

**OCENA DOKŁADNOŚCI NMT INTERPOLOWANEGO NA PODSTAWIE
DANYCH POZYSKANYCH METODAMI FOTOGRAMETRYCZNĄ I GPS-RTK**

**ACCURACY EVALUATION OF DTM INTERPOLATED FROM DATA
ACQUIRED WITH PHOTOGRAMMETRIC AND GPS-RTK METHODS**

Piotr Gołuch, Grzegorz Józków

Institut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

SŁOWA KLUCZOWE: NMT, fotogrametria cyfrowa, GPS-RTK

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono analizę dokładności NMT zbudowanego na podstawie danych pozyskanych metodą fotogrametryczną i GPS-RTK. Obiektem badawczym był obszar o powierzchni ok. 50 km². Był to teren równinny, w przeważającej części użytkowany rolniczo. Dane GPS-RTK stanowił zbiór ponad 9 000 punktów. Czarnobiałe zdjęcia lotnicze w skalach 1:13 000 i 1:26 000 stanowiły podstawę do fotogrametrycznego opracowania NMT. W oparciu o pomierzone w terenie fotopunkty naturalne wyrównano na fotogrametrycznej stacji cyfrowej *ImageStation* blok 30 zdjęć - średni błąd pomiaru na zdjęciu po wyrównaniu wyniósł $\pm 4.6 \mu\text{m}$. Obszary leśne i porośnięte gęstymi zadrzewieniami wyłączono z pomiaru fotogrametrycznego. W oprogramowaniu *IS Automatic Elevation* określono w sposób automatyczny wysokości punktów w węzłach regularnej siatki o boku 15 m (punkty pomierzone wcześniej na zdjęciach półautomatycznie zostały włączone jako wartości inicjalne w trakcie automatycznego pomiaru). Powstały NMT został zweryfikowany. Punkty pomierzone bezpośrednio w terenie przyjęto jako bezbłędne i użyto do określenia dokładności NMT zbudowanego metodą fotogrametryczną. Z racji różnej dokładności pomiaru rzeźby terenu na zdjęciach w skalach 1:13 000 i 1:26 000 ocenę dokładności NMT wykonano oddzielnie w dwóch podobszarach. Porównując wysokości punktów interpolowanych z modelu z wysokościami punktów GPS-RTK, określono błąd NMT. W terenie odkrytym uzyskano dokładność NMT $\pm 0.21 \text{ m}$ ($0.08\text{‰} \cdot W$) w obszarze pokrycia zdjęciami w skali 1:13 000 i $\pm 0.28 \text{ m}$ ($0.07\text{‰} \cdot W$) w obszarze pokrycia zdjęciami w skali 1:26 000.

1. WPROWADZENIE

Wysokodokładny Numeryczny Model Teren (NMT), tzn. model o dokładności wysokościowej 20÷30 cm, można zbudować na podstawie danych pochodzących z różnych źródeł, np. bezpośrednich pomiarów terenowych, pomiaru na zdjęciach fotogrametrycznych, danych kartograficznych (mapy wielkoskalowe) lub specjalnie dedykowanemu dla tego celu lotniczemu skaningowi laserowemu. Zbudowanie takiego NMT było celem w opisywanym przedsięwzięciu. Zdecydowano się na budowę NMT z punktów pomierzonych w terenie techniką GPS-RTK i pomierzonych fotogrametryczną metodą cyfrową.

