) and for GPS measurement (right figure)

ANALIZA WYNIKÓW

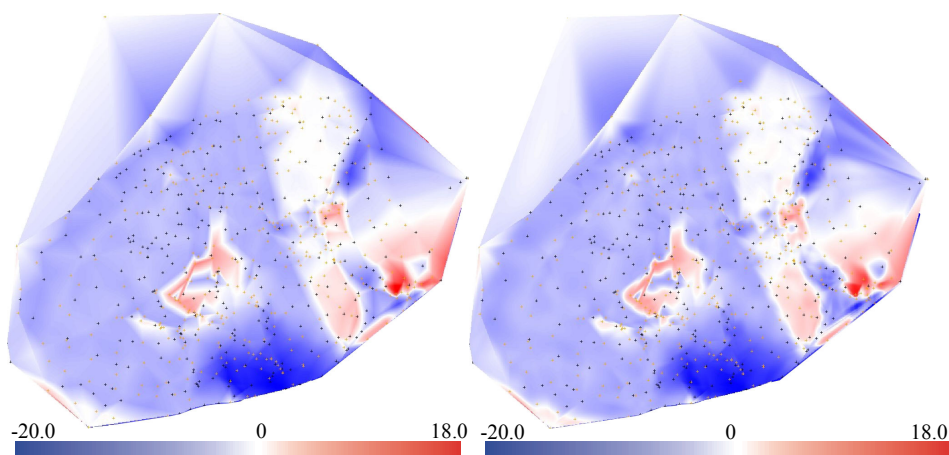
W pracy przetestowano wpływ różnych elementów na wynikowy numeryczny model rzeźby terenu. Analizie poddano zarówno metody pomiarowe, gęstość oczek siatki pomiarowej i rozmieszczenie pikiet a w przypadku techniki GPS także moment wykonywania pomiarów, jak również metody interpolacji przestrzennej.

W efekcie końcowym, po opracowaniu wyników pomiarów oraz przetestowaniu algorytmów interpolacyjnych okazało się, że wpływ układu satelitów w momencie wykonywania pomiarów jest praktycznie niezauważalny. Natomiast przyjęty krok siatki

pomiarowej ma pewne znaczenie dla otrzymanych wyników, ale zależy on od charakteru ukształtowania terenu. W przypadku obszarów o bardzo urozmaiconej rzeźbie terenu dobór kroku siatki ma większe znaczenie niż w przypadku terenów o „monotonnym” ukształtowaniu terenu. Okazało się jednak, że największy wpływ ma sposób wykonania pomiaru i rozłożenia pikiet oraz wybór metody interpolacji. Szczególnego znaczenia nabiera to w przypadku terenów o urozmaiconej rzeźbie terenu (np. wydmy), gdzie rozmieszczenie pikiet praktycznie decyduje o wyniku końcowym.

Wybór metody pomiarowej ze względu na pewne ograniczenia techniczne determinuje częściowo rozmieszczenie punktów pomiarowych. Przykładowo, pomiar GPS jest niemożliwy do wykonania u podnóża skarpy (np. w tzw. cieniu czoła wydmy) i w obszarach leśnych. Powoduje to niedokładne oddanie kształtu i położenia m.in. skarp. Z kolei pomiar tachimetryczny skupia się wokół stanowisk, w wyniku czego część obszaru jest gęściej pokryta punktami pomiarowymi niż pozostałe jego fragmenty. Odpowiednio wybrane miejsca stanowisk decydują tu o prawidłowym oddaniu rzeźby terenu i należy przywiązywać dużą wagę do tego zagadnienia. W niniejszym opracowaniu różnice wynikające z zastosowanej metody pomiaru na krawędziach wydmy sięgały nawet 18 m (Rys. 4). Różnice te są największe w pobliżu skarpy – czoła wydmy i wynikają z ograniczeń zastosowanych metod pomiarowych.

Analizując jedynie wizualnie kształt wydmy, można stwierdzić, że zdecydowanie bardziej naturalny kształt wydmy uzyskuje się przy wykorzystaniu metod interpolacji nieliniowej (Nonlinear Rubber Sheeting). Nie ma tu tak ostrych zmian i widocznych krawędzi trójkątów jak w przypadku metody interpolacji liniowej. W szczególności widoczne jest to w rejonie skarpy, czyli tam gdzie występuje duży gradient wysokości.



Rys. 4. Wpływ metody pomiarowej na uzyskany numeryczny model rzeźby terenu. Różnice uzyskane między pomiarem tachimetrycznym i GPS przy wykorzystaniu metod interpolacji liniowej (po lewej) oraz nieliniowej (po prawej)

Fig. 4. The influence of survey technique on DTM. Differences between tachymetric survey and GPS measurement for linear Rubber sheeting interpolation method (left figure) and for nonlinear Rubber sheeting interpolation method (right figure)

WNIOSKI

Decyzja o zastosowaniu konkretnej metody pomiarowej do monitorowania szybkozmiennych elementów krajobrazu (np. wydmy, osuwiska, hałdy przemysłowe) musi być poprzedzona analizą wpływu rozmieszczenia pikiet wysokościowych na uzyskane wyniki oraz doбором najlepszych metod interpolacji i wizualizacji zmian obiektu. Istotne to jest ze względu na jakość efektu końcowego, ale również ma to znaczenie dla zoptymalizowania kosztów przeprowadzanych kampanii pomiarowych co ma dużą wagę w szczególności przy planowaniu i realizacji okresowych pomiarów obiektów zmiennych.

