

## WERYFIKACJA NUMERYCZNEGO MODELU TERENU

### VERIFICATION OF THE DIGITAL TERRAIN MODEL

Zygmunt Paszotta, Małgorzata Szumiło

Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**SŁOWA KLUCZOWE:** Numeryczny Model Terenu, automatyczne generowanie NMT, sprawdzanie dokładności NMT

**STRESZCZENIE:** Obecnie numeryczny model terenu staje się standardowym produktem geoprzestrzennym. W ciągu ostatnich kilku lat pojawiły się nowe możliwości w pozyskiwaniu danych i generowaniu NMT należy tu zaliczyć metody automatycznego spasowania obrazów (*image matching*) szeroko wykorzystywane w technikach fotogrametrii cyfrowej. Należy przypuszczać, iż metody fotogrametryczne są odpowiednim rozwiązaniem wyznaczania NMT dla dużych obszarów w krótkim czasie. Artykuł ten opisuje szczegółowo fotogrametryczne metody pozyskiwania danych do budowy NMT. Autorzy przeprowadzają również analizę źródeł błędów fotogrametrycznego wyznaczenia współrzędnych punktów w celu tworzenia NMT. W pracy przedstawiono równania na błąd fotogrametrycznego wyznaczenia wysokości punktu. Ze względu na udostępnione w projekcie EuroSDR dane testowe (stereogram zdjęć lotniczych w skali 1:25 000) w opracowaniu uwzględniono wpływ błędów estymacji elementów orientacji wzajemnej i bezwzględnej zdjęć oraz pomiary współrzędnych punktów homologicznych. Mnogość sposobów pozyskiwania danych i budowy numerycznych modeli terenu jest skutkiem powstawania produktów o różnej dokładności. Użytkownicy modeli potrzebują podejść i metod oceny ich jakości. Badania takie można wykonać na wiele sposobów. Jednym z nich jest analiza różnicy pomiędzy dwoma modelami. W artykule przedstawiono procedurę kontroli numerycznego modelu terenu opartą na weryfikacji hipotezy statystycznej. Metoda opiera się na automatycznej ocenie dokładności NMT na podstawie wyznaczanych różnic pomiędzy wysokościami określonymi z istniejącego (referencyjnego) NMT i wyznaczonymi z automatycznego pomiaru punktów na stereogramie zdjęć lotniczych. W pracy zaprezentowano opis praktycznej realizacji proponowanego algorytmu oceny jakości NMT. Prezentowane algorytmy oprogramowane zostały w języku JAVA i są dostępne jako aplikacja internetowa na stronie Katedry Fotogrametrii i Teledetekcji UWM w Olsztynie ([www.kfit.umw.edu.pl/zp](http://www.kfit.umw.edu.pl/zp)).

#### 1. WSTĘP

Numeryczne modele terenu były znane i stosowane już w latach pięćdziesiątych poprzedniego stulecia, a obecnie stanowią jedną z ważnych warstw tematycznych w istniejących i nowo budowanych Systemach Informacji Przestrzennej. Znajdują one szerokie zastosowanie do zobrazowania i modelowania zjawisk zachodzących na powierzchni Ziemi, w projektowaniu inżynierskim i planowaniu przestrzennym, są też niezbędnym elementem w procesie generowania ortofotomap. Pełny opis procedur

tworzenia NMT jest zadaniem trudnym. W ciągu ostatnich lat rozwój technologiczny pozwolił na wprowadzenie nowych i udoskonalenie istniejących metod pozyskiwania danych do NMT. Różnorodność sposobów generowania NMT sprawia, iż różnią się one dokładnością. Dodatkowo zauważyć należy, że powierzchnia Ziemi jest powierzchnią dynamicznie zmieniającą się. W tak zaistniałej sytuacji użytkownicy potrzebują metod pozwalających na sprawdzenie istniejących modeli.

