

*Bogusława Kwoczyńska, Małgorzata Bryś*

**OCENA ZASTOSOWANIA INTEGRACJI DANYCH  
LIDAROWYCH I FOTOGRAMETRYCZNYCH  
DO GENEROWANIA NMT DLA OKOLIC  
ZBIORNIKA WODNEGO CHAŃCZA**

**EVALUATION OF APPLICATION OF LIDAR  
AND PHOTOGRAMMETRIC DATA INTEGRATION  
FOR GENERATING DTM FOR CHAŃCZA  
WATER RESERVOIR AREA**

**Streszczenie**

Nieustanny rozwój technologii geoinformatycznych wpływa na wzrost zapotrzebowania na aktualne oraz precyzyjne dane opisujące ukształtowanie terenu. Zastosowanie technologii fotogrametrii cyfrowej pozwala na łączenie i analizę danych pozyskanych różnymi metodami. W publikacji przedstawiono możliwość integracji danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego i pozyskanych na podstawie zdjęć lotniczych wykonanych kamerą cyfrową DMC do generowania NMT okolic zbiornika wodnego Chańcza. Na badanym obszarze wyodrębniono pięć reprezentatywnych obszarów testowych, dla których przeprowadzono eksperyment związany z analizą wysokościową oraz integracją danych fotogrametrycznych i lidarowych. Obszary testowe obejmowały: teren użytkowany rolniczo (pola uprawne) – obszar płaski, teren zabudowany z siecią dróg, teren o zróżnicowanym ukształtowaniu pionowym, teren zadrzewiony i zakrzewiony oraz teren wzdłuż koryta rzeki.

Integracja danych lidarowych oraz fotogrametrycznych wymagała wczytania, do projektu założonego na fotogrametrycznej stacji cyfrowej DELTA, dokumentów tekstowych zawierających NMT w strukturze GRID wygenerowany w programie TerraScan oraz analizy jakości połączenia tych dwóch metod. Analizę przeprowadzono dla w/w obszarów testowych biorąc pod uwagę przyjęte w badaniach długości boku trójkąta ( 2 m, 15 m, 45 m, 70 m) podczas generowania GRIDA metodą triangulacji.

**Słowa kluczowe:** zdjęcia lotnicze, lotniczy skaningu laserowy, numeryczny model terenu

### Summary

*Continuous development of geoinformatic technics increases the demand for up-to-date and precise data describing the terrain configuration. Application of the digital photogrammetry enables connection and analysis of data obtained by different methods. The paper presents possibility of integration of data obtained from airborne laser scanning, and from aerial photos made by DMC digital camera for generating DTM for Chańcza water reservoir area. On investigated area five representative test areas were determined, and for them an experiment connected with height analysis and integration of photogrammetric and lidar data was performed. Test areas included: agricultural areas (arable fields) – flat area, built-up area with roads network, terrain of diverse vertical configuration, afforested area, and river valley.*

*Integration of lidar and photogrammetric data requires input to the project on photogrammetric digital station DELTA, text files containing DTM in GRID structure generated in TerraScan and analysis the accuracy of these two methods integration. Analysis was performed for mentioned above test areas taking into account determined during investigations lengths of triangle sides (2 m, 15 m, 45 m, 70 m) during GRID generation by the method of triangulation.*

**Key words:** *aerial photos, airborne laser scanning, digital terrain model*

### WSTĘP

Rozwój technologii geoinformatycznych wpływa na wzrost zapotrzebowania na aktualne oraz precyzyjne dane opisujące ukształtowanie terenu. Wzrasta również ludzka świadomość znaczenia wiarygodnych i dostarczanych w krótkim czasie informacji o rzeźbie terenu. Technologie fotogrametrii cyfrowej charakteryzują się efektywnym oraz ekonomicznym narzędziem do pozyskiwania danych. Dostarczają wielu cennych, globalnych informacji geometrycznych o terenie. Obecnie bazują na zobrażowaniach pozyskanych z pułapu lotniczego, ale również i satelitarne. Przez wiele lat analogowe zdjęcia lotnicze stanowiły główne źródło technologii fotogrametrycznych. Zmieniło się to od połowy lat dziewięćdziesiątych, czyli od okresu kiedy zastąpiono metody analogowe technologiami fotogrametrii cyfrowej.

Numeryczny model terenu może być obecnie wytworzony na drodze automatycznych lub manualnych obserwacji znanych jako *stereomatching*. Nowoczesne kamery cyfrowe, szybkie cyfrowe stacje fotogrametryczne oraz zaawansowane algorytmy wykorzystujące dopasowanie obrazów rastrowych dają ogromne możliwości w tworzeniu dokładnych NMT.