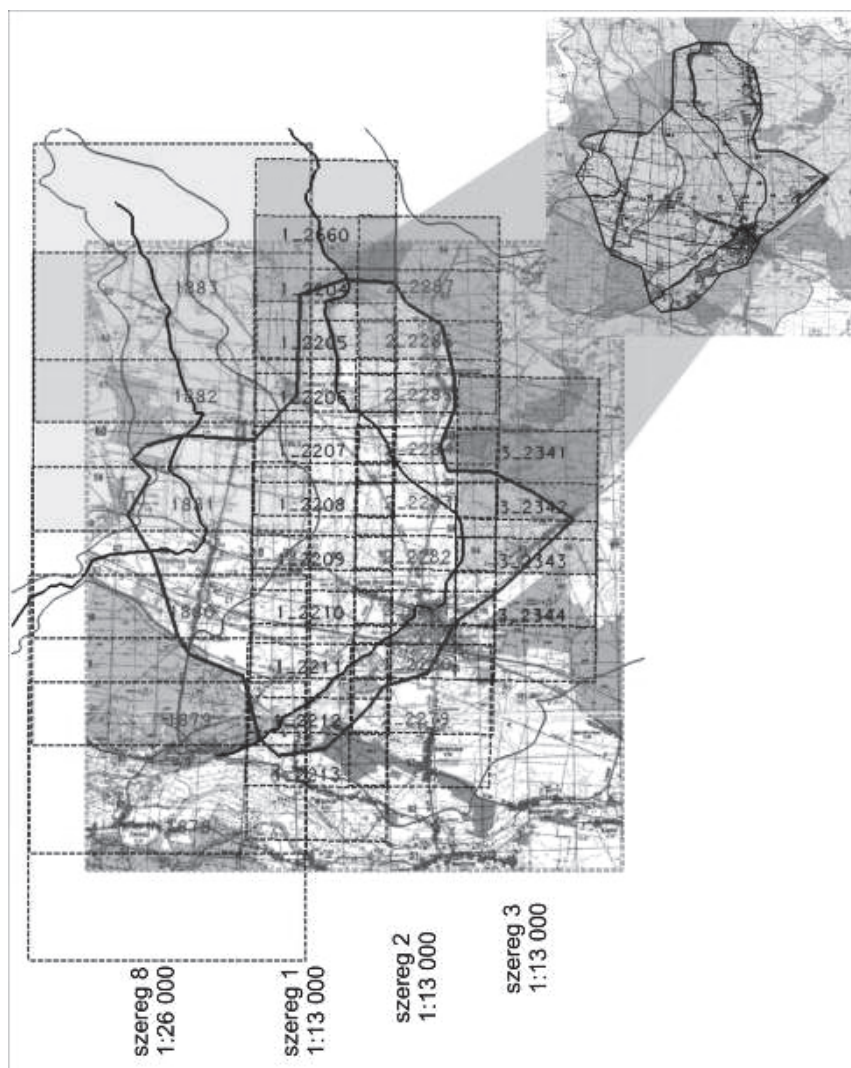
2. POZYSKANIE DANYCH ŹRÓDŁOWYCH I BUDOWA NMT

Obiektem badawczym jest obszar równinny o powierzchni około 52 km², w przeważającej części odkryty i użytkowany rolniczo. Jest to fragment zlewni dwóch rzek (potoków). Rysunek 1. ilustruje położenie obiektu badawczego oraz pokrycie terenu lotniczymi zdjęciami fotogrametrycznymi. Obiekt ma kształt nieregularny, jest lekko wydłużony w kierunku północ-południe, jego maksymalne rozpiętości to 10 km na 9.5 km. Całkowity obszar budowy NMT obejmował również teren poza wyznaczonymi granicami opracowania, jednak w tym terenie dokładność zbudowanego NMT jest mniejsza, gdyż dane pozyskiwane były głównie metodą kartograficzną, poprzez digitalizację warstw z mapy topograficznej w skali 1:10 000. Należy tu zaznaczyć, że prowadzona analiza dokładności NMT w dalszej części niniejszej pracy odnosi się tylko do zasadniczego obszaru opracowania.

