

Urszula Babiarcz*

ANALIZA DOKŁADNOŚCI NUMERYCZNEGO MODELU POWIERZCHNI TOPOGRAFICZNEJ GENEROWANEGO Z WYKORZYSTANIEM FOTOGRAMETRYCZNYCH STACJI CYFROWYCH**

1. Wprowadzenie

Postęp dokonujący się w ostatniej dekadzie w dziedzinie techniki cyfrowej, a zwłaszcza wzrost mocy obliczeniowej komputerów, przyczynił się do dynamicznego rozwoju technologii fotogrametrycznych. Pierwsze fotogrametryczne stacje cyfrowe DVP [1], Leica DSW 100 [2] i VSD AGH [3] zostały zaprezentowane w 1992 roku na kongresie Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji w Waszyngtonie. Od tego czasu stacje cyfrowe zostały znacznie udoskonalone. Zyskują coraz większą popularność wynikającą ze znacznego stopnia automatyzacji i redukcji czasu pracy operatora. Początkowo stacje cyfrowe umożliwiały pomiar numerycznego modelu powierzchni topograficznej (NMPT) sposobem manualnym. Obecnie pojawiają się coraz większe możliwości zastosowania programów służących do automatycznego generowania wysokościowego modelu terenu, opartych na korelacji obrazów. Zaletą tych metod jest duże zagęszczenie punktów pomiarowych, przy równoczesnej redukcji czasu pozyskiwania danych. Główny problem to konieczność stosowania odpowiednich procedur filtrujących, które wyeliminują punkty nie przynależne do powierzchni topograficznej.

Niniejsze opracowanie ma na celu porównanie dokładności NMPT uzyskanych przy wykorzystaniu dwóch stacji cyfrowych: VSD (Video Stereo Digitizer) i ImageStation. W pierwszym etapie przeprowadzono pomiar sposobem manualnym. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę dla oceny metody automatycznej, której wiarygodność na obecnym etapie rozwoju technologicznego stanowi jeszcze kwestie sporną.

Na błąd całkowity NMPT składają się dwa czynniki [4] : błąd pomiaru stereoskopowego i błąd reprezentatywności danych, zmieniający się w zależności od gęstości punktów siatki pomiarowej, użytej metody interpolacji i ukształtowania terenu.

* Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

** Praca wykonana w ramach badań statutowych

W opisywanym doświadczeniu skupiono się wyłącznie na błędzie reprezentatywności, a mówiąc ściśle na wpływie wykorzystanej metody interpolacji i ukształtowania terenu na dokładność wynikowego NMPT. Wyznaczenie parametrów reprezentatywności jest najbardziej frapującym zagadnieniem przy omawianiu dokładności NMPT. Problem ten był przedmiotem artykułów z dziedziny fotogrametrii [5] [6], także w piśmiennictwie kartograficznym pojawiły się interesujące badania poszczególnych metod [7].

2 Organizacja pola testowego

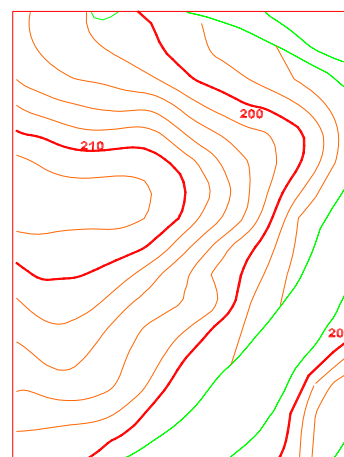
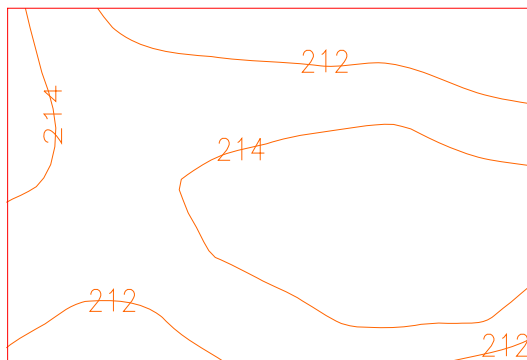
Materiał wykorzystany do analizy to blok kolorowych diapozytywów zdjęć lotniczych, wykonanych kamerą szerokokątną na obiekcie Baltimore w Stanach Zjednoczonych. Skala zdjęć to wg nomenklatury amerykańskiej 1'': 500' (inch to ft – cali do stóp), czyli 1: 6000, wysokość lotu $H = 3500$ ft , czyli około 1067 m.

