

Renata Jędrzycka

## CYFROWA METODA BUDOWY NUMERYCZNEGO MODELU TERENU.

### Wprowadzenie.

Numerycznym modelem terenu (NMT) zwykle określa się funkcję  $Z=h(X,Y)$ , która punktom  $(X,Y)$  w przyjętym układzie współrzędnych terenowych, przyporządkowuje ich wysokości. W praktyce oznacza to, że aby go zbudować należy wyznaczyć pewien skończony zbiór trójek  $(X,Y,Z)$ . Współrzędne te można uzyskać poprzez:

- pomiary bezpośrednie w terenie,
- digitalizację istniejących map,
- pomiar fotogrametryczny ze zdjęć stereo.

Praca dotyczy ostatniego zagadnienia i przedstawia algorytm tworzenia NMT z pary zdjęć zapisanych cyfrowo. Realizowany on jest w całości na komputerze klasy PC.

Stosowane na świecie metody dopasowania odpowiadających sobie punktów na co najmniej dwóch zdjęciach autorzy jak np. Boochs F.(1992), czy Diehl, Heipke (1992) dzielą na trzy grupy:

1. poprzez korelacje obszarów,
2. dopasowanie punktów metodą najmniejszych kwadratów,
3. dopasowanie charakterystycznych cech obrazów.

W przedstawionym algorytmie wykorzystano metodę korelacji obszarów. Nie jest to metoda nowa w fotogrametrii. Już w 1976 r. Helava U.V. pisze o wyznaczaniu NMT (DTM- DigitalTerrain Model) z wykorzystaniem dwuwymiarowej korelacji obszarów w instrumentach fotogrametrycznych. Ostatnie lata przyniosły znaczny rozwój technik cyfrowych, co miało wpływ na problem komputerowego wyznaczania NMT ze zdjęć lotniczych. Znane tzw. Digital Photogrammetric Workstations posiadają wbudowany moduł wyznaczania DTM (NMT) np. firmy Eurosens (Loodts 1993) czy tzw. pakiety GIS-owskie jak np. Intergraph. Trudno jednak znaleźć publikacje, w których opisano by dokładnie stosowane algorytmy. Omawiany poniżej algorytm jest częścią, opracowanego w Instytucie Geodezji i

Fotogrametrii ART w Olsztynie, pakietu programów do przetwarzania zdjęć lotniczych. Napisano je w języku Borland C++ z biblioteką Win++ w środowisku Windows 3.x.

### Założenia teoretyczne algorytmu i kolejne jego etapy.

Stosować będziemy następujące kartezjańskie układy współrzędnych:

$x, y$  - współrzędne płowe punktu obrazu.

$X, Y, Z$  - współrzędne punktu w układzie terenowym.

Algorytm korzysta z dwóch zdjęć lotniczych, przetworzonych na postać cyfrową (zeskanowanych) zwanych dalej obrazami.  $I_1$  i  $I_2$ . Na obrazach dane powinny być położenia co najmniej 6 punktów kontrolnych o znanych współrzędnych w układzie terenowym. Niezbędne są one do wyznaczenia współczynników przekształceń rzutowych:

$$x = \frac{AX + BY + CZ + D}{EX + FY + GZ + 1}, \quad (1)$$

$$y = \frac{HX + IY + JZ + K}{EX + FY + GZ + 1}$$

Współczynniki takich przekształceń należy wyznaczyć dla obu obrazów  $I_1$  oraz  $I_2$ .

W celu określenia przekształcenia pomiędzy układami współrzędnych płowych obu obrazów estymuje się także współczynniki przekształcenia afinicznego.

Istotą metody jest odszukiwanie odpowiadających sobie obszarów na obu zdjęciach. Obszary te są kwadratami. Każdy taki obszar traktuje się jako otoczenie piksela znajdującego się w jego środku. Jako miarę podobieństwa obszarów przyjmuje się współczynnik korelacji

$$r = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (g_1^{(i)} - \bar{g}_1)(g_2^{(i)} - \bar{g}_2)}{\sum_{i=0}^{n-1} (g_1^{(i)} - \bar{g}_1) \sum_{i=0}^{n-1} (g_2^{(i)} - \bar{g}_2)} \quad (2)$$

gdzie:

$g_1, g_2$  - wartość z przestrzeni kolorów (odpowiedni poziom cyfrowy) odpowiadająca danemu pikselowi.

$\bar{g}_1, \bar{g}_2$  - średnie tych wartości, obliczane dla  $n$ -elementowego otoczenia danego piksela.