2.1. Pomiar GPS-RTK

Pomiar GPS-RTK wykonano przy zastosowaniu następującego sprzętu (rys. 2.): stacją bazową był odbiornik *Ashtech Z-FX* z anteną ASH700936D_M, natomiast stacjami ruchomymi (*rovers*) były dwa odbiorniki *Ashtech ZXtreme* z antenami ASH701975.01A (jeden z odbiorników i antena zamontowane były na samochodzie terenowym Mitsubishi L200, wypożyczonym od zaprzyjaźnionej firmy geodezyjnej). Łączność pomiędzy stacją bazową a odbiornikami ruchomymi, w celu przesyłania poprawek RTK, była zapewniona poprzez modemy radiowe SATEL 3AS. Antena radiomodemu przy stacji bazowej była zamontowana na maszcie na wysokości ok. 4 m nad terenem. Pomiar przeprowadzone zostały w nawiązaniu do osnowy państwowej I klasy (punkt „I” na rysunku 3.). Pomierzone wysokości elipsoidalne zostały przeliczone do układu wysokości normalnych Kronsztadt 86 przy zastosowaniu oprogramowania UNITRANS, w którym uwzględniony jest model geoidy 2002. To oprogramowanie zostało również wykorzystane do przeliczenia współrzędnych z układu ETRF’89 do PUWG92. Dodatkowo w trakcie pomiaru wykonywano (28 razy) kontrolne pomiary wysokościowe na dziesięciu reperach (wysokościowej osnowy szczegółowej III klasy), równomiernie rozmieszczonych na obszarze opracowania. Średni błąd pomiaru wysokości (w odniesieniu do wysokości katalogowych tych reperów) wyniósł ± 0.010 m. Świadczy to o poprawnym dopasowaniu wysokości punktu poziomej osnowy podstawowej I klasy i wysokościowej szczegółowej osnowy III klasy istniejącej w obszarze opracowania, o dobrym modelu geoidy niwelacyjnej na badanym obszarze oraz o bardzo dobrym jakościowo pomiarze GPS.

W terenie wykonano również szereg testów dla zestawu GPS zamontowanego na samochodzie, dzięki którym stwierdzono, że różnice pomiaru wysokości punktów, gdy samochód najedzie na wysoką bruzdę, kamień bądź jakąś inną nierówność terenu, różnią się maksymalnie do 0.10 m w stosunku do sytuacji, gdyby teren był płaski (średnia wartość to 3÷4 cm). Testy te potwierdziły, że wybór samochodu oraz miejsca montowania anteny były odpowiednie.



Rys. 1. Obiekt badawczy oraz pokrycie terenu lotniczymi zdjęciami fotogrametrycznymi

Pomiar terenowy techniką GPS punktów do budowy NMT był przeprowadzony w miesiącach wrzesień, październik i listopad 2007 roku (razem 6 dni pomiarowych), przez zespół kierowany przez mgr. inż. Jana Kapłona, pracownika naszego Instytutu. Razem pomierzono zestawem GPS-RTK, zamontowanym na samochodzie ponad 9 600 punktów. Zastosowany zestaw GPS-RTK pozwolił na wykonanie pomiaru w promieniu średnio do ok. 4 km od stacji bazowej. Odległość ta była ściśle związana z konfiguracją terenu, jak również z faktem występowania przysłonięcia horyzontu przez zadrzewienia i obszary leśne. Na rysunku 3. przedstawiono lokalizację stacji bazowej (punkty *I*, *A*, *B*, *C* i *D*) oraz rozmieszczenie punktów pomierzonych mobilnym zestawem GPS-RTK zamontowanym na samochodzie.



Rys. 2. Zestaw sprzętu GPS RTK wykorzystany w trakcie pomiaru



Rys. 3. Lokalizacja położenia stacji bazowych oraz wizualizacja rozmieszczenia punktów pomierzonych techniką GPS-RTK

2.2. Pomiar fotogrametryczny

Pomiar fotogrametryczny został wykonany metodą cyfrową przy zastosowaniu fotogrametrycznej stacji ImageStation ZIV. Obszar opracowania pokryty jest czarno-białymi zdjęciami lotniczymi wykonanymi w latach 2003-2004. Są to zdjęcia w skalach 1:13 000 (ok. 80% obszaru opracowania) i 1:26 000. Parametry zdjęć zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry zdjęć lotniczych wykorzystanych w projekcie

skala zdjęć	1:13 000	1:26 000
nazwa kamery	LMK2000	RC20
stała kamery – f_k [mm]	211.02	153.36
wysokość fotografowania W [m]	2 750	4 000
rozdzielczość skanowania [μm]	14 μm	
liczba szeregów / zdjęć [sztuk]	3 / 24	1 / 6

Zdjęcia zostały zakupione w CODGiK w Warszawie, gdzie były zeskanowane na skanerze fotogrametrycznym z rozdzielczością 14 μm .