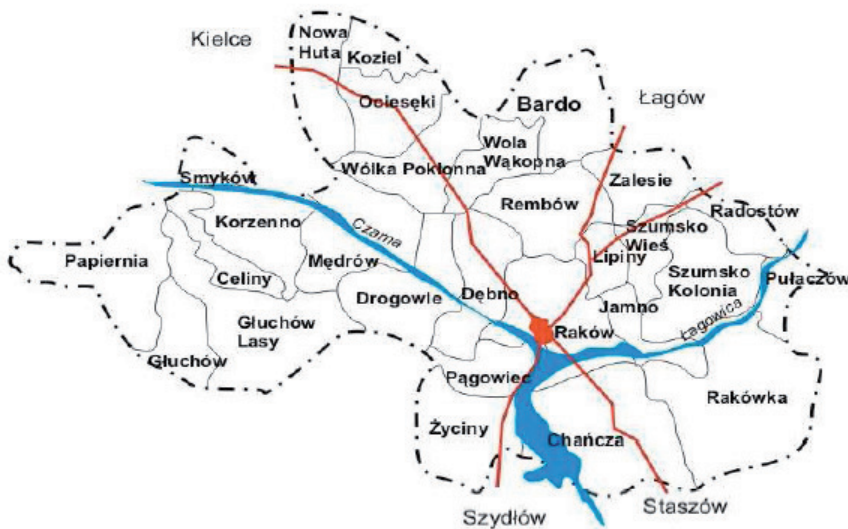
Połączenie dwóch metod w tworzeniu numerycznego modelu terenu, takich jak: zdjęć lotniczych i pracy na cyfrowej stacji fotogrametrycznej oraz technologii LIDAR nie tylko ułatwia i przyspiesza opracowanie, ale wpływa na finalną jakość produktu, czego przykładem jest praca magisterska napisana na Uniwersytecie Rolniczym w Krakowie przez Małgorzatę Bryś pod kierunkiem Bogusławy Kwoczyńskiej, będąca podstawą niniejszej publikacji.

## ŹRÓDŁA DANYCH

Dane wykorzystane do integracji pozyskane zostały za pomocą lotniczego skaningu laserowego oraz opracowania zdjęć lotniczych wykonanych kamerą cyfrową DMC na fotogrametrycznej stacji cyfrowej Delta. Dane źródłowe w postaci: cyfrowych zdjęć lotniczych barwnych oraz w podczerwieni, niesklasyfikowanej „chmury punktów”, będącej produktem lotniczego skaningu laserowego oraz metryki cyfrowej kamery DMC zostały udostępnione przez spółkę MGGP S.A. Dane, na których przeprowadzono eksperyment badawczy to lotnicze dane lidarowe dostarczone w formie plików binarnych z rozszerzeniem .las zawierające współrzędne XYZ bez informacji o wielokrotnych odbiciach oraz sile sygnału.

Cyfrowe dane obrazowe pochodzące z kamery DMC pozyskane zostały w 2009 roku w postaci zdjęć o rozdzielczości przestrzennej 0.20 m w barwach naturalnych i w podczerwieni.

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ



Źródło: Rada Gminy Raków, Plan odnowy miejscowości Chańcza na lata 2010 – 2017, Chańcza 2010  
Source: Raków Commune Council: Chańcza locality revival plan for years 2010-2017. Chańcza 2010

**Rysunek 1.** Zalew Chańcza na tle sołectw w gminie Raków  
**Figure 1.** Chańcza reservoir on the background of villages in Raków commune

Obszar badawczy obejmuje fragment doliny przy zbiorniku wodnym Chańcza, w gminie Raków w województwie świętokrzyskim. Na rysunku 1 przedstawiono mapkę gminy Raków, na której widoczny jest Zalew Chańcza wraz z jego dopływami. Teren, dla którego został założony projekt oraz przeprowadzona aerotriangulacja charakteryzuje się urozmaiconą rzeźbą terenu zaczynając od terenów płaskich, na których występują pola uprawne, poprzez tereny o zróżnicowanym ukształtowaniu pionowym, tereny porośnięte gęstymi lasami, siecią dróg, zabudowy, aż do koryta rzeki prowadzącego do Zalewu Chańcza.