Do doświadczenia użyto pojedynczego stereogramu złożonego ze zdjęć nr 1508 i 1509. Obszar modelu o powierzchni 661 m² stanowią głównie pola uprawne z pojedynczymi domami, tereny zalesione to zaledwie 15% powierzchni. Teren charakteryzuje się urozmaiconą rzeźbą, o nachyleniach małych i średnich. Powierzchnia jest generalnie ciągła o obłych formach terenowych, pozbawiona uskoków.

2.1 Charakterystyka badanych powierzchni topograficznych

Do szczegółowych badań doświadczalnych zostały przyjęte dwa fragmenty powierzchni modelu. Pierwszy fragment (nazwijmy go umownie A) jest to teren względnie płaski – pola uprawne o maksymalnym nachyleniu 1.5°. Drugi (umownie B), również obejmujący tereny uprawne, charakteryzuje się spadkiem powyżej 4°. Warstwicowe przedstawienie obydwu powierzchni nakreślone jest odpowiednio na rysunkach 2.1 i 2.2.

Tak wybrane fragmenty posłużyły do wyznaczenia zależności między zmiennością ukształtowania terenu a dokładnością NMPT.



Rysunek 2. 1 Rysunek warstwiczny powierzchni testowej A o wymiarach terenowych 130×240 m.

Rysunek 2. 2 Rysunek warstwiczny powierzchni testowej B o wymiarach terenowych 390×250 m.

2.2 Konstrukcja zbioru punktów pomiarowych

Konstrukcja zbioru punktów pomiarowych obejmowała trzy etapy:

- rejestrację punktów w siatce w przybliżeniu regularnej o odstępnie 25m.,
- rejestrację linii strukturalnych i linii nieciągłości,
- wyznaczenie obszarów wyłączonych z badań z powodu utrudnionego pomiaru (tereny gęstego lasu),

Ogółem na pojedynczym stereogramie pomierzono około 1500 punktów. W przypadku charakterystycznych form morfologicznych wprowadzono dodatkowo linie nieciągłości i linie strukturalne. Obszary o ograniczonym widzeniu stereoskopowym zostały wyłączone z opracowania, aby nie wprowadzały błędów grubych.

Punkty to posłużyły do wyinterpolowania nowej siatki regularnej o odstępnie 10 m., której dokładność została poddana analizie statystycznej.

2.3 Konstrukcja zbioru punktów kontrolnych

W omawianym doświadczeniu usytuowanie punktów kontrolnych odpowiadało usytuowaniu wybranych punktów wyinterpolowanych. Punkty te zostały wyznaczone podczas pomiaru fotogrametrycznego celem ustalenia błędów szcążkowych na punktach wyinterpolowanych. Punkty kontrolne są faktycznymi reprezentantami powierzchni topograficznej i mogą być traktowane jako „prawda terenowa”. Dla każdego fragmentu powierzchni topograficznej (A i B) zdecydowano się wyznaczyć zbiór około 150 punktów.

Jest oczywiste, że włączenie do analizy większej ilości punktów kontrolnych będzie prowadzić do bardziej niezawodnych wyników. Wiąże się to jednak z dużym nakładem pracy i wzrostem kosztów. Powstaje więc pytanie: jaka jest minimalna liczba punktów konieczna do otrzymania wymaganego stopnia wiarygodności ?

2.3.1 Badanie niezawodności zbioru punktów kontrolnych

W omawianym doświadczeniu zmienna losowa to wartość DH – błąd szcążkowy na punktach kontrolnych. Oczywiste jest, że rozmiar próbki punktów kontrolnych będzie miał znaczący wpływ na estymację wartości średniej błędów szcążkowych i odchylenia standardowego.

Wpływ wielkości próbki na dokładność estymacji wartości średniej \bar{x}

Celem ustalenia wpływu wielkości próbki na dokładność estymacji wartości średniej \bar{x} można wykorzystać poniższą teorię [8].

