

Zygmunt Paszotta, Małgorzata Szumilo
Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn, Polska

ŹRÓDŁA BŁĘDÓW NUMERYCZNEGO MODELU TERENU POZYSKANEGO METODAMI FOTOGRAMETRYCZNYMI

© Paszotta Z., Szumilo M., 2006

*Описано методи збору даних для побудови ЦМР на основі фотограмметричних технологій.
Проаналізовано джерела похибок побудови ЦМР методами цифрової фотограмметрії.*

This paper describes briefly the generation of DTM by photogrammetric methods. The analysis of the reason of the existing errors in computing the ground coordinates in DTM is also made.

Numeryczny Model Terenu (NMT) jest zdefiniowany jako zbiór danych umożliwiających uzyskanie geometrycznego opisu powierzchni Ziemi. Posługując się odpowiednim, określonym dla danego zbioru, algorytmem interpolacyjnym użytkownik jest w stanie odtworzyć kształt powierzchni Ziemi w wybranym przez siebie obszarze. Koncepcja tworzenia NMT została przedstawiona po raz pierwszy przez Miller'a i Laflamma w latach pięćdziesiątych zeszłego stulecia.[1] NMT, początkowo stosowany jedynie w projektowaniu inżynierskim, obecnie stanowi jedną z warstw tematycznych Systemów Informacji Przestrzennej i jest szeroko wykorzystywany przez planistów przy tworzeniu planów zagospodarowania przestrzennego. W fotogrametrii cyfrowej NMT jest niezbędnym komponentem procesu tworzenia ortofotomapy i ortorektyfikacji obrazów satelitarnych.

Różnorodność sposobów pozyskiwania danych do budowy NMT sprawia, iż różnią się one dokładnością. Wiarygodność (jakość) NMT związana jest bezpośrednio z informacjami zawartymi w zbiorze wejściowych. Istotną rolę odgrywa tu dokładność pozyskania współrzędnych punktów do budowy NMT. W artykule autorzy przedstawiają źródła danych do generowania modeli powierzchni Ziemi, ze szczególnym zwróceniem uwagi na technologie fotogrametryczne. Autorzy zajmują się również źródłami błędów w technologii fotogrametrycznej, mających wpływ na „jakość” NMT.

Metody pozyskiwania danych. Powierzchnia terenu jest zwykle reprezentowana przez regularny lub nieregularny rozkład punktów uzupełniony opisem form morfologicznych występujących na danym obszarze tj.: linie szkieletowe (grzbiety, cieki), linie nieciągłości (granice skarp, urwiska), granice wyłączeń obszarów poziomych (np. jeziora), charakterystyczne punkty rzeźby terenu (lokalne ekstrema), itp.. Dopiero zbiór tych punktów i linii wraz z oznaczoną lokalnie interpolacją między nimi jest numerycznym modelem terenu. W większości przypadków NMT przedstawiany jest za pomocą regularnej siatki kwadratów (ang. GRID). Coraz większą popularność ma również wykorzystanie do tego celu nieregularnej siatki trójkątów (Triangular Irregular Networks TIN).

Istnieje wiele metod pozyskiwania danych o terenie szeroko opisanych w literaturze przedmiotu. Należą do nich:

- pomiar bezpośredni (pomiar tachimetryczny lub GPS),
- dane kartograficzne (pozyskanie informacji o rzeźbie terenu z map i innych materiałów znajdujące się w zasobie geodezyjno-kartograficznym),
- metody fotogrametryczne (opracowania zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych),
- skanowanie laserowe z pułapu lotniczego.

Wśród nich najdokładniejszą i najbardziej wiarygodną grupą są pomiary bezpośrednie. Jednakże ten rodzaj gromadzenia danych do generowania NMT jest ściśle ograniczony ze względów ekonomicznych. Stosowany jest jedynie dla małych obszarów opracowań lub w przypadkach, gdy rzeźba terenu jest

znacznie urozmaicona i inne techniki nie pozwalają na uzyskanie danych o żądanej dokładności. Poszukuje się, więc zastępstwa na tak pracochłonne i kosztowne prace.