Dalsze prace badawcze związane z analizą wysokościową oraz integracją danych fotogrametrycznych i lidarowych przeprowadzono na pięciu reprezentatywnych obszarach obiektu badawczego:

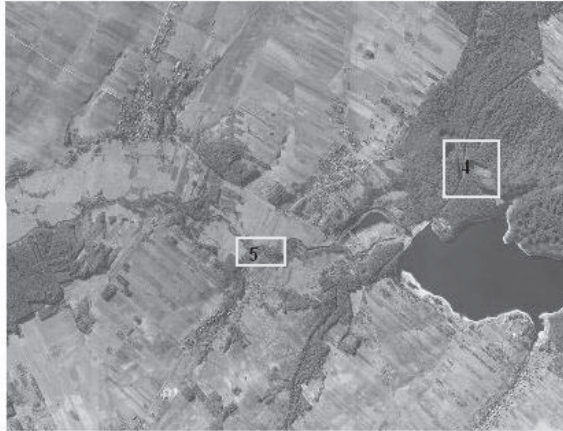
1. teren użytkowany rolniczo (pola uprawne) – obszar płaski,
2. teren zabudowany z siecią dróg,
3. teren o zróżnicowanym ukształtowaniu pionowym,
4. teren zadrzewiony i zakrzewiony,
5. teren wzdłuż koryta rzeki.

Analiza danych obrazowych dla pierwszych trzech obszarów została przeprowadzona w oparciu o barwne zdjęcia cyfrowe (RGB), natomiast analiza lasów oraz koryta rzeki bazowała na zdjęciach w podczerwieni (CIR). Rysunek 2 przedstawia rozmieszczenie obszarów badawczych analizowanych w oparciu o barwne zdjęcia cyfrowe (RGB). Rysunek 3 przedstawia rozmieszczenie dwóch pozostałych obszarów badawczych analizowanych w oparciu o zdjęcia cyfrowe w podczerwieni (CIR).



Źródło: opracowanie własne  
Source: Own elaboration.

**Rysunek 2.** Obiekt badawczy z zaznaczonymi obszarami testowymi  
**Figure 2.** Source: Investigated object with marked test areas



Źródło: opracowanie własne.  
Source: Own elaboration.

**Rysunek 3.** Obiekt badawczy z zaznaczonymi obszarami testowymi  
**Figure 3.** Investigated object with marked test areas

## METODYKA BADAŃ

Pierwszym etapem badań było skonstruowanie bloku fotogrametrycznego składającego się z dwóch szeregów zdjęć (po 8 zdjęć w każdym szeregu) oraz zagęszczenie istniejącej na badanym obszarze osnowy fotogrametrycznej stanowiącej fotopunkty naturalne, których współrzędne zostały wyznaczone metodą GPS. Do przeprowadzenia aerotriangulacji wykorzystano moduły fotogrametrycznej stacji cyfrowej DELTA oraz cyfrowe dane obrazowe z kamery DMC. Aerotriangulacja została przeprowadzona przy wykorzystaniu mechanizmu pół-automatycznej korelacji obrazów w module TRIADA, niezależnie dla zdjęć barwnych i w podczerwieni. Do wyrównania bloku posłużono się programem Block MSG. Wyniki przeprowadzonej aerotriangulacji zamieszczone zostały w tabeli 1 stanowiącej tabelaryczne zestawienie najważniejszych parametrów wpływających na dokładność przeprowadzonej aerotriangulacji.

Przetworzenie danych lidarowych polegało na wykonaniu automatycznej klasyfikacji „chmury punktów” na odpowiednie warstwy terenu oraz jego pokrycia. W zależności od wysokości punkty zostały przeklasyfikowane na następujące warstwy: punkty terenowe (ground), niska roślinność (low vegetation), średnia roślinność (medium vegetation), wysoka roślinność (high vegetation), budynki (building) oraz punkty niskie (low points).

Średnia gęstość punktów dla wybranych obszarów testowych była zmienna i zależna od charakteru terenu. Najmniejsza (3,44) średnia ilość punktów

przypadająca na m<sup>2</sup> występowała na obszarach użytkowanych rolniczo o małą urozmaiconą rzeźbę terenu – generalnie obszar płaski nieporośnięty wysoką trawą. Najgęstsza „chmura punktów” (4,25 pkt/m<sup>2</sup>) występowała na obszarze testowym, który stanowił teren zalesiony i zadrzewiony (gęsto porośnięty drzewami).