Oznaczmy przez \bar{x} uzyskaną wartość średnią zmiennej losowej DH z próby o rozmiarze n , zaś przez μ – wartość średnią z populacji. \bar{x} można wyrazić ilością jednostek odchylenia standardowego, o którą wartość ta odchyliła się od prawdziwej średniej [9]:

$$\bar{x} = \mu + Y \cdot \sigma(\bar{x}) \quad (2.1)$$

gdzie:

μ – prawdziwa wartość średnia,

Y – zmienna standaryzowana,

$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ – błąd standardowy wartości średniej z próby, (σ – błąd standardowy populacji)

[6]

Stąd:

$$Y = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (2.2)$$

jest zmienną standaryzowaną o rozkładzie w przybliżeniu normalnym $N(0,1)$, gdy wartość n jest wystarczająco wysoka.

Statystykę tę można wykorzystać do wyznaczenia przedziału ufności dla parametru μ :

$$P(-y_\alpha \leq Y \leq y_\alpha) = 1 - \alpha \quad (2.3)$$

Przekształcając dwa powyższe równania otrzymano:

$$P(\bar{x} - y_\alpha \cdot \sigma / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{x} + y_\alpha \cdot \sigma / \sqrt{n}) = 1 - \alpha \quad (2.4)$$

Zakres $\bar{x} \pm S$ (gdzie $S = y_\alpha \cdot \sigma / \sqrt{n}$ = stopień dokładności estymowanej średniej \bar{x}) wewnątrz którego leży wartość średnia μ nazwany jest przedziałem ufności tej zmiennej.

Przekształcając wzór wyrażający stopień dokładności estymowanej średniej otrzymano wzór wyrażający minimalną wielkość próbki:

$$n = \frac{y_\alpha^2 \cdot \sigma^2}{S^2} \quad (2.5)$$

gdzie:

σ – oszacowane odchylenie standardowe,

y_α – wartość graniczna wewnątrz której leżą wartości zmiennej Y z prawdopodobieństwem $(1 - \alpha)$; wartości jej znajdują się w tabelach statystycznych dla rozkładu $N(0,1)$,

S – dany stopień dokładności dla estymowanej wartości średniej,

Wpływ wielkości próbki na dokładność estymacji odchylenia standardowego σ

Celem ustalenia wpływu wielkości próbki na dokładność estymacji odchylenia standardowego σ wykorzystano zależność [10] :

$$\text{VAR}(\sigma) = \text{VAR}(DH) / 2(n-1) \quad (2.6)$$

gdzie:

$\text{VAR}(\sigma)$ – wariancja odchylenia standardowego błędów szacunkowych,

$\text{VAR}(DH)$ – wariancja błędów szacunkowych DH ,

n – liczba punktów,

Otrzymano wartość procentową wyrażającą niezawodność estymowanego odchylenia standardowego:

$$R(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot (n-1)}} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

gdzie:

$R(\sigma)$ – wymagana niezawodność odchylenia standardowego (wyrażona w procentach),

Przekształcając równanie (2.7) wyznaczono formułę wyrażającą minimalny rozmiar próbki:

$$n = \frac{1}{2 \cdot R^2(\sigma)} + 1 \quad (2.8)$$

W praktyce często stosuje się przybliżenie powyższego równania:

$$n = \frac{1}{2 \cdot R^2(\sigma)} \quad (2.9)$$

Dokładność estymowanych parametrów dla wybranej próbki

W pierwszym etapie, wykorzystując równanie (2.5), przeanalizowano wpływ liczebności próby na oszacowanie wartości średniej.

Przyjęto następujące założenia:

$$y_{(\alpha=0,05)} = 1.960 ;$$

Nieznaną wartość σ została oszacowana z wylosowanej wcześniej małej próbki wstępnej:

$$\sigma = 0.22 \text{ m};$$

Dla ustalonej wartości $n = 150$ otrzymano:

$$S = 0.035 \text{ m}$$

gdzie:

S – dany stopień dokładności dla estymowanej średniej,

W kolejnym etapie korzystając ze wzoru (2.7) określającego procentową wartość wiarygodności estymowanego odchylenia standardowego dla próby o rozmiarze n otrzymano:

$$R(\sigma) = 5.8 \%$$

Powyższe wyniki pozwalają stwierdzić, że próba o liczebności 150 punktów, zapewnia wystarczającą wiarygodność estymowanych parametrów.

3 Analiza dokładności NMPT uzyskanych sposobem manualnym

3.1 Procedura testowa

Pomiar manualny przeprowadziłam na dwóch stacjach cyfrowych: ImageStation firmy Intergraph i VSD opracowanym w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej Akademii Górniczo – Hutniczej.