Najbardziej ekonomicznym wyjściem wydaje się użycie do budowy NMT danych kartograficznych. Zawierają one już istniejące informacje topograficzne (kontury warstw z map topograficznych). Niemniej jednak nie pozwalają na wygenerowanie wysokiej jakości NMT (Ackermann, 1996). Pierwszym etapem prac, budując NMT z danych kartograficznych jest wyodrębnienie z map konturów warstw. Czynności te mogą być przeprowadzone na dwa sposoby, wektoryzując warstwy z map zapisanych w postaci rastrowej lub bezpośrednio poprzez digitalizację. Wynikiem tych prac jest otrzymanie informacji o wysokości terenu zapisanych w formie wektorów warstw. Następnie z tak przygotowanych danych wejściowych interpolowane są wysokości punktów węzłowych siatki kwadratów (prostokątów).

Głównym źródłem danych do tworzenia NMT jest również fotogrametria lotnicza. Podstawowym zadaniem w pracach fotogrametrycznych jest pomiar punktów homologicznych na dwóch lub więcej obrazach (zdjęciach), czyli wybór obiektu na jednym zdjęciu i odszukanie jego odpowiednika na drugim. W fotogrametrii analogowej i analitycznej odbywa się to przez manualny pomiar operatora. W fotogrametrii cyfrowej dąży się do rozwiązania problemu w sposób automatyczny. Proces ten nazywa się *matching* obrazów.

Mając współrzędne tłowe pary punktów homologicznych, dane do generowania NMT można otrzymać dwiema drogami:

1. Określając elementy orientacji wzajemnej zdjęć budowany jest model przestrzenny, który następnie transformowany jest do układu współrzędnych terenowych.

2. Po wyznaczeniu elementów orientacji zewnętrznej zdjęć pomierzone na stereogramie współrzędne tłowe punktów są bezpośrednio przeliczone na współrzędne X,Y,Z w układzie terenowym stosując wzór 1.

$$x - x_o = -f \frac{a_{11}(X - X_o) + a_{21}(Y - Y_o) + a_{31}(Z - Z_o)}{a_{13}(X - X_o) + a_{23}(Y - Y_o) + a_{33}(Z - Z_o)},$$