**Tabela 1.** Zestawienie wyników aerotriangulacji wykonanej dla zdjęć barwnych i w podczerwieni

**Table 1.** List of aerotriangulation results performer for color and infra-red photos

Średni błąd położenia fotopunktu po wyrównaniu			
	sytuacyjnie [m]		wysokościowo [m]
RGB	0,160		0,082
CIR	0,142		0,062
Błąd współrzędnych fotopunktów po wyrównaniu			
	D <sub>x</sub>	D <sub>y</sub>	D <sub>z</sub>
RGB	0,151	0,053	0,082
CIR	0,133	0,049	0, 62
Błąd średni kwadratowy położenia fotopunktów i punktów wiążących			
	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>
RGB	0,070	0,051	0,324
CIR	0,065	0,049	0,309

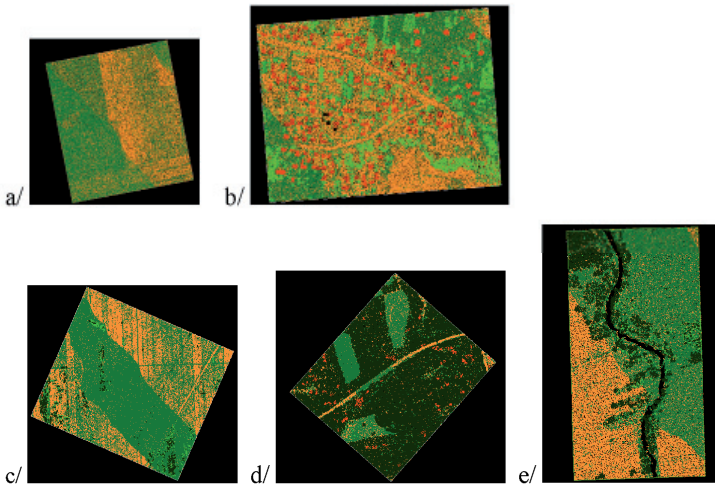
Źródło: opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wyniki automatycznej klasyfikacji zaprezentowane w formie graficznej można zaobserwować na rysunkach 4a-4e, przedstawiających odpowiednio:

- a/ teren użytkowany rolniczo (pola uprawne) – obszar płaski,
- b/ teren zabudowany z siecią dróg,
- c/teren o zróżnicowanym ukształtowaniu pionowym,
- d/ teren zadrzewiony i zakrzewiony
- e/ teren wzdłuż koryta rzeki.

Filtracja danych lidarowych wykorzystywana jest do budowy NMT. Polega na eliminowaniu punktów odbitych od elementów pokrycia terenu, np. roślinności i budynków. Po wyodrębnieniu punktów terenowych, pozostałe poddane są klasyfikacji, która dzieli chmurę punktów na klasy, uzależnione od wysokości. W pracy wykorzystano filtrację metodą aktywnego modelu TIN.



Legenda dla powyższych rysunków jest następująca:

- - punkty terenu, ■ - roślinność niska, ■ - roślinność średnia, ■ - roślinność wysoka,
- - budynki

Źródło: opracowanie własne  
Source: Own elaboration

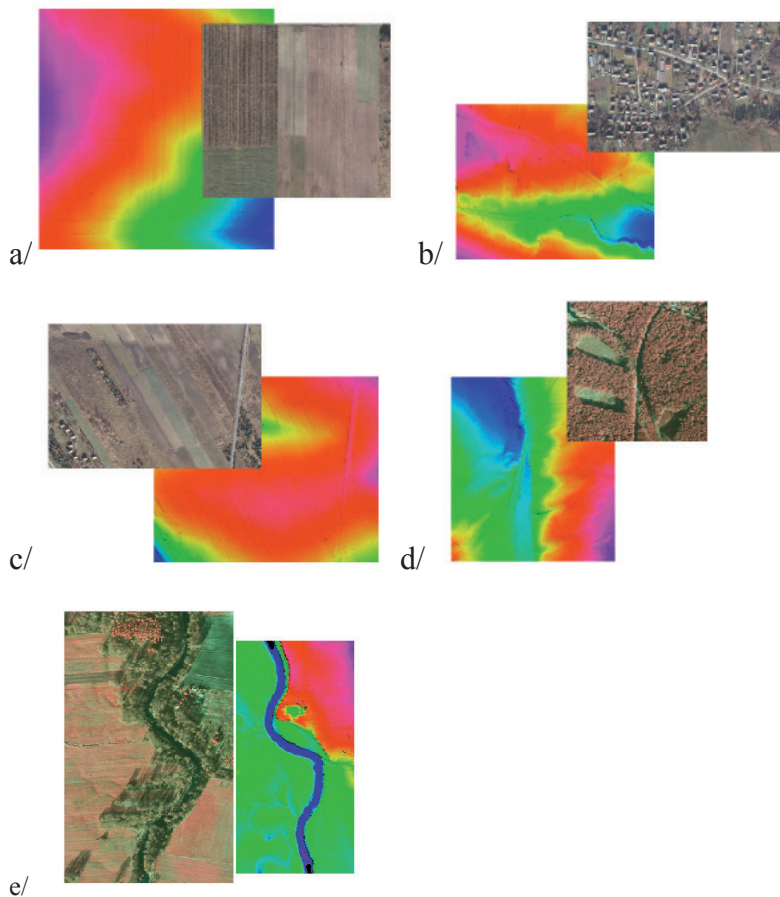
**Rys. 4 a-e.** Rezultaty klasyfikacji na obszarach testowych 1-5  
**Figure 4a-e.** Classification results on test areas 1-5