Problem automatycznego generowania i badania dokładności NMT jest tematyką wielu międzynarodowych prac badawczych (Baltsavias *et al.*, 1998; Kraus *et al.*, 2004). Jedną z nich jest projekt EuroSDR (European Spatial Data Research) - „Evaluation of the Quality of Digital Terrain Models”, w którym autorzy artykułu wzięli aktywny udział (Höhle J. *et al.*, 2005).

W artykule opisane zostały metody pozyskiwania współrzędnych punktów w celu tworzenia NMT, ze szczególnym naciskiem na metody fotogrametryczne. Autorzy przeprowadzają również analizę źródeł błędów NMT pozyskiwanych metodami fotogrametrii cyfrowej. Przedstawione w opracowaniu równania na błąd fotogrametrycznego wyznaczenia wysokości punktu uwzględniają wpływ błędów estymacji elementów orientacji zdjęć oraz pomiarów współrzędnych punktów homologicznych. Dodatkowo, w artykule przedstawiono procedurę kontroli numerycznego modelu terenu opartą na weryfikacji hipotezy statystycznej. Polega ona na sprawdzeniu poprawności istniejącego NMT na podstawie dodatkowych pomiarów, przeprowadzanych w sposób automatyczny.

## 2. METODY POZYSKIWANIA DANYCH I ŹRÓDŁA BŁĘDÓW

Źródłami danych o terenie szeroko opisanymi w literaturze przedmiotu są: pomiary bezpośrednie, dane kartograficzne (pozyskanie informacji o rzeźbie terenu z map i innych materiałów znajdujące się w zasobie geodezyjno-kartograficznym), skanowanie laserowe z pułapu lotniczego oraz opracowania zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych.

Fotogrametria lotnicza wciąż pozostaje głównym źródłem danych do budowy NMT. Prace fotogrametryczne opierają się głównie na pomiarze punktów homologicznych na dwóch lub więcej obrazach (zdjęciach). W fotogrametrii analogowej i analitycznej proces ten odbywał się przez manualny pomiar operatora. W fotogrametrii cyfrowej dąży się do zautomatyzowania pomiaru. Proces ten nazywa się spasowaniem obrazów. Algorytmy automatycznego pomiaru na obrazach cyfrowych opierają się głównie na metodach korelacji. Podstawową miarą podobieństwa (funkcją celu) jest współczynnik korelacji (Schenk, 1996; Zieliński, 1998; Paszotta, 2000). Mając wyznaczone współrzędne pikselowe punktów homologicznych następuje ich przeliczenie do układu współrzędnych tłowych, a następnie na podstawie znanych elementów orientacji wzajemnej i bezwzględnej wyznaczane są współrzędne terenowe punktów oporowych NMT. W cyfrowych metodach generowania NMT, realizowanych na nowoczesnych stacjach fotogrametrycznych częściej wykorzystuje się orientację zewnętrzną zdjęć, wyznaczoną w procesie aerotriangulacji. Wartości elementów orientacji zewnętrznej służą do budowy obrazów epipolarnych, stosowanych w celu usprawnienia procesu automatycznego poszukiwania punktów

homologicznych, i określenia terenowego położenia źródłowych punktów NMT (Krzystek, 1995).

Na dokładność fotogrametrycznego opracowania NMT mają wpływ takie czynniki jak (Ackermann, 1996):

- poprawna kalibracja kamer fotogrametrycznych,
- refrakcja atmosferyczna,
- skurcz filmu w czasie pomiędzy ekspozycją a skanowaniem,
- błędy mechaniczne i optyczne skanerów fotogrametrycznych,
- precyzja identyfikacji fotopunktów i dokładność ich pomiaru na zdjęciach i w terenie,
- słaba korelacja pewnych obszarów obrazów wpływająca na proces automatycznego pomiaru punktów.