Algorytm kroczy po oczkach siatki obrazu  $I_1$ . Sprawdza zbiór informacji o otoczeniach. Kolejne elementy tego zbioru to 5-wymiarowe wektory. Pierwsza współrzędna określa wartość współczynnika korelacji, pozostałe cztery, to współrzędne pikseli na obu obrazach w ich układach współrzędnych tłowych. Informacje zawarte w zbiorze dotyczą obszaru wspólnego pokrycia dla obu obrazów, gdyż tylko w tym obszarze wyznaczany jest NMT.

Algorytm realizowany jest następująco.

W zbiorze informacji o otoczeniach zapisane zostają współrzędne tłowe wspólnych punktów kontrolnych wraz z obliczonym współczynnikiem korelacji. Następnie algorytm poszukuje odpowiedników dla sąsiednich, w stosunku do dopasowanych, oczek siatki. Korzysta ze współczynników przekształcenia afinicznego z informacji o dopasowaniu obszarów sąsiednich oraz wcześniej założonych granic na obrazie  $I_2$  w których może nastąpić dopasowanie.

Celem jest znalezienie obszaru najlepiej skorelowanego z otoczeniem na obrazie  $I_1$ , tzn. takiego którego współczynnik korelacji jest największy i przekracza z góry ustalony próg. W celu usprawnienia procesu obliczeń poszukiwania obszarów skorelowanych prowadzi się wzdłuż promieni rdzennych, gdyż znajomość kierunku prostej, na której powinien znaleźć się dopasowywany obszar znacznie skraca czas. Wartość współczynnika korelacji jest obliczana dla każdej zmiany położenia obszaru na obrazie  $I_2$ .

Niezwykle ważnym ale i skomplikowanym problemem, który decyduje o szybkości i efektywności algorytmu jest poruszanie się po oczkach siatki obrazu  $I_1$ . Po dopasowaniu wybranego otoczenia sprawdza się 8 sąsiednich otoczeń. Jeżeli otoczenie nie było w obszarze skorelowanym w poprzedniej iteracji (inne większe otoczenie) i ma wystarczająco duże wartości współczynnika korelacji to są zapamiętywane współrzędne środków dopasowanych obszarów. Do tego celu wykorzystuje się tymczasowy zbiór roboczy, dla którego przyjęto organizację stosu komputera. Algorytm "porusza" się wtedy wzdłuż drogi maksymalnych współczynników korelacji, pobierając w razie potrzeby dane ze "stosu" tak długo aż zbiór ten będzie pusty. Po wyczerpaniu "stosu" algorytm wraca na ostatnią pozycję siatki i startuje z nowym środkiem. W ten sposób dopasowanie otoczeń jest często wielokrotnie poprawiane.

Jeżeli w poprzedniej iteracji nastąpiło dopasowanie to przekazana informacja o współrzędnych pozwoli na szybsze i dokładniejsze dopasowanie mniejszego obszaru.

Kolejne iteracje ze zmniejszającą się wielkością otoczenia dają coraz gęstszą siatkę węzłów, dla których będzie można obliczyć współrzędne X,Y,Z.

Algorytm przeszukuje cały obszar obrazu automatycznie. Program przewiduje jednak możliwość ingerencji. Można ręcznie wskazać dodatkowe punkty startowe i po ich sprawdzeniu (obliczane są współczynniki korelacji) można dopisać je do zbioru informacji o otoczeniach.

Ostatecznie otrzymuje się zbiór informacji o otoczeniach odpowiadający regularnej siatki obrazu  $I_1$ .

Ponieważ przy ustalonym progu współczynnika korelacji nie wszystkie oczka siatki będą wypełnione można je po zakończeniu działania algorytmu w następnym etapie wypełnić. Brakujące wartości przyjmują wartości średnich ważonych z elementów sąsiednich (wagi obliczane są ze współczynników korelacji). Ta swego rodzaju filtracja jest realizowana przy przyjętej przez operatora wartości granicznej dla współczynnika korelacji.

Można teraz, mając wyestymowane współczynniki przekształceń rzutowych dla obu obrazów i współrzędne tłoowe odpowiadających sobie pikseli, będących środkami skorelowanych obszarów, wyznaczyć współrzędne terenowe  $X, Y, Z$ . Otrzymany w ten sposób zbiór współrzędnych terenowych tworzy siatkę nieregularną. Tworzy się także siatkę regularną stosując interpolację dwuliniową wartości  $Z$  dla jej węzłów.

### Praktyczna realizacja algorytmu.

Algorytm przetestowano na dwóch zdjęciach archiwalnych z okolic Olsztyna z roku 1964 wykonanych kamerą RC5 o pokryciu ok. 60%.