W wyniku przeprowadzonych analiz okazało się, że nie można dać jednoznacznej odpowiedzi, która z testowanych metod pomiarowych powinna być stosowana przy pomiarach takich obiektów jak wydmy. Bardzo dużo zależy od sytuacji terenowej – ilości, gęstości i wysokości pokrywy roślinnej oraz od stopnia nachylenia skarp. Dla obiektów wydmych wydaje się, że lepsza do realizacji jest metoda GPS RTK. Na terenie odkrytym daje ona swobodę w wyborze lokalizacji pikiet co ma duże znaczenie na uzyskany w końcowej fazie opracowania numeryczny model terenu. Technologia ta jest także mniej czasochłonna od pomiarów tachimetrycznych, a także co istotne na terenach o dużym natężeniu ruchu turystycznego – pora dnia nie jest tu ograniczeniem (możliwość pomiarów nocnych) ich zastosowania.

W wyniku przeprowadzonych testów okazało się, że dla wykonania numerycznego modelu rzeźby terenu na podstawie pomiarów geodezyjnych odpowiednią metodą interpolacji jest interpolacja nieliniowa, np. Nonlinear Rubber Sheeting. Oddaje ona w sposób najbardziej rzeczywisty urozmaiconą rzeźbę terenu i daje ona bardziej gładką powierzchnię niż ma to miejsce w przypadku interpolacji metodą liniową. Zaobserwowano również duży wpływ rozmieszczenia pikiet na efekt interpolacji. Zdecydowanie lepszy przebieg kształt wydmy uzyskano dla metody pomiaru GPS, gdyż rozmieszczenie pikiet wysokościowych było bardziej równomierne niż przy zastosowaniu pomiaru tachimetrycznego. Jedynie kształt podnóża skarpy nie został oddany precyzyjnie.

Poza wykorzystaniem pomiarów geodezyjnych dla celu tworzenia DTM możliwe jest zastosowanie metod fotogrametrycznych dla opracowania numerycznego modelu rzeźby terenu szybkozmiennych form krajobrazowych. Na ogół jednak zdjęcia lotnicze wykonywane dla obszarów wydmych wykorzystywane były do analizy geomorfologicznej, badań zjawisk eolicznych (m.in. Miszański, 1973) itp. a nie tworzenia numerycznego modelu rzeźby terenu. Fotogrametryczne opracowanie numerycznego modelu rzeźby terenu daje możliwość uzyskania wysoce precyzyjnego numerycznego modelu rzeźby terenu, nie mniej jednak sam nalot fotogrametryczny i późniejsze opracowanie są dość kosztowne a wykonywanie okresowych opracowań tego rodzaju często nie jest możliwe do zrealizowania z powodów czysto ekonomicznych. Park Narodowy czy Krajobrazowy nie może sobie pozwolić na tak drogą metodę opracowania. Z tego głównie względu wynika prowadzenie prac badawczych nad wykorzystaniem pomiarów geodezyjnych do tworzenia numerycznego modelu rzeźby terenu obiektów tego typu. Pomiary geodezyjne wykonywane w celu utworzenia DTM należy traktować jako metodę uzupełniającą, możliwą do zastosowania na niewielkich obszarach.

LITERATURA

Erdas Field Guide, Erdas Inc., 2002.

Gabryś B., Hasiuk P., Pasternak M., Zaczek-Peplinska J.: Możliwości wykorzystania klasycznych i satelitarnych metod pomiaru od obserwacji przesunięć czoła Wydmy Łąckiej. Materiały VI Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy automatyzacji w geodezji inżynierskiej”, Warszawa 27–28.03.2003.

Miszalski J.: Współczesne procesy eoliczne na Pobrzeżu Słowińskim – studium fotointerpretacyjne. Dokumentacja Geograficzna IG PAN, Warszawa 1973.

Silarski W., Walocha U.: Analiza przesunięć czoła Wydmy Łąckiej. Referat przedstawiony na sympozjum Studenckich Kół Naukowych, Kraków 2000.

www.spn.org.pl – strona internetowa Słowińskiego Parku Narodowego.

ASPECTS OF GENERATING OF DIGITAL TERRAIN MODEL BASED ON SURVEY MEASUREMENTS (ŁĄCKA DUNE EXAMPLE)

S u m m a r y

Digital Terrain Model is very important for many application. There are many different possibilities to use DTM and new technologies (GIS) also, especially for spatial planning and management. However, quality of Digital Terrain Model making based on survey measurements depends on various factors. Both measurement technologies and their processing determinate quality of obtained DTM. Distribution of measurement points or steps of measurement nets, used interpolation algorithms as well have a crucial meaning for the final result. For the same object it could obtain a few different DTMs depend on survey methods and another elements.

Decision about using particular survey method for monitoring of quick-changeable landscape elements should be preceded by analysis of influence of measurement points distribution on obtained results and selection adequate interpolation and presentation methods for given object. It's very important for quality of final results and for cost optimization of measurement campaign also. It play significant rule for planning and realization of cyclic measurements of quick-changeable objects.

In this article are described experimental works, which aims were to determine influences of different elements on DTM (making based on survey measurements). Testing works are made on two fields, which have different characteristics.

KEY WORDS: GIS, survey, DTM, Linear Rubber Sheeting, Nonlinear Rubber Sheeting

Recenzent: prof. dr hab. Jan R. Olędzki, Uniwersytet Warszawski