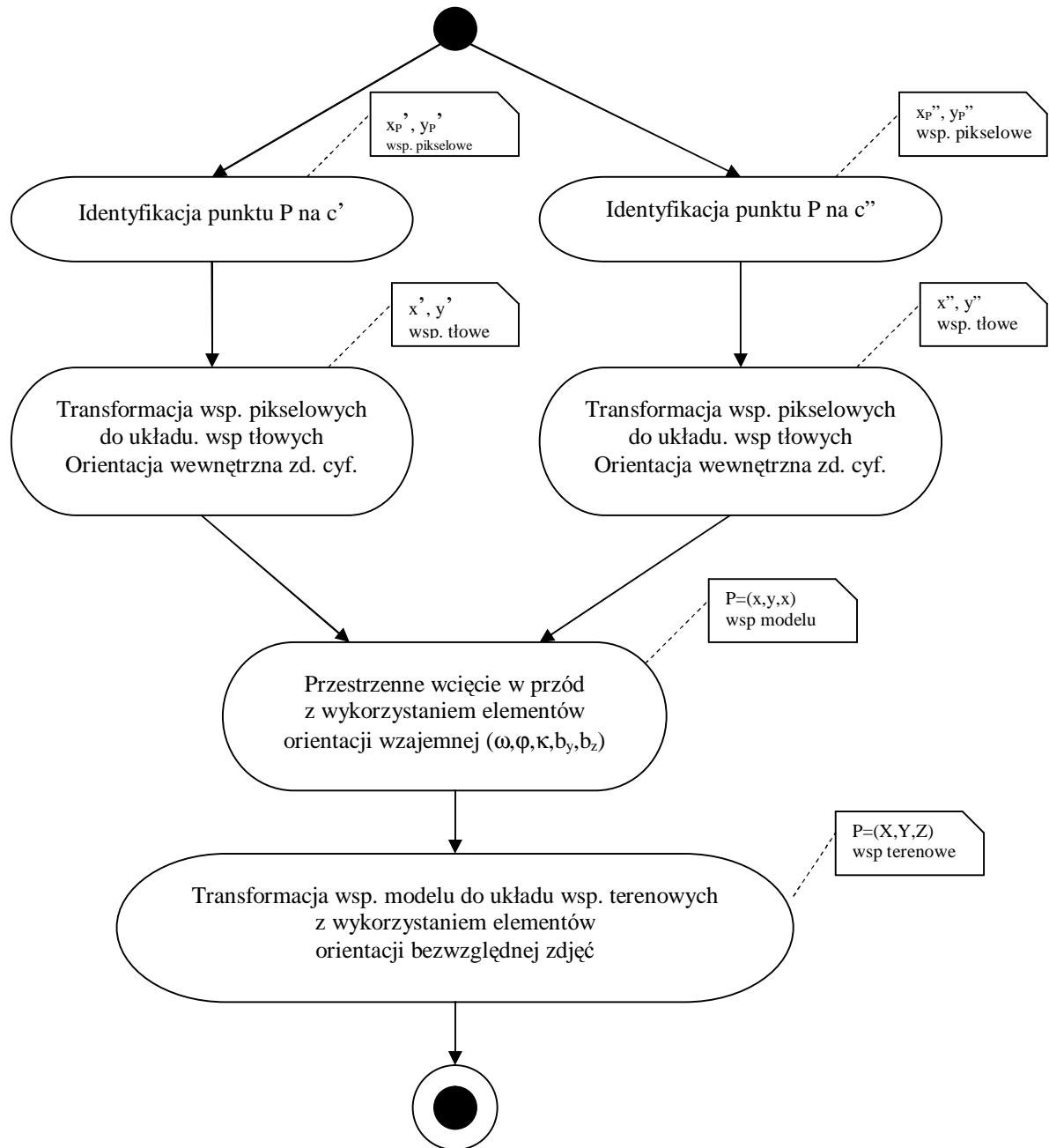
$$y - y_o = -f \frac{a_{12}(X - X_o) + a_{22}(Y - Y_o) + a_{32}(Z - Z_o)}{a_{13}(X - X_o) + a_{23}(Y - Y_o) + a_{33}(Z - Z_o)},$$
(1)

gdzie X, Y, Z – współrzędne punktu w układzie terenowym; X_o, Y_o, Z_o – współrzędne środka rzutów w układzie terenowym; $x, y, -c_k$ – współrzędne punktu w układzie zdjęcia; x_o, y_o – współrzędne punktu głównego, współrzędne środka rzutów w układzie zdjęcia; c_k – stała kamery; $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}$ – parametry transformacji rzutowej, elementy macierzy obrotu.