Wykorzystano odbitki stykowe w skali ok. 1:13500.

Zdjęcia zeskanowano na skanerze HPScanJetIIc w rozdzielczości 400 dpi co daje wielkość piksela w terenie ok. 1 m.

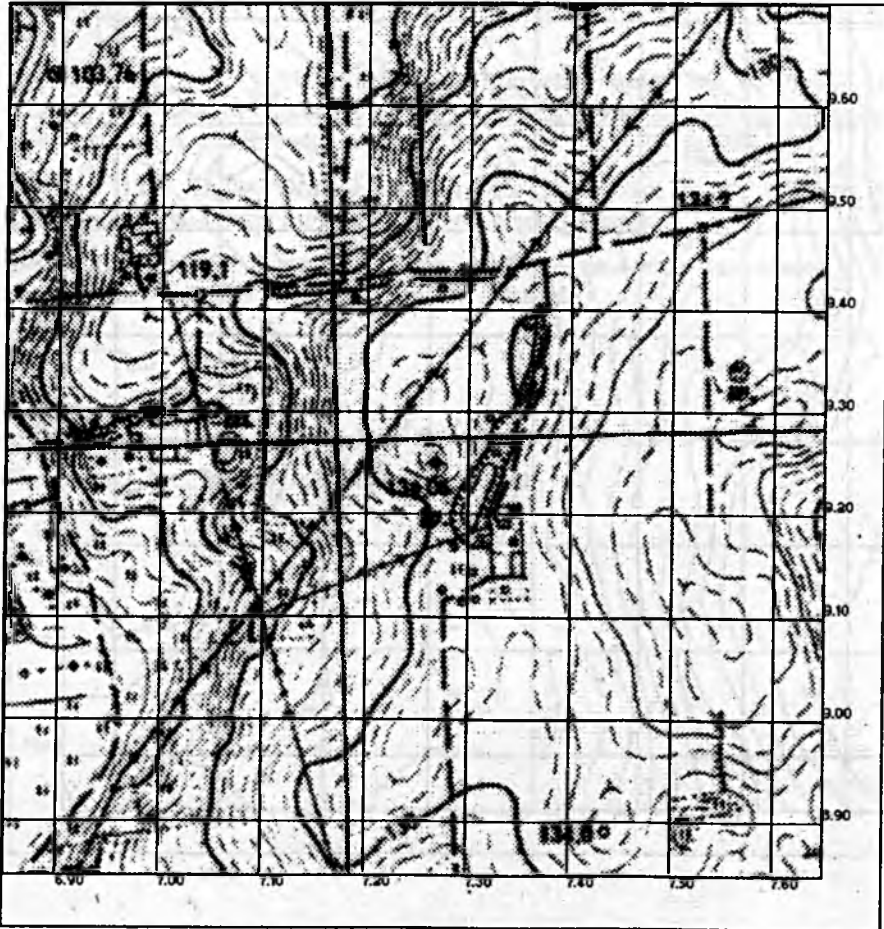
Otrzymano dwa obrazy cyfrowe  $I_1$  oraz  $I_2$ .

Maksymalne różnice wysokości punktów w terenie nie przekraczały 40m.

Zeskanowano także mapę tego terenu. Ponieważ dysponowano punktami kontrolnymi w lokalnym układzie terenowym, zatem ten układ przyjęto jako roboczy. Nie odpowiada to układowi mapy. Obraz mapy przekształcono jednak afinicznie. Otrzymany obraz po przekształceniu przedstawia rys. 1.