## WYNIKI BADAŃ

W technologii ALS numeryczny model terenu jest reprezentowany przez zbiór punktów rozproszonych wyodrębnionych z całej chmury punktów. Do przeprowadzenia analiz wysokościowych NMT wygenerowano model terenu w postaci regularnej siatki GRID. W oprogramowaniu fińskiej firmy Terrasolid występują dwie metody interpolowania punktów: metoda triangulacji oraz metoda odbicia. Niezależnie od przyjętej metody, oprócz wielkości oczka siatki, definiuje się parametr, który odpowiedzialny jest za uzupełnienie tzw. „dziur” występujących w NMT. Dla metody triangulacji podaje się długość boku trójkąta, a w metodzie odbicia jest to wyrażony w pikselach rozmiar „dziury” w NMT. W zależności od przyjętej wielkości parametru, miejsca NMT, w których nie występują punkty terenowe, wypełniane są regularną siatką [Bryś 2011].

W opracowaniu przyjęto metodę triangulacji i przeprowadzono testy dla następujących maksymalnych długości boku trójkąta: 2 m, 15 m, 45 m oraz 70 m. Badania przeprowadzono w celu wyboru metody interpolacyjnej, dzięki której otrzyma się NMT o najwyższej dokładności.

Rysunki 5 a-e przedstawiają efekty tworzenia modeli terenu w postaci wizualizacji numerycznych modeli terenu pięciu obszarów testowych. Dla lepszej oceny otrzymanego NMT dokonano zestawienia wizualizacji modelu terenu wraz z odpowiadającym fragmentem zdjęcia lotniczego.



Źródło: opracowanie własne  
Source: Own elaboration

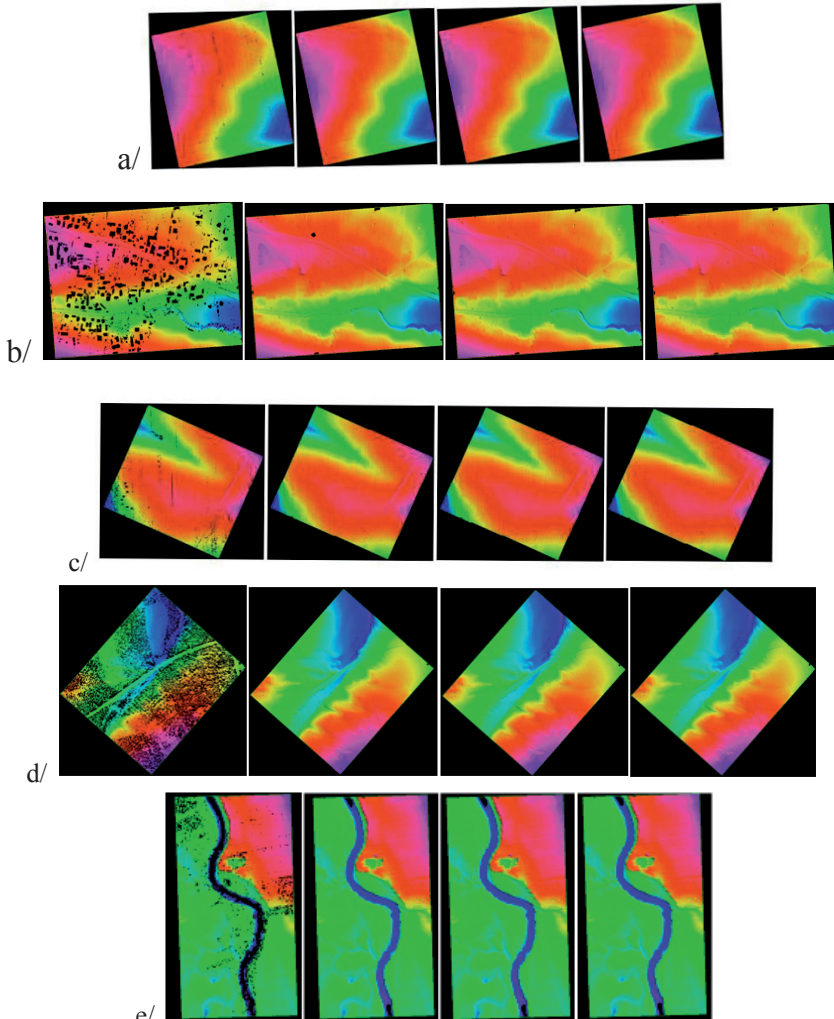
**Rysunek 5a-e.** Zdjęcie lotnicze na tle Numerycznego Modelu Terenu  
– obszar testowy nr 1 -5