Spodziewana dokładność NMT zbudowanego na podstawie pomiaru automatycznego, określona na podstawie prowadzonych różnych prac eksperymentalnych (Kurczyński, 1998) wynosi w terenie odkrytym i płaskim ok. 0.1‰ W, tj. dla zdjęć 1:26 000 – ok. 0.4 m, zaś dla zdjęć 1:13 000 ok. 0.3 m.

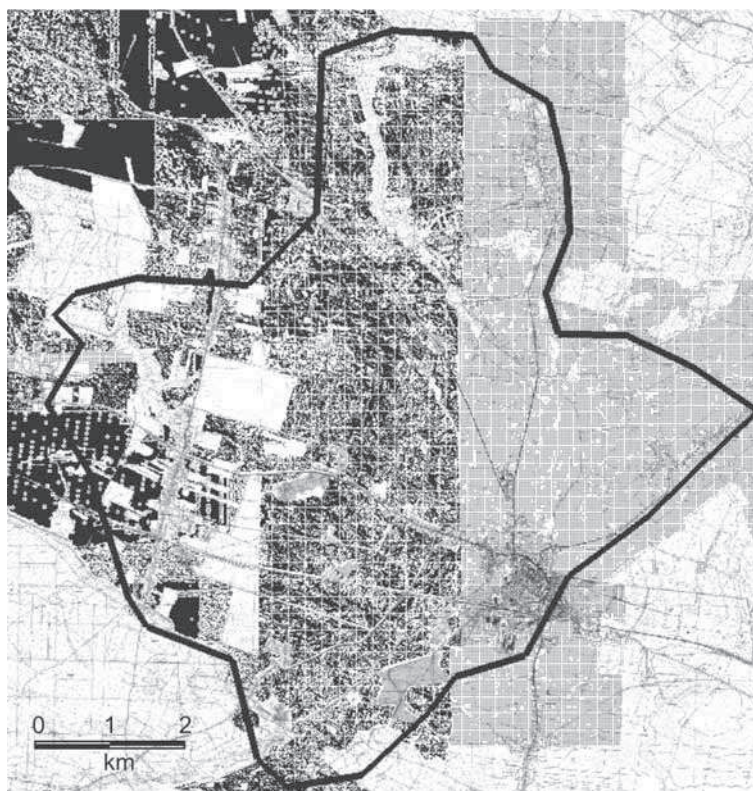
Pierwszym zasadniczym krokiem w opracowaniu zdjęć lotniczych, oczywiście po założeniu projektu, był etap orientacji, a szczególnie aerotriangulacji bloku zdjęć. Ponieważ założeniem było bardzo mocne usztywnienie sieci aerotriangulacyjnej, dlatego też półautomatycznie (ze wspomaganie korelatora obrazu) pomierzono naturalne fotopunkty w ilości 285. Były to punkty dobrze identyfikowalne na zdjęciach, wyselekcjonowane spośród ponad 900 punktów pomierzonych drugim zestawem ruchomym GPS-RTK (zestaw ten służył do pomiaru punktów sytuacyjnych). W wyniku rozwiązania aerotriangulacji uzyskano średni błąd pomiaru na zdjęciu $\sigma = 4.7 \mu\text{m}$, natomiast średni błąd pomiaru fotopunktów i punktów kontrolnych M_x , M_y , M_z odpowiednio $\pm 0.133 \text{ m}$, $\pm 0.132 \text{ m}$, $\pm 0.106 \text{ m}$.

Po rozwiązaniu aerotriangulacji zdefiniowano z sąsiednich zdjęć modele, wygenerowano dla poszczególnych modeli obrazy epipolarnie, a następnie na poszczególnych stereomodelach rozpoczęto pomiar punktów do budowy NMT. W pierwszej kolejności pomierzono linie nieciągłości występujące wzdłuż potoków, rowów i dróg. W drugiej kolejności, z uwagi na fakt, że teren jest w przeważającej części użytkowany rolniczo i struktura obrazu poszczególnych działek jest mało urozmaicona, zdecydowano się pomierzyć półautomatycznie punkty rozproszone, które zostały włączone wraz z pomierzonymi liniami nieciągłości, do automatycznego procesu pomiaru punktów w programie *IS Automatic Elevation* (ImageStation, 2004).