Bazując na punktach pomiarowych (podrozdział 2.2) wyinterpolowano siatkę regularną o odstępnie 10 m. Rozpatrywano oddzielnie fragment powierzchni topograficznej o względnie płaskim nachyleniu (teren A) i fragment o większym spadku (teren B). Dla każdego fragmentu powierzchni topograficznej wyznaczono zbiór punktów kontrolnych o liczebności 150 punktów. Poprzez porównanie punktów w wyinterpolowanej siatce regularnej z punktami kontrolnymi określono zbiór odchyłek szczytkowych DH dla każdego fragmentu powierzchni topograficznej. Na ich podstawie przeprowadzono ocenę dokładności, wyznaczając:

- średni błąd kwadratowy, świadczący o dokładności odzwierciedlenia powierzchni topograficznej

$$RMSE = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n DH^2}{n}} \quad (3.1)$$

gdzie:

$DH = (z_I - z_K)$ – wartość określana często jako błąd szczytkowy lub odchyłka szczytkowa, stanowiąca różnicę pomiędzy wartością wysokości punktu interpolowanego a odpowiadającą jej wartością wysokości punktu kontrolnego,

z_I – wysokość punktu interpolowanego,

z_K – wysokość punktu kontrolnego,

n – liczba punktów,

- wartość średnią błędów szczytkowych

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n DH}{n} \quad (3.2)$$

– odchylenie standardowe błędów szcztkowych od wartości średniej

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (DH - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

gdzie:

DH – różnica pomiędzy wartością wysokości punktu interpolowanego a odpowiadającą jej wartością punktu kontrolnego,

\bar{x} – wartość średnia błędów szcztkowych,

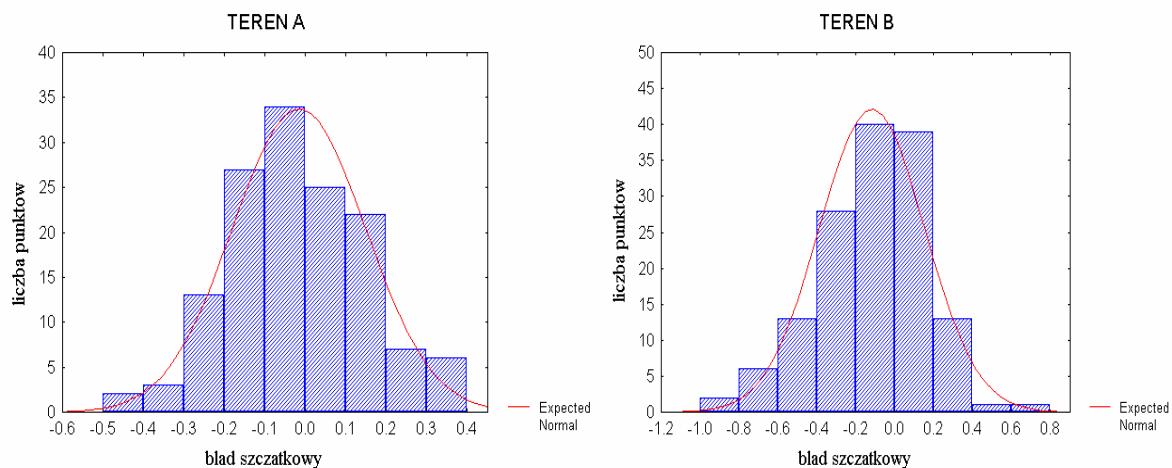
3.2 Analiza dokładności NMPT przy zastosowaniu interpolacji biliniowej

Interpolacja siatki regularnej o odstępnie 10 m. została przeprowadzona w programie MGE Terrain Analyst, posiadającym pełen zestaw funkcji wykorzystywanych do analiz wysokościowych. Funkcje te obejmują interpolację warstwic, generowanie przekrojów, analizę nachyleń, realizację funkcji strumieniowych i widoczności. W celu wygenerowania siatki regularnej wykorzystano opcję interpolacji biliniowej.

Badany teren	Błąd średni kwadratowy $RMSE$ [m.] wg wzoru 3.1	Błąd maksymalny E_{max} [m.]	Błąd minimalny E_{min} [m.]	Wartość średnia \bar{x} [m.] wg wzoru 3.2	Odchylenie standardowe σ [m.] wg wzoru 3.3
Teren A:	±0.164	0.363	-0.433	0.016	±0.164
Teren B:	±0.294	0.679	-0.910	0.118	±0.271

Tabela 3.1 Wyniki analizy dokładności otrzymane dla pomiaru dokonanego na stacji cyfrowej VSD.