Ze względu na udostępniony w projekcie EuroSDR materiał badawczy (jeden stereogram zdjęć lotniczych) do wyznaczenia teoretycznego błędu określenia współrzędnych terenowych metodami fotogrametrycznymi autorzy przeanalizowali przypadek, w którym do obliczania tychże współrzędnych wykorzystuje się elementy orientacji wzajemnej i bezwzględnej.

$$X - X_0 = -Z \left( \frac{x_1^o}{c_k} \right) = B \left( \frac{x_1^o}{p^o} \right) \quad (1)$$

$$Y - Y_0 = -Z \left( \frac{y_1^o}{c_k} \right) = B \left( \frac{y_1^o}{c_k} \right) \quad (2)$$

$$Z - Z_0 = B \left( \frac{c_k}{p^o} \right) \quad (3)$$

gdzie:

$X, Y, Z$  - współrzędne terenowe punktu

$X_0, Y_0, Z_0$  - wektor translacji

$x_1^o, y_1^o$  - współrzędne tłów punktu na pionowym zdjęciu lewym

$c_k$  - stała kamery

$B$  - długość bazy fotografowania w systemie współrzędnych terenowych

$p^o = x_1^o - x_2^o$  - różnica odciętych tłów punktu na pionowym lewym i prawym zdjęciu

Długość bazy fotografowania można określić jako iloczyn współczynnika zmiany skali  $\lambda$  i długości bazy modelu stereoskopowego  $b$ , przy czym rozpisując liniowe składowe orientacji wzajemnej otrzymujemy formułę:

$$B = b * \lambda = \lambda \sqrt{1 + b_y^2 + b_z^2} \quad (4)$$

Wielkość  $p^o$  można zapisać w postaci równania 5. Pozwala ono określić różnice odciętych na obrazach pionowych przy znajomości współrzędnych tłów i elementów orientacji wzajemnej zdjęć.

$$p_0 = p + c_k \Delta \varphi - \frac{p^2}{c_k} \varphi_1 + \frac{x_2^2}{c_k} \Delta \varphi - \frac{x_2 y_2}{c_k} \Delta \omega + y_2 \left( \Delta \kappa + \frac{p}{c_k} \omega_1 \right) - x_2 \left( \frac{\Delta H}{H} + 2 \frac{p}{c_k} \varphi_1 \right) \quad (5)$$

Średni błąd określenia współrzędnych X,Y,Z można wyznaczyć poprzez obliczenie różniczek równań nr 1,2,3. I tak pochodna po Z ma postać (Lobanow, 1984)

$$dZ = Z \left( \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dc_k}{c_k} + \frac{db}{b} - \frac{dp_0}{p_0} \right) \quad (6)$$

Po przekształceniu wzoru 6 otrzymujemy:

$$m_Z^2 = Z^2 \left( \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 m_\lambda^2 + \left( \frac{1}{c_k} \right)^2 m_{c_k}^2 + \left( \frac{1}{p} \right)^2 m_p^2 + \left( \frac{1}{p} \right)^2 m_{x_1}^2 + \left( \frac{1}{p} \right)^2 m_{x_2}^2 + \left( \frac{x_1 y_1}{fp} \right)^2 m_\omega^2 + \left( \frac{f}{p} + \frac{x_1^2}{fp} \right)^2 m_\varphi^2 + \left( \frac{y_1}{p} \right)^2 m_\kappa^2 + \dots \right) \quad (7)$$

$$\dots + \left( \frac{b_y}{b^2} - \frac{(x_1 - b)b_z b_y}{fb^3} \right)^2 m_{b_y}^2 + \left( \frac{b_z}{b^2} + \frac{(x_1 - b)(b^2 - b_z^2)}{fb^3} \right)^2 m_{b_z}^2$$

Z powyższych równań widać jak błędy pomiarów, błędy estymacji elementów orientacji zdjęć i błędy kalibracji kamery mają wpływ na wyznaczenie współrzędnej Z.