2.3. Budowa NMT

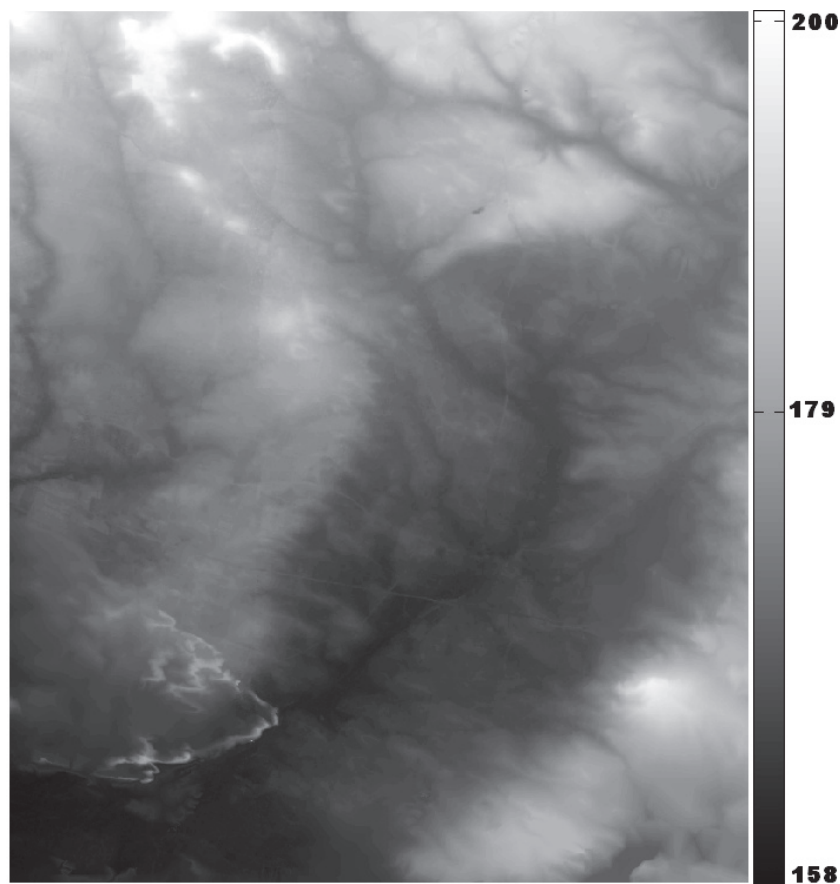
Dane do budowy NMT stanowiły zarówno punkty pomierzone zestawem GPS-RTK umieszczonym na samochodzie, jak i punkty pochodzące z pomiaru fotogrametrycznego. Dodatkowo przy budowie NMT uwzględniane były linie

strukturalne pomierzone techniką GPS-RTK i metodą fotografometryczną. Zarówno punkty pomierzone bezpośrednio w terenie jak i wygenerowane w oprogramowaniu należało zweryfikować. Dla punktów GPS-RTK weryfikacja polegała na wybraniu tych punktów, dla których błąd pomiaru wysokości nie przekraczał 0.2 m. Kryterium to spełniało prawie 9 000 punktów, co stanowiło około 92 % wszystkich pomierzonych punktów GPS-RTK. Dla punktów z pomiaru fotografometrycznego weryfikacja danych polegała w pierwszej kolejności na połączeniu zbiorów punktów wygenerowanych na stereomodelach i usunięciu nadmiaru punktów z pokryć pomiędzy stereomodelami. Następnie wyselekcjonowano obszary, dla których należy usunąć punkty pomierzone automatycznie na stacji fotografometrycznej. Obszarami takimi były tereny, na których występowały zwarte oraz wysokie elementy pokrycia terenu, np. tereny zurbanizowane z wysoką zabudową, obszary leśne oraz zadrzewione, pola uprawne, na których występowała wysoka roślinność (takie pola występowały na zdjęciach 1:26 000). W wyniku przeprowadzonej weryfikacji do budowy NMT użyto około 273 000 punktów wygenerowanych na podstawie zdjęć lotniczych (rysunek 4).