**Figure 5a-e.** Aerial photo on the background of Digital Terrain Model  
– test area number 1 and 5

Do przeprowadzenia analiz wysokościowych NMT, wygenerowano model terenu w postaci regularnej siatki GRID o oczku siatki 1m x 1m przy długościach boku trójkąta: 2 m, 15 m, 45 m oraz 70 m wykorzystując metodę trian-



gulacji przy interpolowaniu punktów. Rysunki 6a-e stanowią zestawienie otrzymanych wyników.



Źródło: opracowanie własne  
Source: own elaboration.

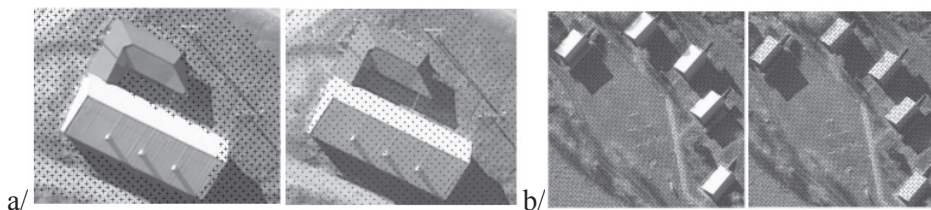
**Rysunek 6a-e.** Wygenerowany model terenu pięciu obszarów testowych w postaci regularnej siatki GRID. Metoda triangulacji o długości boku od lewej: 2m, 15m, 45m, 70m. Obszar testowy nr 1-5

**Figure 6a-e.** Digital Terrain Model of 5 test areas generated as a regular grid GRID. Method of triangulation with side length from left side: 2 m, 15 m, 45 m, 70 m. Test area number 1-3

Wniosek z analizy jest wspólny dla wszystkich pięciu obszarów testowych. W NMT istnieją miejsca, w których nie występują punkty terenowe. Metoda triangulacji wypełnia te miejsca siatką trójkątów o boku ustalonym przez operatora. W przypadku, gdy są to małe długości, takie jak 2m, powstaje sieć bardzo małych trójkątów. Jednak taka długość uniemożliwia utworzenie trójkątów w miejscu, gdzie są m.in. budynki, wody, gęste lasy, ponieważ w takich miejscach odległość najbliższych punktów terenowych jest zazwyczaj większa. Stąd powstają puste pola (na Rys. 6a-e pierwsze od lewej - czarne dziury), w tych miejscach nie został utworzony GRID dla boku trójkąta równego 2 m. W pozostałych przypadkach siatki nie różnią się już tak bardzo i w większości wyglądają identycznie.

### INTEGRACJA DANYCH LIDAROWYCH I FOTOGRAMETRYCZNYCH

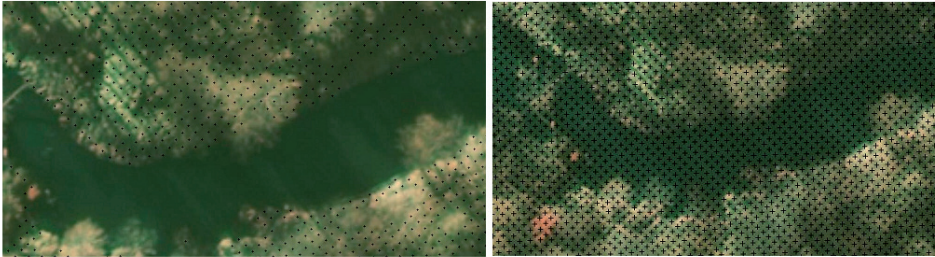
W kolejnym etapie prac badawczych scalono informacje otrzymane technologią skaningu lotniczego z otrzymanymi technologią fotogrametryczną. Produktem wyjściowym części lidarowej do dalszych prac badawczych był numeryczny model terenu w postaci regularnej siatki GRID o oczku 1m x 1m pięciu obszarów testowych. Produkt wyjściowy części fotogrametrycznej stanowił natomiast założony na cyfrowej stacji fotogrametrycznej DELTA projekt obejmujący wyrównany w drodze aerotriangulacji blok zdjęć. Integracja danych lidarowych oraz fotogrametrycznych polegała na wczytaniu do DELTY dokumentów tekstowych stanowiących NMT w strukturze GRID wygenerowany w programie TerraScan oraz analizie jakości połączenia tych dwóch metod. W rezultacie otrzymano GRIDa o oczku 1m x 1m. Na rysunku 7 przedstawiono NMT w postaci GRIDa zaczytany do DELTY dla niektórych obszarów testowych.