### 3. PODSTAWY TEORETYCZNE WERYFIKACJI NMT

Powierzchnia  $f(x,y)$  opisana przez NMT jest tylko przybliżeniem prawdziwej (rzeczywistej) powierzchni Ziemi  $z=f(x,y)$ . Różnica pomiędzy tymi dwiema powierzchniami jest definiowana jako:

$$r(x, y) = f(x, y) - f^1(x, y) \quad (8)$$

a błąd średni różnicy jako:

$$\sigma^2 = \frac{1}{lxly} \int_0^{ly} \int_0^{lx} r(x, y)^2 dx dy \quad (9)$$

W praktyce „prawdziwa” powierzchnia terenu jest nieznaną, więc określenie różnicy pomiędzy wygenerowanym NMT (przybliżeniem powierzchni terenu) i rzeczywistą powierzchnią obszaru jest niemożliwe. W celu dokładnej weryfikacji jakości danego NMT musimy użyć innego, dokładniejszego (o rząd wielkości) modelu powierzchni tego samego obszaru.

Proponowane przez autorów sprawdzenie poprawności NMT opiera się na założeniu weryfikacji hipotezy statystycznej. Załóżmy, że posiadamy model, który chcemy poddać testom oraz określoną dla odpowiednio dużej liczby punktów różnicę wysokości między dwoma modelami. Pierwszym krokiem jest zbadanie czy zmienna losowa  $\Delta Z$  (różnica między modelami na wybranym obszarze opracowania) dla tej próbki ma rozkład normalny.

Następnie definiujemy elementy testu statystycznego. Niech  $m$  będzie parametrem rozkładu zmiennej losowej  $\Delta Z$ . Stawiamy hipotezę, że parametr  $m$  przyjmuje wartość  $m_0$ . Tym samym będziemy weryfikować hipotezę  $H_0$  postaci  $m = m_0$ .

Definiujemy również hipotezę alternatywną  $H_A$  postaci  $m > m_0$  (lub  $H_A: m < m_0$ )

Na podstawie zbioru różnic wysokości z badanego obszaru określamy wartość średnią  $\bar{x}$ , która jest oceną parametru  $m$  zgodnie z wzorem 10

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Z \quad (10)$$

Przeprowadzamy test statystyczny - wyznaczenie wartości statystyki  $u$ , który pozwala stwierdzić czy możemy odrzucić hipotezę zerową  $H_0$

$$u = \frac{\bar{x} - m_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (11)$$

gdzie:

$s$  - odchylenie standardowe z próby

$n$  - wielkość próby

Obszary krytyczne są określone zgodnie z wzorem 12

$$u > u_\alpha \text{ dla } H_A: m > m_0 \quad \text{lub} \quad u < -u_\alpha \text{ dla } H_A: m < m_0 \quad (12)$$