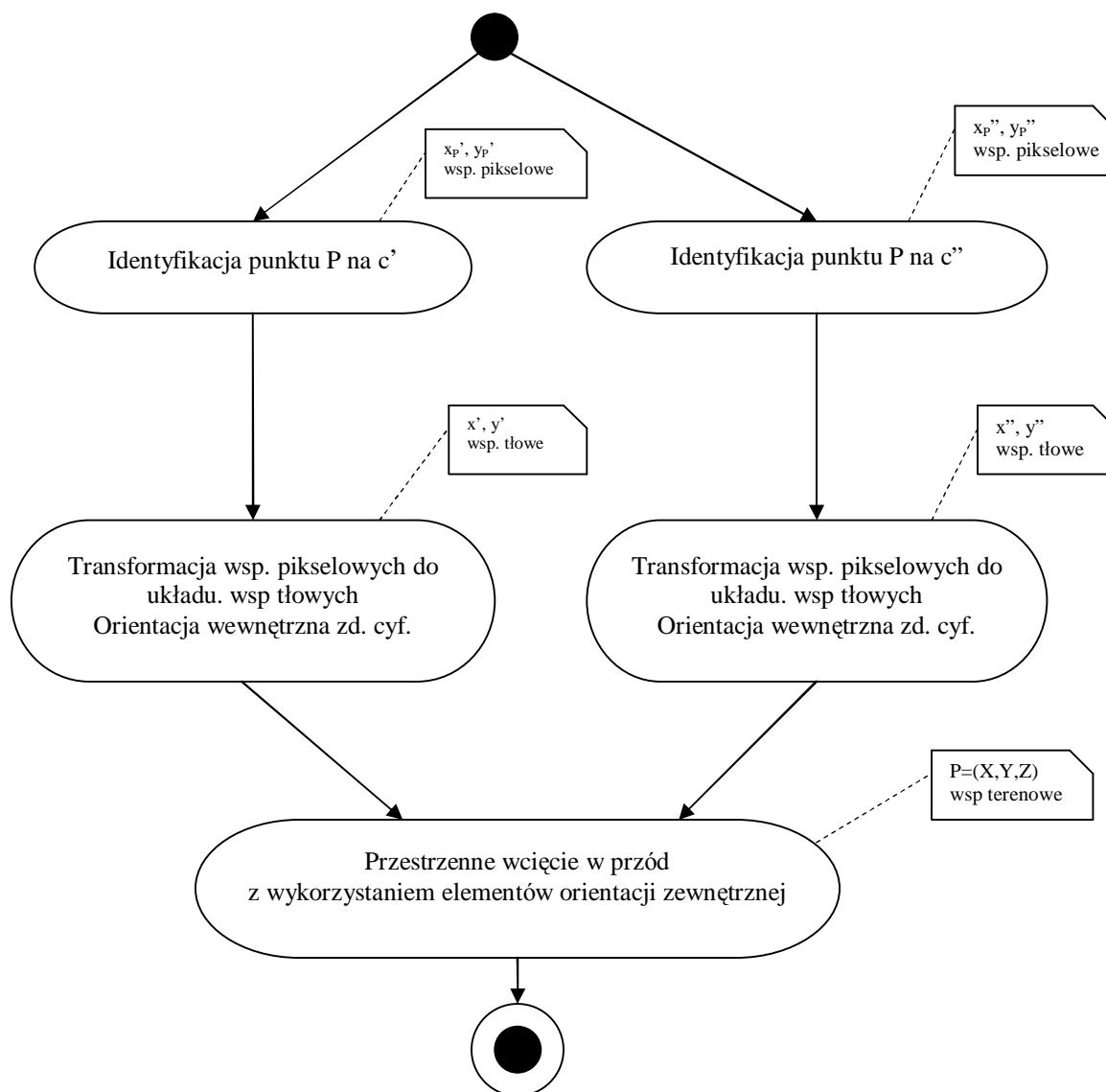
Kolejność obliczeń dla obu przypadków przedstawiają odpowiednio rysunki nr 1 i 2. Dane są zdjęcia lotnicze w postaci cyfrowej oznaczone jako c' – zdjęcie lewe, c'' – zdjęcie prawe. Rezultaty poszczególnych etapów obliczeń zaprezentowane są w postaci notatek.