Błąd $RMSE$ określa dokładność wyinterpolowanego NMPT w stosunku do powierzchni topograficznej i świadczy o stopniu wpasowania wygenerowanego NMPT w rzeczywisty teren. W przypadku stacji cyfrowej VSD uzyskano dokładność ±0.164 m. dla terenu płaskiego (teren A) i ±0.294 m. dla terenu nachylonego (teren B). Wartość średnia błędów szcztkowych w przypadku terenu płaskiego jest bliska wartości średniej prawdziwej ($\mu = 0$). Dla terenu B wartość średnia jest dodatnia. Można to wytłumaczyć wykorzystaniem interpolacji biliniowej, która w przypadku terenu wklęsłego przyczynia się do powstawania błędów dodatnich. Rozkłady błędów szcztkowych przedstawione są na poniższych wykresach.

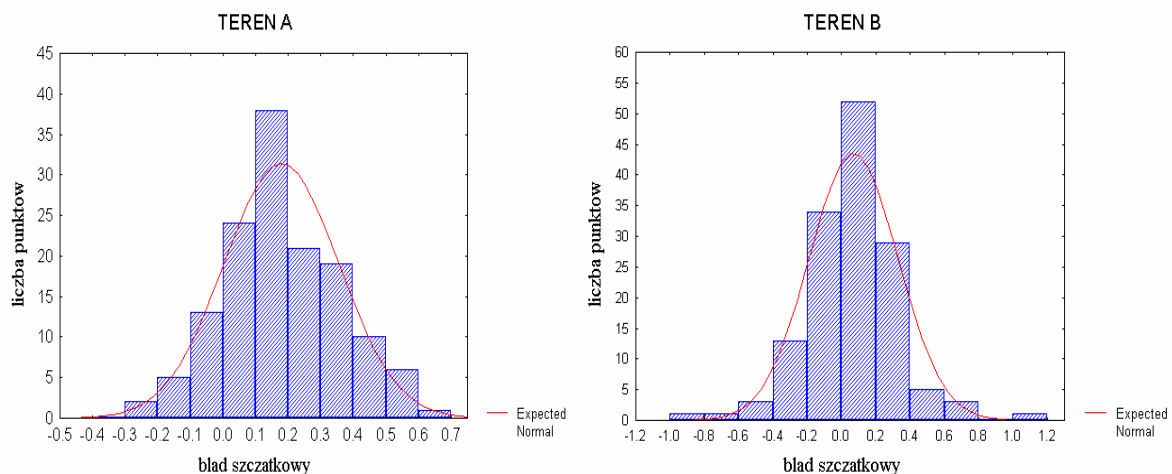


Rysunek 3.1 Histogramy odchyłek szczytkowych na punktach kontrolnych, wyznaczone z pomiaru na stacji cyfrowej VSD dla powierzchni topograficznych A i B.

Badany teren	Błąd średni kwadratowy $RMSE$ [m.] wg wzoru 3.1	Błąd maksymalny E_{max} [m.]	Błąd minimalny E_{min} [m.]	Wartość średnia \bar{x} [m.] wg wzoru 3.2	Odchylenie standardowe σ [m.] wg wzoru 3.3
Teren A:	± 0.251	0.646	-0.271	0.179	± 0.177
Teren B:	± 0.284	1.157	-1.144	0.061	± 0.279

Tabela 3.2 Wyniki analizy dokładności otrzymane dla pomiaru dokonanego na stacji cyfrowej ImageStation.

Dla stacji cyfrowej ImageStation uzyskano dokładność ± 0.251 – teren płaski i ± 0.284 – teren nachylony. W tym przypadku wartość średnia błędów szczytkowych jest również dodatnia. Rozkłady błędów szczytkowych przedstawione są na poniższych wykresach.



Rysunek 3.2 Histogramy odchyłek szczytkowych na punktach kontrolnych, wyznaczone z pomiaru na stacji cyfrowej ImageStation dla powierzchni topograficznych A i B.

Analizując powyższe tabele i wykresy można zauważyć, że dokładność NMPT jest ściśle skorelowana z kątem nachylenia terenu. Dla terenu o stromych nachyleniach błędy są znacznie większe.

Można również stwierdzić, że różnice pomiędzy stacjami cyfrowymi VSD i ImageStation są znikome i obydwie cechuje zbliżona dokładność pozyskiwania danych.