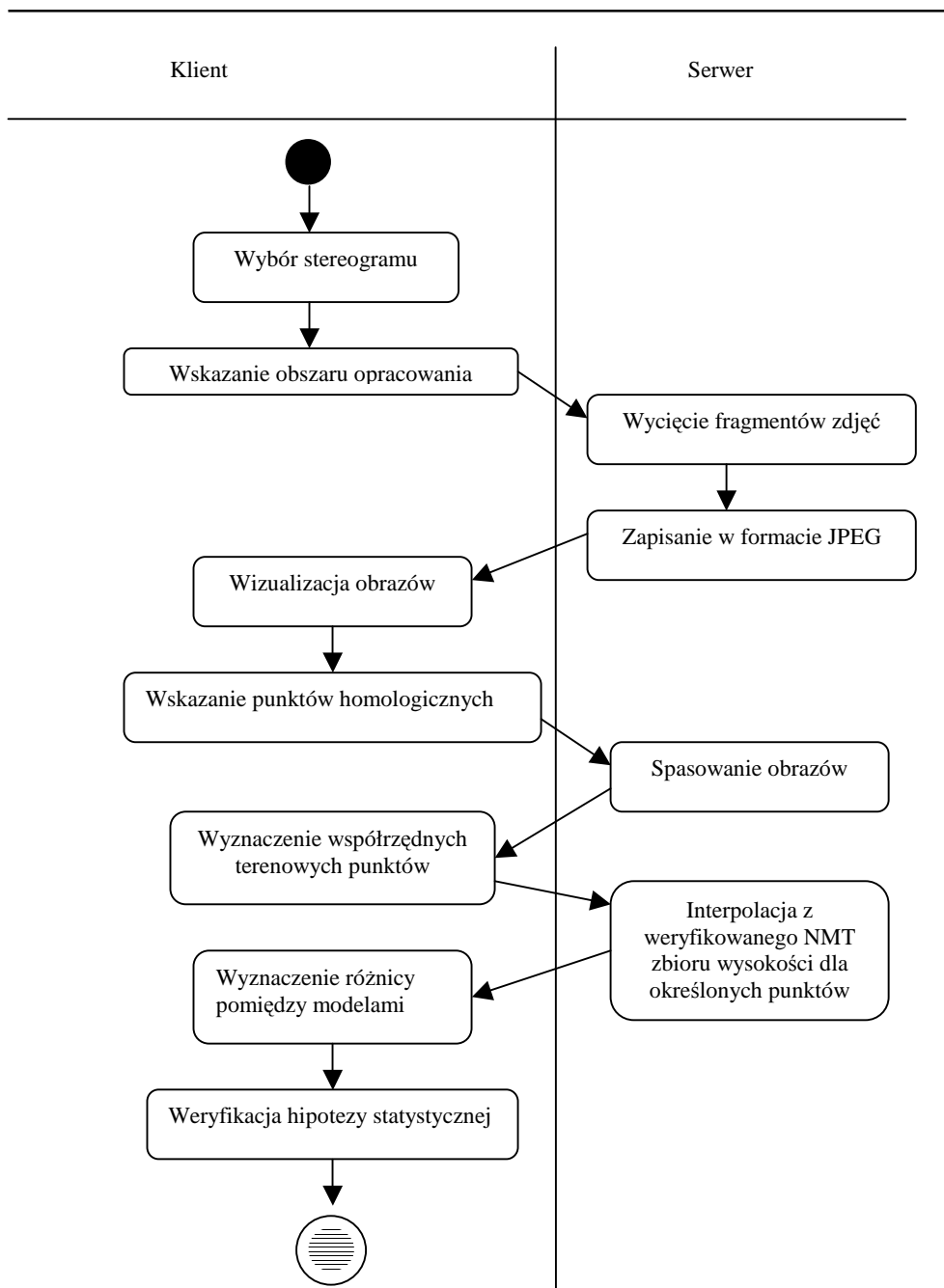
gdzie  $u_\alpha$  jest wybierana przez użytkownika tak że poziom istotności  $\alpha = P(u > u_\alpha)$ .