W obu przypadkach niezbędna do obliczeń jest wiedza o parametrach kamery oraz określenie parametrów transformacji z układu współrzędnych pikselowych do układu współrzędnych tłowych. Ważną rolę odgrywa również precyzja identyfikacji fotopunktów na obu zdjęciach i dokładność pomiaru ich współrzędnych. Wszystkie wyżej wymienione elementy wpływają bezpośrednio na dokładność określenia współrzędnych terenowych punktów tj. na dokładność NMT generowanego z nich. Problem czynników wpływających na dokładność określenia współrzędnych punktu metodami fotogrametrycznymi zostanie szerzej opisany w dalszej części artykułu.

Algorytmy automatycznej budowy NMT z danych rastrowych (zdjęć lotniczych, obrazów satelitarnych) opierają się głównie na metodach korelacji. Podstawową miarą podobieństwa (funkcją celu) przy spasowaniu obrazów jest współczynnik korelacji. Dla zdefiniowanego otoczenia pikselu na zdjęciu lewym (otoczenie punktu węzłowego siatki na zdjęciu lewym) i tegoż otoczenia na zdjęciu prawym liczony jest wielokrotnie współczynnik korelacji. Obszar uważa się za spasowany dla maksymalnej wartości współczynnika i gdy jego wartość jest większa od określonej w algorytmie (Paszotta, 2000).



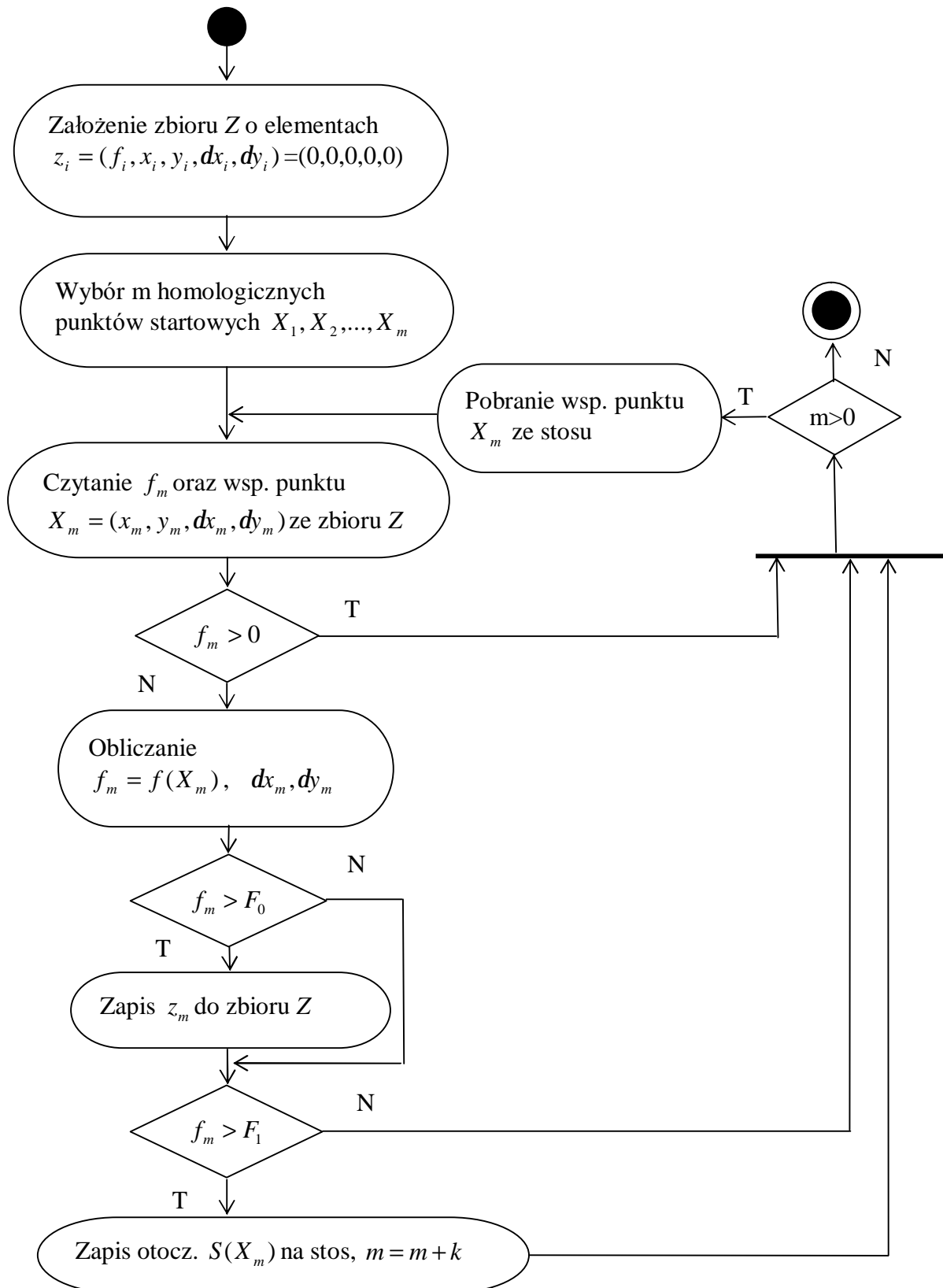
Rys. 1. Etapy określenia współrzędnych punktu w układzie terenowym z jednego stereogramu