3.3 Porównanie dokładności NMPT uzyskanych z wykorzystaniem stacji VSD i ImageStation

Numeryczne modele terenu uzyskane z wykorzystaniem stacji VSD i ImageStation poddano analizie porównawczej. Pierwszy etap polegał na wyznaczeniu różnic wysokości odpowiadających sobie wyinterpolowanych punktów pochodzących z VSD i ImageStation.

Uzyskano model różnicowy o następującej statystyce:

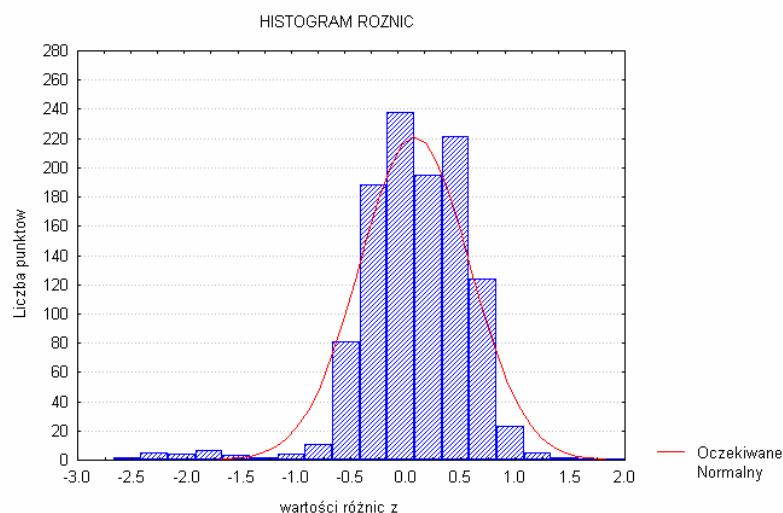
minimum: -2.671 ,

maksimum: 2.010 ,

wartość średnia \bar{x} : 0.147 ,

odchylenie standardowe σ : 0.305 ,

Odejmując model powierzchni terenu pomierzony z wykorzystaniem VSD od modelu z ImageStation uzyskano wartość średnią dodatnią, co świadczy, że generalnie model z VSD jest wyżej położony od modelu z ImageStation. Analizując histogram różnic pomiędzy modelami przedstawiony na rys. 3.1 można stwierdzić, że 75.5 % różnic mieści się w przedziale $\bar{x} \pm \sigma$.



Rysunek 3. 3 Histogram różnic wysokości między modelami pochodzącymi ze stacji cyfrowej VSD i ImageStation.

Kolejny etap analizy statystycznej został wykonany w programie MGE Grid Analyst. Posłużył on do wyznaczenia równania regresji. Regresja wyznacza związek między zmiennymi (w przypadku analizy NMPT zmiennymi są wartości wysokości z odpowiednio ze

stacji ImageStation i VSD). Głównym zadaniem analizy regresji jest wyznaczenie jednej zmiennej jako funkcji drugiej zmiennej.

Przyjęto jako zmienną zależną wysokości punktów ze stacji ImageStation z_{IS} , zaś wysokości z VSD jako zmienną niezależną z_{VSD} .

Dla rozważanych danych, których korelacja jest liniowa, istnieje jedna prosta, od której suma kwadratów odchyleń zmiennej z_{IS} jest najmniejsza. Jest to prosta najmniejszych kwadratów wyrażona równaniem:

$$\hat{z}_{IS} = a + b \cdot z_{VSD}$$

gdzie:

\hat{z}_{IS} – oszacowana wartość z_{IS} dla wartości z_{VSD} ,

a – parametr dający oszacowaną wartość z_{IS} dla $z_{VSD} = 0$,

b – współczynnik nachylenia prostej; identyczny ze współczynnikiem regresji,

Prosta ta spełnia warunek:

$$\sum (z_{IS} - \hat{z}_{IS})^2 = \min$$

gdzie:

z_{IS} – zaobserwowana wartość zmiennej zależnej,

\hat{z}_{IS} – oszacowana wartość z_{IS} ,

W omawianym przykładzie uzyskano prostą o równaniu:

$$\hat{z}_{IS} = -0.1687 + 1.0054 \cdot z_{VSD}$$

Świadczy ona o istnieniu pewnej systematycznej różnicy pomiędzy modelem z VSD i ImageStation. Jest to jednak wartość zanedbywalna, gdyż mieści się ona w granicach błędu pomiaru fotogrametrycznego (wartość wyznaczona ze wstępnej analizy dokładności stereogramu – około 0.10m.).