#### 4. PRZYKŁAD REALIZACJI WERYFIKACJI NMT

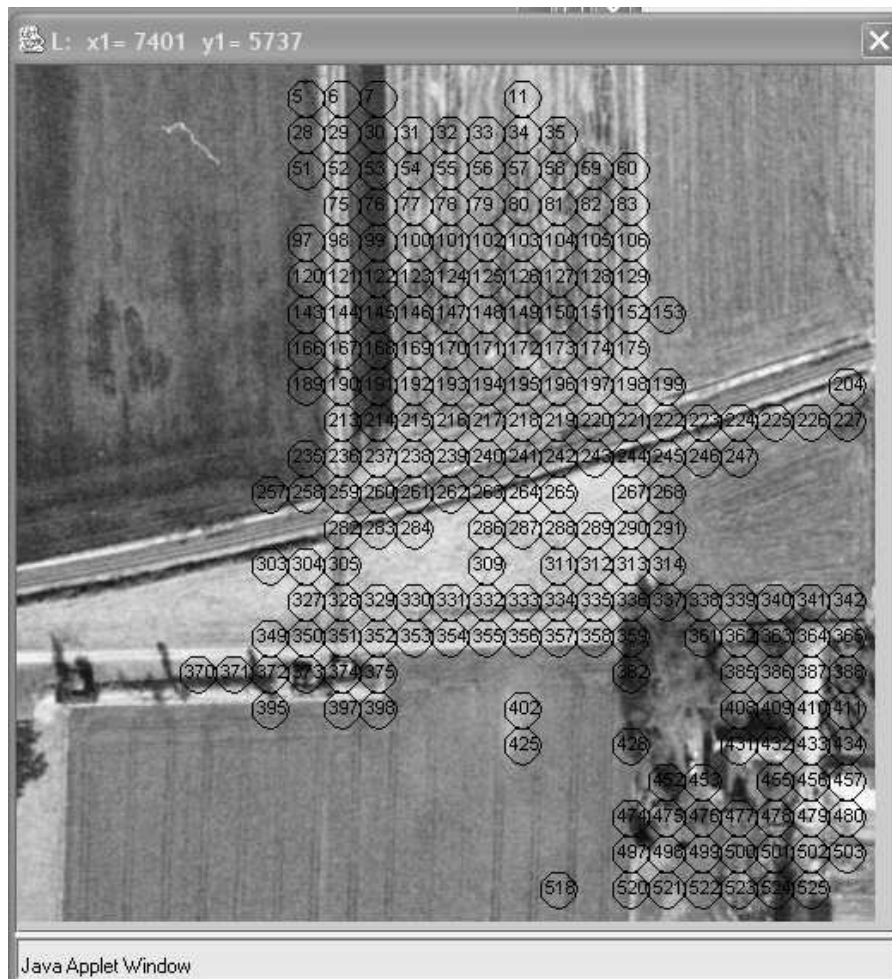
Do badań wykorzystano dane udostępnione w projekcie EuroSDR „Evaluation of the Quality of Digital Terrain Models” – jedną parę zdjęć w skali 1:25 000 i NMT okolic Aalborga pozyskamy metodami fotogrametrycznymi.

Prezentowany algorytm został oprogramowany w języku JAVA i jest dostępny jako aplikacja internetowa na stronie Katedry Fotogrametrii i Teledetekcji UWM w Olsztynie [www.kfit.umw.edu.pl/zp/A\\_nmt.html](http://www.kfit.umw.edu.pl/zp/A_nmt.html). Zakres i przebieg czynności w prezentowanej aplikacji prezentowany jest na rysunku 1.

Przedstawmy teraz praktyczny przykład realizacji algorytmu. W celu prezentacji wyników posłużymy się przeglądarką internetową Internet Explorer. Obecnie na serwerze katedry znajdują się niezbędne dane (zdjęcia + NMT), by przeprowadzić opisaną procedurę dla użytego stereogramu. Po wybraniu obszaru, na którym chce się przeprowadzić weryfikację NMT następuje automatyczny pomiar zbioru punktów służący do kontroli dokładności badanego NMT. W internetowej metodzie wyznaczania współrzędnych terenowych istotnym problemem jest pomiar punktów homologicznych. Dokładność i szybkość identyfikacji punktów homologicznych decyduje o dokładności i szybkości wyznaczania współrzędnych terenowych pojedynczych punktów a zatem również ma wpływ na dokładność pozyskania współrzędnych punktów do budowy numerycznego modelu terenu (Paszotta, 2005).