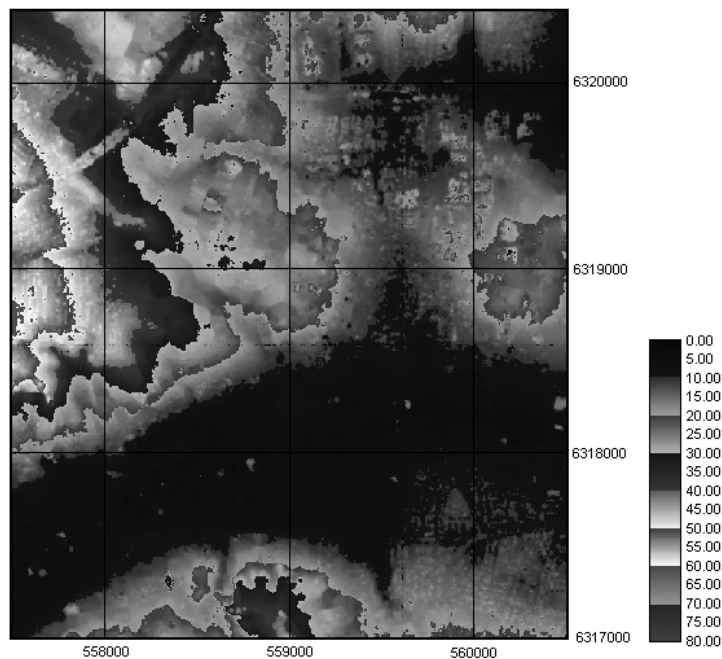
Rys. 2. Etapy prac obliczenia współrzędnych terenowych punktu przy zastosowaniu transformacji rzutowej

Tak przedstawiona procedura jest powtarzana na kolejnych, wcześniej określonych, punktach węzłowych siatki. Rysunek 3 przedstawia istotę algorytmu spaspowania obrazów wykorzystywanego przy generowaniu numerycznego modelu terenu. Rezultatem spaspowania jest zbiór, który zawiera współrzędne pikselowe środków obszarów spaspowywanych na lewym zdjęciu, różnice między współrzędnymi na prawym i na lewym zdjęciu oraz minimum funkcji celu. (Paszotta, 2005)

Wynikiem wyżej opisanego algorytmu jest Numeryczny Model Terenu, którego wizualizacja jest przedstawiona na rysunku nr 4. Dane do tego przykładu pochodzą z projektu EuroSDR kierowanego przez prof. Joachima Hoehle [6].