Źródło: opracowanie własne  
Source: Own elaboration.

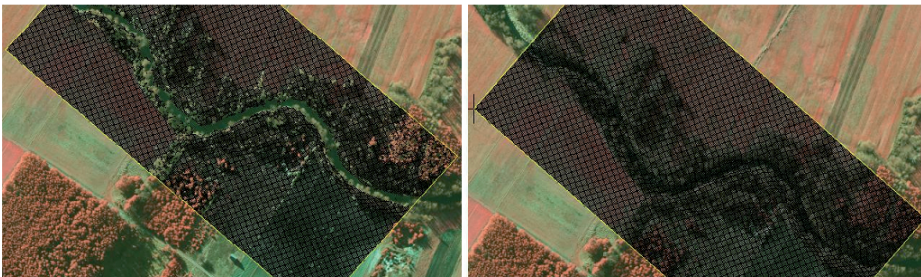
**Rysunek 7.** NMT w strukturze GRID wygenerowany metodą triangulacji o długości boku trójkąta: a/ od lewej 2 m, 15 m. b/ od lewej 2 m, 45 m. Stacja cyfrowa DELTA  
**Figure 7.** DTM in GRID structure generated by the triangulation method with triangle sides lengths from left 2 m, 70 m. DELTA digital station

Łatwo zauważyć, że w pierwszych przypadkach (długość boku trójkąta równa 2 m) brak jest NMT pod budynkami. Podczas generowania GRIDa w tych miejscach nie zostały utworzone trójkąty, a w konsekwencji powstały puste pola. W przypadku, gdy puste pola zajmują duży obszar opracowania powinno się takie miejsca uzupełnić liniami strukturalnymi terenu. Taka sama sytuacja ma miejsce na obszarach pokrytych wodą (na rys. 8 oraz 9 jest to rzeka). Koniecznym staje się zrysowanie koryta na stacji cyfrowej DELTA liniami szkieletowymi. Na rysunku 10 zestawiono siatki na obszarze pokrytym drzewami. Również i tu można zauważyć występujące dziury.



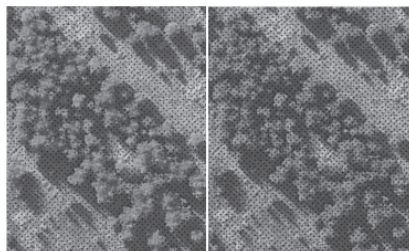
Źródło: opracowanie własne  
Source: Own elaboration

**Rysunek 8.** NMT w strukturze GRID wygenerowany metodą triangulacji o długości boku trójkąta: od lewej 2m, 70m. Stacja cyfrowa DELTA. Pole testowe 4  
**Figure 8.** DTM in GRID structure generated by the triangulation method with triangle sides lengths from left 2 m, 70 m. DELTA digital station. Test area 4



Źródło: opracowanie własne.  
Source: Own elaboration.

**Rysunek 9.** NMT w strukturze GRID wygenerowany metodą triangulacji o długości boku trójkąta: od lewej 2 m, 45 m. Stacja cyfrowa DELTA. Pole testowe 5  
**Figure 9.** DTM in GRID structure generated by the triangulation method with triangle sides lengths from left 2 m, 45 m. DELTA digital station. Test area 5



Źródło opracowanie własne.  
Source: Own elaboration.

**Rysunek 10.** NMT w strukturze GRID wygenerowany metodą triangulacji: o długości boku trójkąta: od lewej 2m, 15m. Stacja cyfrowa DELTA. Pole testowe 3

**Figure 10.** DTM in GRID structure generated by the triangulation method with triangle sides lengths from left 2 m, 15 m. DELTA digital station. Test area 3

W zależności od przyjętej metody triangulacji, za pomocą lotniczego skaningu laserowego można w łatwy i szybki sposób wygenerować NMT, który następnie można poddać kontroli na stacji cyfrowej i ewentualnie dokonać zmian. Takie łączenie dwóch metod niewątpliwie wpływa na jakość produktu końcowego i jednocześnie przyspiesza szybkość opracowania.

### ANALIZA WYSOKOŚCIOWA NMT

Analizie wysokościowej poddano model w postaci regularnej siatki GRID o oczku siatki równym 1m x 1m utworzony w oprogramowaniu TerraScan, oraz GRID o takim samym oczku siatki wygenerowany na stacji cyfrowej DELTA. Analizę przeprowadzono dla pięciu obszarów testowych biorąc pod uwagę przyjęte w badaniach długości boku trójkąta (2 m, 15 m, 45 m, 70 m). Wyniki zamieszczone zostały w tabelach 2-6.