Dla celów analizy wyznaczono także współczynnik korelacji liniowej Pearsona, który określa stopień zależności między zmiennymi. Wyraża go wzór:

$$r = \frac{\text{cov}(Z_{VSD}, Z_{IS})}{\sqrt{V(Z_{VSD}) \cdot V(Z_{IS})}}$$

Dla rozpatrywanych danych z VSD i ImageStation wyniósł on 0.9998 co świadczy o bardzo silnej zależności korelacyjnej między zmiennymi.

4 Analiza dokładności NMPT uzyskanych sposobem automatycznym przy wykorzystaniu programu ISMT

ImageStation Match-T (ISMT) jest programem opracowanym przez niemiecką firmę INPHO, dostarczającym metod do automatycznego generowania danych wysokościowych, przy użyciu stacji roboczej ImageStation Z.

Przy wykorzystaniu tego programu wygenerowano trzy NMPT, różniące się ustawieniami filtru eliminującego punkty nie należące do powierzchni topograficznej. Wykorzystano następujące filtry:

- niski – o wadze wygładzenia równej 1,
- średni – o wadze wygładzenia równej 3,
- wysoki – o wadze wygładzenia równej 5,

Wszystkie operacje przeprowadzono w pakiecie GIS – *MGE (Modular GIS Environment)*. Jako metodę interpolacji wykorzystano interpolację biliniową, która w przypadku pomiaru NMPT sposobem manualnym uzyskała najwyższą zgodność z badanym terenem.

Badany teren	Błąd średni kwadratowy $RMSE$ [m.] wg wzoru 3.1	Błąd maksymalny E_{max} [m.]	Błąd minimalny E_{min} [m.]	Wartość średnia \bar{x} [m.] wg wzoru 3.2	Odchylenie standardowe σ [m.] wg wzoru 3.3
Teren A:	± 0.228	1.074	-0.475	0.140	± 0.180
Teren B:	± 0.375	0.657	-0.754	0.350	± 0.134

Tabela 4.1 Wyniki analizy dokładności otrzymane w wyniku pomiaru automatycznego z wykorzystaniem filtru niskiego.

Badany teren	Błąd średni kwadratowy $RMSE$ [m.] wg wzoru 3.1	Błąd maksymalny E_{max} [m.]	Błąd minimalny E_{min} [m.]	Wartość średnia \bar{x} [m.] wg wzoru 3.2	Odchylenie standardowe σ [m.] wg wzoru 3.3
Teren A:	± 0.224	1.070	-0.123	0.137	± 0.177
Teren B:	± 0.346	0.614	-0.245	0.323	± 0.125

Tabela 4.2 Wyniki analizy dokładności otrzymane w wyniku pomiaru automatycznego z wykorzystaniem filtru średniego.

Badany teren	Błąd średni kwadratowy $RMSE$ [m.] wg wzoru 3.1	Błąd maksymalny E_{max} [m.]	Błąd minimalny E_{min} [m.]	Wartość średnia \bar{x} [m.] wg wzoru 3.2	Odchylenie standardowe σ [m.] wg wzoru 3.3
Teren A:	± 0.223	1.077	-0.904	0.139	± 0.176
Teren B:	± 0.346	0.661	-0.150	0.322	± 0.127

Tabela 4.3 Wyniki analizy dokładności otrzymane w wyniku pomiaru automatycznego z wykorzystaniem filtru wysokiego.

Dla metod automatycznych niezależnie od doboru rodzaju filtrów uzyskano zbliżone wyniki: ± 0.22 m. w przypadku terenu płaskiego i nie przekraczające ± 0.375 m. w przypadku terenu nachylnego.

Przeprowadzono również porównanie modelu pozyskiwanego automatycznie z modelem mierzonym ręcznie. Wyznaczono proste regresji i obliczono współczynniki korelacji liniowej Pearsona.

rodzaj filtru	prosta regresji	współczynnik korelacji
niski (waga = 1)	$y = -0.4781 + 1.0025x$	0.99959
średni (waga = 3)	$y = -0.4031 + 1.0021x$	0.99966
wysoki (waga = 5)	$y = -0.4033 + 1.0021x$	0.99966

Tabela 4.4 Wyznaczone równania prostej regresji i współczynniki korelacji liniowej Pearsona dla poszczególnych filtrów.