Rys. 3. Algorytm spasowania obrazów



Rys. 4. Wynik automatycznej budowy Numerycznego Modelu Terenu

Źródła błędów Numerycznego Modelu Terenu.

Określenie źródeł błędów wpływających na dokładność Numerycznego Modelu Terenu jest niezmiernie ważne. NMT jest elementem niezbędnym w procesie tworzenia ortofotomap i ma kluczowy wpływ na ich kartometryczność. Na „jakość” cyfrowego opracowania NMT ma wpływ wiele czynników, z których zasadnicze znaczenie mają:

- poprawna kalibracja kamery lotniczej;
- refrakcja atmosferyczna;
- skurcz filmu pomiędzy ekspozycją skanowaniem;
- błędy mechaniczne i optyczne skanera;
- dokładność osnowy fotogrametrycznej;
- błędne pozycjonowanie kursora na punktach osnowy;
- błędy operatorskie;
- słaba korelacja obrazowa pewnych obszarów wpływająca na proces automatycznego pomiaru punktów.

Według Ackermana [1] dokładność NMT scharakteryzowana jest przez średni błąd wysokości wyinterpolowanej z wynikowego Modelu i zależy od: błędów danych źródłowych, wielkości oczka siatki i charakteru rzeźby terenu. Czynniki te ujmuje empiryczny wzór, w którym pierwszy człon określa błąd pozyskania danych do generowania NMT, drugi człon uwzględnia błędy związane z interpolacją wysokości.

$$m_{NMT}^2 = m_z^2 + (ad)^2, \quad (2)$$

gdzie m_{NMT} – średni błąd wyinterpolowanej wysokości NMT; m_z – średni błąd określenia wysokości; a – współczynnik opisujący charakter rzeźby terenu; d – średnia odległość punktów pomiarowych

Przyjmuje się następujące wielkości współczynnika a :

- dla terenów łatwych (łatwych gładkiej powierzchni) : od 0,004 do 0,007;

- dla terenów o średniej trudności: od 0,010 do 0,020;
- dla terenów trudnych (o nieregularnych i stromych powierzchniach): od 0,022 do 0,044.

Na podstawie wzoru (2) widać jak duży wpływ na dokładność generowania Numerycznego Modelu Terenu mają dane wejściowe (dane źródłowe).

Błąd określenia współrzędnych X,Y,Z punktu wyznaczanego metodami fotogrametrycznymi.

Do wyznaczenia wielkości błędów współrzędnych punktu wyznaczonych metodami fotogrametrycznymi autorzy opracowania przeanalizowali przypadek, kiedy wykorzystuje się orientację wzajemną i bezwzględną do obliczenia tychże współrzędnych. Użyte zostały formuły:

$$X - X_0 = -Z \left(\frac{x_1^o}{c_k} \right) = B \left(\frac{x_1^o}{p^o} \right) \quad (3)$$

$$Y - Y_0 = -Z \left(\frac{y_1^o}{c_k} \right) = B \left(\frac{y_1^o}{c_k} \right) \quad (4)$$

$$Z - Z_0 = B \left(\frac{c_k}{p^o} \right) \quad (5)$$

gdzie X, Y, Z – współrzędne terenowe punktu; X_0, Y_0, Z_0 – wektor translacji; x_1^o, y_1^o – współrzędne tłowe punkty na pionowym zdjęciu lewym; $p^o = x_1^o - x_2^o$ – różnica odciętych tłowych punktu na pionowym lewym i prawym zdjęciu; c_k – stała kamery; B – długość bazy fotografowania w systemie współrzędnych terenowych.