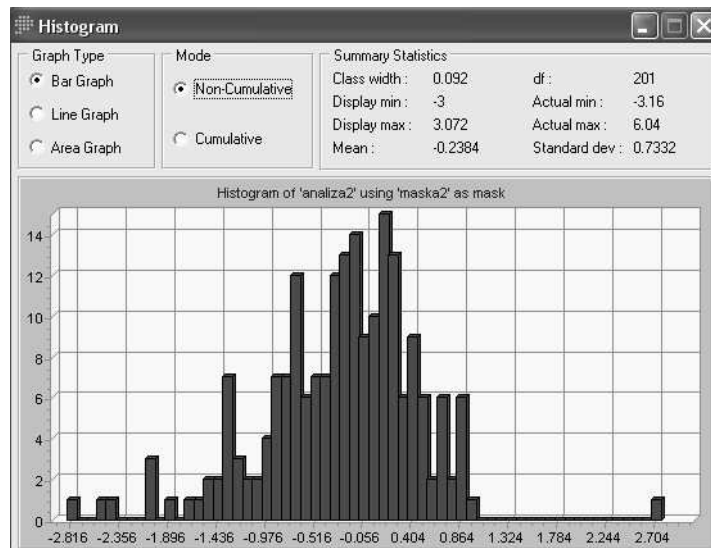
Rys. 1. Diagram czynności w procesie weryfikacji numerycznego modelu terenu



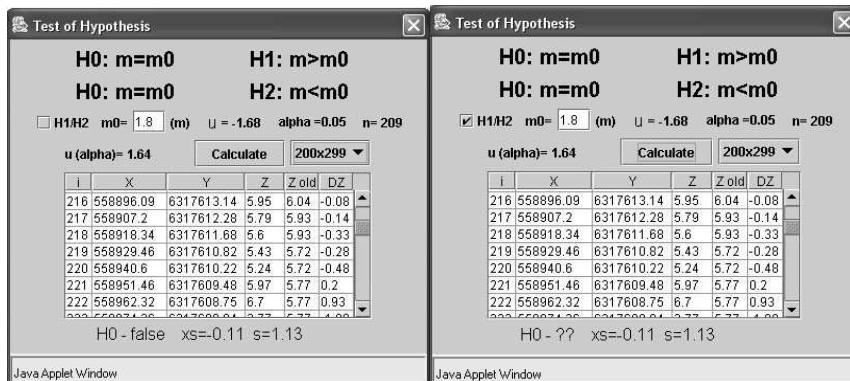
Rys. 2. Wizualizacja automatycznego pomiaru punktów

W proponowanym rozwiązaniu identyfikacja startowego punktu homologicznego odbywa się za pomocą przeglądarki internetowej, ale spasowanie obrazów wykonywane jest na oryginalnych obrazach po stronie serwera. Wizualizacje zbioru pomiarowego przedstawia rysunek 2

W prezentowanym przykładzie na powierzchni około 3 ha wyznaczono automatycznie współrzędne i różnice wysokości między wielkościami pomierzonymi a interpolowanymi z weryfikowanego NMT dla zbioru 209 punktów uzyskując rozkład w próbie przedstawiony na rysunku 3. Przeprowadzono test zgodności rozkładu różnic z rozkładem normalny w wyniku, którego nie odrzucono hipotezy, że badany rozkład jest normalny. Pozwoliło to na przeprowadzenie testu statystycznego dla wartości oczekiwanej badanej różnicy. Wyniki testu przedstawia rysunek 4.



Rys. 3. Rozkład różnic wysokość dla zbioru pomiarowego



Rys. 4. Wyniki testu hipotezy statystycznej

## 5. PODSUMOWANIE

Mnogość sposobów pozyskiwania danych i budowy numerycznych modeli terenu jest skutkiem powstawania produktów o różnej dokładności. Użytkownicy potrzebują metod pozwalających na określenie poprawności istniejących NMT. Niniejszy artykuł nie jest jedynie dyskusją na temat źródeł błędów modeli terenu generowanych fotogrametrycznie. Przedstawione w opracowaniu równania na błąd fotogrametrycznego wyznaczenia wysokości punktu uwzględniają wpływ błędów estymacji elementów orientacji zdjęć. Ze względu na określony w projekcie EuroSDR materiał badawczy szczegółowej analizie podano fotogrametryczne wcięcie w przód. Celem artykułu jest również prezentacja koncepcji i praktycznej realizacji metody weryfikacji NMT stosując metody fotogrametrii cyfrowej.