Rys. 4. Wizualizacja rozmieszczenia punktów pomierzonych fotografometrycznie

Na podstawie tak przygotowanych danych w oprogramowaniu *IS DTM Collection* utworzono nieregularny model TIN, który wtórnie przekształcony został do modelu GRID, dla którego bok kwadratu wyniósł 15 m (utworzony NMT przedstawiony jest na rysunku 5).



Rys. 5. Wizualizacja utworzonego NMT

3. OCENA DOKŁADNOŚCI ZBUDOWANEGO NMT

Ocena dokładności zbudowanego NMT polegała na porównaniu wysokości punktów pomierzonych bezpośrednio w terenie z wysokościami wyinterpolowanymi z modelu.

Pomiary terenowe prowadzone były dwoma odbiornikami ruchomymi GPS-RTK, natomiast do budowy NMT użyto punkty pomierzone tylko jednym zestawem (zamontowanym na samochodzie). Drugim odbiornikiem mierzone były szczegóły sytuacyjne. Szczegóły, które znajdowały się bezpośrednio na powierzchni terenu, nie będące jednocześnie wyselekcjonowanymi fotopunktami oraz dla których błąd pomiaru wysokości nie przekraczał 3 cm, przyjęte zostały jako punkty referencyjne. Z racji dużo większego błędu pomiaru wysokości na zdjęciach i pierwszym zestawem GPS-RTK, przyjęto, że punkty referencyjne pomierzone są bezbłędnie. Lokalizację 516 punktów referencyjnych przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Punkty referencyjne („x” dla zdjęć w skali 1:13 000, „+” dla zdjęć w skali 1:26 000)

Z racji różnych błędów pomiaru wysokości na zdjęciach w skalach 1:13 000 i 1:26 000, ocenę dokładności zbudowanego NMT dokonano odpowiednio w dwóch obszarach, które pokryte były odpowiednio zdjęciami w wymienionych powyżej skalach. W punktach referencyjnych obliczono różnice wysokości pomiędzy punktami interpolowanymi z modelu a pomierzonymi bezpośrednio w terenie. Na podstawie uzyskanych wartości obliczono błędy NMT - m_{NMT} . Wyniki oceny dokładności zestawiono tabelarycznie poniżej (tabela 2).

Tabela 2. Wyniki oceny dokładności NMT

skala zdjęć	1:13 000	1:26 000
liczba punktów referencyjnych	452	64
średnia różnic [m]	-0.03	0.03
średnia różnic bezwzględnych [m]	0.15	0.18
błąd NMT- m_{NMT} [m]	0.21	0.28
liczba punktów z różnicą większą od dwukrotnego błędu NMT	25	4

4. PODSUMOWANIE

W prezentowanej pracy przedstawiono ocenę dokładności numerycznego modelu terenu powstałego z danych pochodzących z pomiaru fotogrametrycznego i bezpośredniego pomiaru terenowego metodą GPS-RTK. NMT został zbudowany z użyciem oprogramowania cyfrowej stacji fotogrametrycznej ImageStation. Oceny dokładności stworzonego w ten sposób modelu dokonano w oparciu o niezależny pomiar terenowy GPS-RTK. Pozyskanych w ten sposób 516 punktów stało się danymi referencyjnymi, z którymi porównany został zbudowany NMT. Oceny dokładności dokonano w dwóch podobszarach pokrytych przez zdjęcia w skalach 1:13 000 i 1:26 000.

Wyniki uzyskane na podstawie porównania wysokości punktów referencyjnych (uznanych jako bezbłędne) z wysokościami interpolowanymi z modelu świadczą o dużej dokładności NMT. Błąd zbudowanego NMT w obszarze pokrycia zdjęciami w skali 1:13 000 wynosi 0.21 m, a w obszarze pokrycia zdjęciami w skali 1:26 000 wynosi 0.28 m, co stanowi około 0.075‰ wysokości lotu. Dzięki wykorzystaniu dużej liczby fotopunktów możliwe było rozwiązanie aerotriangulacji w bloku 30 zdjęć z średnim błędem pomiaru na zdjęciu po wyrównaniu wynoszącym 4.7 μ m. Nadmiarowa liczba fotopunktów (szczególnie Z-punktów) pozwoliła w znacznym stopniu usztywnić stworzoną sieć aerotriangulacyjną.