Średni błąd określenia współrzędnych X,Y,Z można wyznaczyć poprzez obliczenie różniczek równań nr 3, 4,5. I tak formuła dZ na postać (Lobanow, 1984):

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

gdzie I – współczynnik zmiany skali;

$$b = \sqrt{1 + b_y^2 + b_z^2};$$

$$p_0 = p + c_k \Delta j - \frac{p^2}{c_k} j_1 + \frac{x_2^2}{c_k} \Delta j - \frac{x_2 y_2}{c_k} \Delta w + y_2 \left(\Delta k + \frac{p}{c_k} w_1 \right) - x_2 \left(\frac{\Delta H}{H} + 2 \frac{p}{c_k} j_1 \right);$$

$$\Delta H = b_z I, \quad H = c_k I.$$

Po przekształceniu wzoru 6 otrzymujemy:

$$m_Z^2 = \left(\frac{1}{I} \right)^2 m_I^2 + \left(\frac{1}{f} \right)^2 m_f^2 + \left(\frac{1}{p} \right)^2 m_{x_1}^2 + \left(\frac{1}{p} \right)^2 m_{x_2}^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{fp} \right)^2 m_w^2 + \left(\frac{f + x_1^2}{p} + \frac{x_1^2}{fp} \right) m_j^2 + \left(\frac{y_1}{p} \right) m_k^2 + \left(\frac{b_y}{b^2} - \frac{(x_1 - b) b_z b_y}{fb^3} \right) m_{b_y}^2 + \left(\frac{b_z}{b^2} + \frac{(x_1 - b)(b^2 - b_z^2)}{fb^3} \right) m_{b_z}^2$$

Z powyższych równań wydać, w jaki sposób błędy pomiarów oraz błędy estymacji elementów orientacji zdjęć wpływają na błąd współrzędnej Z. Z kolei ta teoretycznie określona wielkość wraz z drugim składnikiem zależnym od gęstości siatki punktów, zgodnie z wzorem 2, daje teoretyczną wielkość błędu interpolowanej współrzędnej Z.

Wnioski. Celem artykułu nie była odpowiedź wprost na pytanie: jaką dokładność ma Numeryczny Model Terenu pozyskanego metodami fotogrametrycznymi? Autorzy starali się przedstawić dyskusję na temat źródeł błędów wpływających na „jakość” NMT. Przedstawione w opracowaniu równania na błąd fotogrametrycznego wyznaczenia wysokości punktu uwzględniają wpływ błędów estymacji elementów orientacji zdjęć oraz pomiarów współrzędnych punktów homologicznych kolejnych etapów obliczenia

wielkości Z . Badania będą kontynuowane. Należy określić, które z wymienionych czynników mają decydujące znaczenie na wynik końcowy (NMT), a których wpływ można uznać za zaniedbywany. Przedstawiany i analizowany będzie rozkład tych teoretycznych błędów w obszarze NMT oraz ich wpływ na błędy ortofotomapy. Teoretyczne błędy będą też porównywane z różnicami między modelami terenu uzyskanymi różnymi metodami.

1. Ackermann F. *Technique and strategies for DEM generation. Digital photogrammetry: an addendum to the manual photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 1996. – P. 135–141.* 2. LOBANOW A. *Fotogrammetria, Nedra, Moskwa. – 1984. – P. 456–458.* 3. Paszotta Z. *Teoretyczne podstawy metody spasowania obszarów obrazów cyfrowych, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. –Kraków. – 2000. – Vol. 10 – Kalwaria Zebrzydowska, ISBN 83-906804-4-0.* 4. Paszotta Z., *Java i fotogrametryczne aplikacje internetowe. Geodezja, kartografija i aerofotoznimanija. ISSN 0130-1039. – 2005.* 5. Tumska O., Procyk M., Janczak W. *Wybór parametrów przy automatycznym tworzeniu numerycznego modelu rzeźby terenu z wykorzystaniem zdjęć lotniczych. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. – Kraków, 2004. Vol. 15. – S. 125–130, ISSN 83-915723-1-5.* 6. Höhle J., Potuckova, *Automated quality control for Orthoimage and Digital Terrain Model. – 2004. – <http://www.plan.auc.dk/~jh/articles/QualityControl.pdf>.*