## 6. 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*, USA, s. 135-141.
- Baltsavias E, Kaeser C., 1998. DTM and orthoimage generation - a thorough analysis and comparison of four digital photogrammetric systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXII, Part B4, s. 42-51.
- Höhle J., Potuckova M., 2005. Automated quality control for Orthoimage and Digital Terrain Model. <http://www.plan.auc.dk/~jh/articles/QualityControl.pdf>.
- Kraus K., Briese C., Attwenger M., Pfeifer N., 2004. Quality measures for Digital Terrain Models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV, Part B2, s.113-119.
- Krzystek P., 1995. Generation of Digital Elevation Models. In *Second Course in Digital Photogrammetry*, Bonn, Germany. Institute for Photogrammetry at Bonn University and Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen.
- Lobanow, A., 1984. *Fotogrammetria*. Niedrs, Moskwa s. 456-458.
- Paszotta Z., 2000. Teoretyczne podstawy metody spasowania obszarów obrazów cyfrowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 10, s. 197-203.
- Paszotta,Z., 2005. Java i fotogrametryczne aplikacje internetowe. *Geodezja, katorgrafija i aerofotoznimanija*. ISSN 0130-1039, s. 223-227.
- Schenk A.,1996. Automatic Generation of DEM. *Digital photogrammetry: an addendum to the manual photogrammetry*. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, USA, s. 145-150.
- Zieliński J., 1998. Strategia automatyzacji pomiarów na stereogramach cyfrowych cyfrowych zastosowaniem metod korelacyjnych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 8, s. 164-172.

## VERIFICATION OF THE DIGITAL TERRAIN MODEL

KEY WORDS: Digital Terrain Model, DTM generation, quality control

### Summary

The Digital Terrain Model has recently become a standard geospatial product. In the last few years, many new possibilities for generating Digital Terrain Models have been developed, including image matching techniques. It can be supposed that digital photogrammetric technology, which uses methods of image matching methods, is an appropriate solution for obtaining DTM of large areas in a short time. This paper briefly describes the generation of DTM by photogrammetric methods.

An analysis of the cause of errors in computing the ground coordinates in DTM is also made. The authors have derived a formula for the theoretical error of terrain coordinate calculations. Because the available test material in the EuroSDR project "Evaluation of the Quality of Digital Terrain Models", in which the authors took part, contained only two aerial photos (one stereo-pair) the relative and absolute orientations were taken into consideration. Photos scanned with a pixel size of 21 micrometers were on a 1:25 000 scale.

Users with DTM experience need approaches and methods of quality control. This can be done in different ways. The accuracy of DTM can also be checked by an analysis of the difference between two DTMs. In this paper, statistical approaches for determining DTM quality are presented. The statistical tests of hypothesis were used for these purposes. The method of automatic assessment of DTM accuracy is elaborated using an existing DTM and taking measurements on a stereo-pair of photos.

The article also describes an internet application, which allows user to determine whether existing, available DTM meet accuracy specifications sufficient for their requirements. A practical solution of the proposed algorithm is based on the system of a central unit - a server of applications and client computers equipped with standard Internet browsers, e.g. Internet Explorer, Netscape, Opera. The program was written in the Java language. The described application is located on the Department of Photogrammetry and Remote Sensing server ([www.kfit.uwm.edu.pl/zp/A\\_nmt.html](http://www.kfit.uwm.edu.pl/zp/A_nmt.html)).

Dr hab. Zygmunt Paszotta, prof. UWM  
e-mail: [paszotta@uwm.edu.pl](mailto:paszotta@uwm.edu.pl)  
tel. +89 5234712

Mgr inż. Małgorzata Szumiło  
e-mail: [malgorzata.szumilo@uwm.edu.pl](mailto:malgorzata.szumilo@uwm.edu.pl)  
tel. +89 5234925