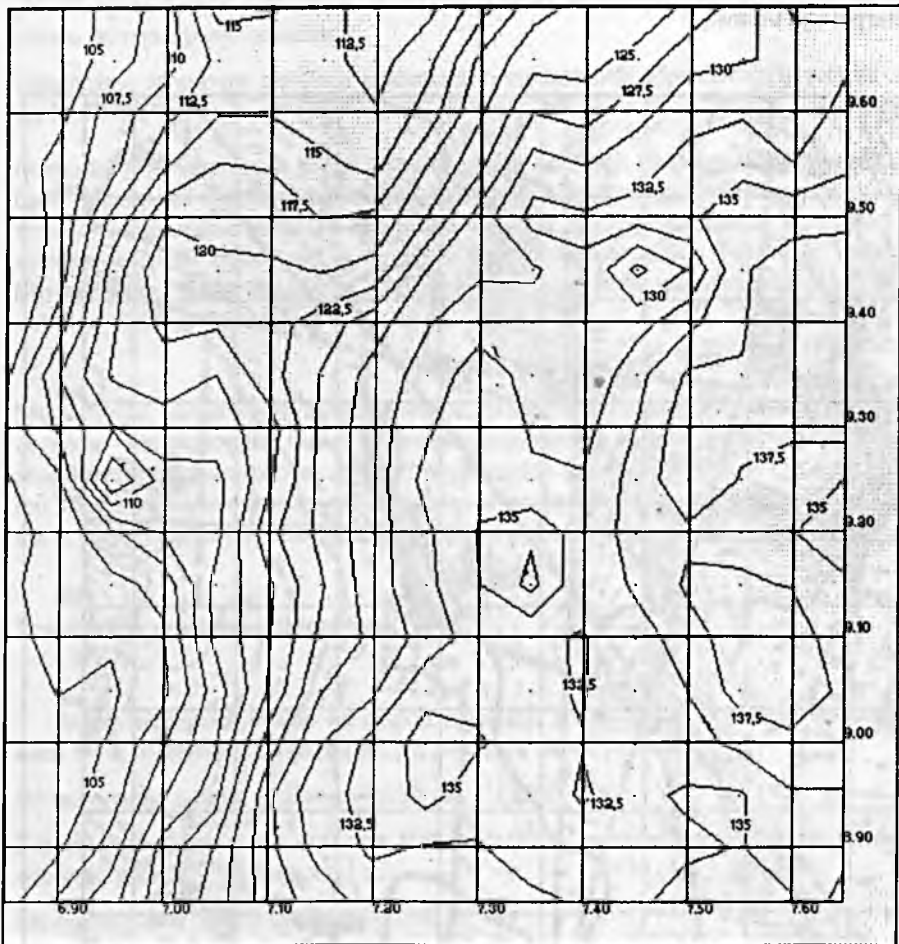
Wyestymowano współczynniki przekształceń rzutowych. Punkty te były punktami startowymi dla algorytmu generującego NMT opisanego wyżej. Na obrazie  $I_1$  przyjęto siatkę o wymiarach  $7 \times 7$  pikseli. Oznacza to, że najmniejszym skorelowanym obszarem mógł być obszar kwadratu o boku ok. 7 m co w skali 1:5000 daje ok. 1,4 mm. Proces powtarzano 5-krotnie przy wielkości boku kwadratu otoczenia 61, 51, 41,35 i 31 pikseli przy progu współczynnika korelacji 0,7. Dalsze próby zmniejszania boku prowadziły do znacznego powiększenia liczby obszarów nieskorelowanych.

Ostatecznie jako efekt końcowy przyjęto bok 31, co oznacza ok 30 m w terenie. Wykreowano NMT najpierw dla siatki nieregularnej dla tej wielkości boku, a następnie NMT dla siatki regularnej w układzie terenowym o boku 50m stosując interpolację liniową.



Rys.1 Fragment zeskanowanej mapy po przekształceniu afinicznym.

Wykreślono także warstwicę w tej siatce ze skokiem wysokości 2,5 m. Otrzymano obraz, który przedstawia rys.(2).



Rys.2 Warstwy wykreślone automatycznie na podstawie wygenerowanego NMT (skok 2,5 m) .

### Podsumowanie

Celem artykułu było jedynie przedstawienie działania algorytmu wyznaczania NMT metodą korelacji, który w całości jest realizowany na komputerze klasy PC. Ponieważ testowano go tylko na jednej parze zdjęć lotniczych nie przedstawiono tu analizy otrzymanych błędów. Prace takie jednak podjęto i będą one przedmiotem następnych publikacji. Z porównania z istniejącą mapą wynika, że dla obszarów

wielkości 30 m x 30 m w terenie i przy cięciu warstwicowym co 2.5 m uzyskano dużą zgodność położenia warstwic.

### **Piśmiennictwo**

Boochs F., 1992. Object space based correlation with additional information. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX, Com. III, pp. 127-132.

Diehl H., Heipke C., 1992. Surface Reconstruction from Data of Digital Line Cameras by Means of Object Based Image Matching. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX, Com. III, pp. 287-294.

Loodts J. 1993. Digital Orthophotos and GIS: The Perfect Couple. InfoMan '93. 2nd International Fair of Information Management. Gdańsk.

Helava U. V., 1976. Digital Correlation in Photogrammetric Instruments. XIII International Congress for Photogrammetry, Helsinki.

Recenzował: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Sikorski

Handwritten text at the top of the page, possibly a date or location.



Handwritten text below the grid, possibly a caption or description.

Handwritten text at the bottom of the page, possibly a signature or a note.