Podniesienie dokładności zbudowanego modelu możliwe było dzięki uwzględnieniu półautomatycznie pomierzonych punktów terenu oraz dołączeniu linii strukturalnych w procesie tworzenia NMT (Ackermann, 1996). W oprogramowaniu ImageStation linie strukturalne mogą być wzięte pod uwagę zarówno na etapie generowania punktów terenu na podstawie zdjęć lotniczych, jak i na etapie budowy NMT.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że prezentowana technologia budowy NMT, polegająca na połączeniu pomiaru fotogrametrycznego i mobilnego GPS-RTK, może być z powodzeniem stosowana w terenach użytkowanych rolniczo.

5. LITERATURA

Ackermann F., 1996. *Techniques and strategies for DEM generation*. Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry, ASPRS, s. 135-141.

ImageStation, 2004. *User's Guide*, Huntsville, Alabama.

Kurczyński Z., 1998. *Technologiczne uwarunkowania budowy numerycznego modelu rzeźby terenu*. Biuletyn informacyjny GUGiK, Warszawa, Tom II/1, s. 10-16.

**ACCURACY EVALUATION OF DTM INTERPOLATED FROM DATA
ACQUIRED WITH PHOTOGRAMMETRIC AND GPS-RTK METHODS**

KEY WORDS: DTM, digital photogrammetry, GPS-RTK

Summary

Precise Digital Terrain Model (DTM), i.e., a model of high (20÷30 cm) accuracy can be built with data which come from miscellaneous sources, e.g., direct field measurements, measurements on photogrammetric images, cartographic data (large scale maps) or airborne laser scanning performed with the purpose of DTM building.

In this work, analysis of DTM correctness is presented. The DTM was built based on photogrammetric and GPS-RTK data. The object of study was a terrain of an about 50 km² area. It was a flat rural area with maximum height difference of about 35 m. The GPS-RTK data formed a set of more than 9 000 points, collected using an Ashtech Z-Xtreme GPS receiver. Reference corrections were transmitted from a base station placed on the class II point of the national geodetic network. Black and white airborne photos taken in 2003-2004 to the scale of 1:13 000 (flight height of about 2 750 m) and to the scale of 1:26 000 (flight height of about 4 000 m) formed the basis for photogrammetric development of DTM. The images were acquired from CODGiK in Warsaw. The natural photogrammetric control points measured in the terrain, forming a set of 30 images, were adjusted using an ImageStation digital photogrammetric station. The RMS of the measurements taken from the images was, after adjustment, ±4.6 μm.

Because the rural area photographed varied only little, semi-automatic measurements (9 205 points) were carried out prior to generation of full-automatic DTM points. A forested terrain and terrains covered by dense vegetation were excluded from photogrammetric measurements. At the next step, the heights of points in a regular 15 m GRID were automatically evaluated using the IS Automatic Elevation software (the points measured semi-automatically in the photos were included in the automatic process as the initial values). The DTM generated this way was manually verified: the wrong measured points which were not terrain points (roofs of buildings, high vegetation) were eliminated.

The points acquired in field measurements were accepted as error-free points and used to evaluate the accuracy of the DTM built based on photogrammetric measurements. Evaluation of the DTM accuracy was carried out separately in two sub-areas because topographic measurements taken from images to the scales of 1:13 000 and 1:26 000 differed in accuracy. The DTM's RMS was determined by comparing point heights: points interpolated from the model were compared with the GPS-RTK points. In the uncovered terrain (without dense shrubbery and forest), the RMS of DTM was 0.21 m (0.08‰·W) and 0.28 m (0.07‰·W) in the area covered by photographs to the scales of 1:13 000 and 1:26 000, respectively.

dr inż. Piotr Gołuch,
e-mail: goluch@kgf.ar.wroc.pl

mgr inż. Grzegorz Józków
e-mail: jozkow@kgf.ar.wroc.pl
tel. 071 3205 693, 071 3201 951
fax: 071 3205 617