Przed analizą powyższych wyników należy nadmienić, że rozpatrywana powierzchnia zarówno pod względem ukształtowania (teren pagórkowaty, ciągły), zabudowy (pojedyncze domy) jak i użytkowania terenu (pola uprawne, niewielki procent powierzchni zalesionych) stanowiła wręcz idealny model dla przeprowadzenia automatycznego pomiaru NMPT. Uzyskane wyniki nie mogą więc stanowić miarodajnej oceny dokładności metod automatycznego pozyskiwania NMPT.

Analizując powyższe tabele nie można wysunąć wniosku, że jeden z filtrów wygładzających jest optymalny dla rozpatrywanego modelu, gdyż wszystkie filtry uzyskały zbliżoną dokładność. Wynika to najprawdopodobniej z cech badanej powierzchni, o których wspomniano powyżej.

Uzyskana dokładność, która nie odbiega znacząco od dokładności uzyskanej sposobem ręcznym dowodzi, że automatyczna korelacja obrazów jest zagadnieniem przyszłościowym. Komputerowe wspomaganie pomiaru podnosi komfort i szybkość pracy operatora. Pomiar ręczny pojedynczego modelu to około siedem godzin pracy doświadczonego operatora, podczas gdy program Match – T generuje go w ciągu 40 minut.

5 Podsumowanie

Opracowanie stanowi analizę dokładności NMPT uzyskanych przy wykorzystaniu nowoczesnych fotogrametrycznych stacji cyfrowych. W oparciu o zbiory punktów pomiarowych rozmieszczonych w regularnej siatce o odstępach 25 m. wygenerowano nowe

modele w siatce dziesięciometrowej. Główna idea analizy zasadzała się na istnieniu bezbłędnej próbki punktów kontrolnych, której liczebność została zoptymalizowana statystycznie. Różnice wysokości wyznaczone pomiędzy odpowiadającymi sobie punktami wyinterpolowanymi i kontrolnymi utożsamiano z błędami prawdziwymi powierzchni tworzonej. W wyniku analizy stwierdzono, że stacje ImageStation i VSD cechuje zbliżona precyzja pomiaru. Dokładność numerycznego modelu terenu jest w znacznym stopniu uwarunkowana wykorzystaną metodą interpolacji i ukształtowaniem powierzchni topograficznej. Dla fragmentu terenu o większym spadku uzyskano prawie dwukrotnie większe błędy.

Duże możliwości pojawiają się w przypadku wykorzystania metody automatycznego pozyskiwania NMPT. Przeprowadzona analiza wykazała, że automatyczną korelację obrazów cechuje nieznacznie niższa dokładność. Biorąc pod uwagę szybkość tej metody oczywistym staje się fakt, że dalsze udoskonalanie jej algorytmów i procedur filtracji jest godne dalszych badań.

6 Literatura

- [1] Klaver J., Walker A. S., Entry level digital photogrammetry: latest developments of the DVP. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, Vol. 29 Part 2, 1992.
- [2] Miller S. B., Thiede J. E., A line of high performance digital photogrammetric workstations – the synergy of general dynamics, Helava associates, and Leica. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, Vol. 29 Part 2, 1992.
- [3] Jachimski J., Zieliński J., Digital Stereoplotting using the PC – SVGA monitor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, Vol. 29 Part 2, 1992.
- [4] Huang Y. D., Evaluation of information loss in Digital Elevation Models with digital photogrammetric system. Photogrammetric Record, 16(95): 781–791, 2000.
- [5] Milbert S., Pierzchała H., Piasek Z., Przegląd numerycznych modeli terenu. Zeszyty naukowe AGH nr 62, 1981.
- [6] Zyga J., Strojny P., Praktyczne aspekty opracowania NMT pakietem SURFER, Przegląd geodezyjny 66(8), 1994.
- [7] Mościbroda J., Mapy statystyczne jako nośnik informacji ilościowej, Wydawnictwo UMCS, Lublin 1999.

- [8] Li Z., Effects of Check Points on the Reliability of DTM Accuracy Estimates Obtained from Experimental Tests. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(10):1333–1340, 1990.
- [9] Volk W., *Statystyka stosowana dla inżynierów*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, 1973.
- [10] Burington R., May D., *Handbook of Probability and Statistics with Tables*. McGraw – Hill Company, 1970.