**Tabela 2.** Analiza wysokościowa wygenerowanego NMT. Obszar testowy nr 1  
**Table 2.** Analysis of heights accuracy of generated DTM. Test area 1. Arable area

Długość boku trójkąta	Liczba punktów	Średnia wysokość [m]	Odchylenie standardowe wysokości w NMT [m]
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany w oprogramowaniu TerraScan			
2m	152 047	244,669	2,91
15m	154 067	244,682	2,91
45m	154 067	244,682	2,91
70m	154 067	244,682	2,91
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany na stacji cyfrowej DELTA			
	308 378	244,795	2,76

Źródło: opracowanie własne.  
Source: Own elaboration.

Tabele 2 i 3 zawierają zestawienie liczby punktów, średniej wysokości oraz odchylenia standardowego wysokości w poszczególnych węzłach siatki GRID wygenerowanych NMT. Średnia różnica wysokości punktu między analizowanymi metodami jest większa na terenie zabudowanym z siecią dróg (około 37 cm) niż na użytkowanym rolniczo (12 cm), a odchylenie standardowe jest mniejsze dla GRIDa wytworzonego w DELCIE.

**Tabela 3.** Analiza wysokościowa wygenerowanego NMT. Obszar testowy nr 2.  
Teren zabudowany z siecią dróg

**Table 3.** Analysis of heights accuracy of generated DTM.  
Test area 2. Built-up area with roads network

Długość boku trójkąta	Liczba punktów	Średnia wysokość [m]	Odchylenie standardowe wysokości w NMT [m]
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany w oprogramowaniu TerraScan			
2m	217 579	228,073	3,95
15m	255 062	228,182	3,91
45m	255 204	228,183	3,91
70m	255 204	228,183	3,91
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany na stacji cyfrowej DELTA			
	512 660	227,814	3,75

Źródło: opracowanie własne.  
Source: Own elaboration.

Porównując dane wysokościowe zestawione w tabeli 4 można zauważyć, iż średnie odchylenie standardowe w przypadku obu metod jest zbliżone do siebie, a średnia różnica wysokości punktu wynosi około 27 cm.

**Tabela 4.** Analiza wysokościowa wygenerowanego NMT. Obszar testowy nr 3.  
Teren o zróżnicowanym ukształtowaniu pionowym

**Table 4.** Analysis of heights accuracy of generated DTM.  
Test area 3. Terrain of heterogenous vertical configuration

Długość boku trójkąta	Liczba punktów	Średnia wysokość [m]	Odchylenie standardowe wysokości w NMT [m]
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany w oprogramowaniu TerraScan			
2m	270 329	240,485	4,36
15m	279 985	240,385	4,43
45m	279 985	240,385	4,43
70m	279 985	240,385	4,43
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany na stacji cyfrowej DELTA			
	1 118 250	240,116	4,40

Źródło: opracowanie własne  
Source: Own elaboration.

Zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 5 można zaobserwować, że odchylenie standardowe dla NMT wygenerowanego na stacji cyfrowej DELTA jest większe, niż pochodzące z lotniczego skaningu laserowego. Średnia różnica wysokości punktu między analizowanymi metodami wynosi około 35 cm, jest to już znacząca różnica, zatem można stwierdzić, iż w terenie zadrzewionym i zakrzewionym dokładność tych metod nie jest zbliżona.

Zamieszczone w tabeli 6 zestawienie podstawowych danych służących do oceny wysokościowej wygenerowanych NMT jest bardzo zbliżone pod względem średniej wysokości oraz odchylenia standardowego. Średnia różnica wysokości punktu między analizowanymi metodami zaledwie 2 cm dla długości boku trójkąta 15 m, 45 m i 70 m w metodzie triangulacji, natomiast dla boku trójkąta o długości 2 m, średnia różnica wysokości punktu zwiększa się do wartości 15 cm, lecz nadal znajduje się w granicy dokładności wysokościowej przy tworzeniu NMT metodą lidarową.

**Tabela 5.** Analiza wysokościowa wygenerowanego NMT. Obszar testowy nr 4.  
Teren zadrzewiony i zakrzewiony

**Tabela 5.** Analysis of heights accuracy of generated DTM. Test area 4. Afforested area.

Długość boku trójkąta	Liczba punktów	Średnia wysokość [m]	Odchylenie standardowe wysokości w NMT [m]
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany w oprogramowaniu TerraScan			
2m	221 101	231,510	7,55
15m	390 028	232,270	7,50
45m	390 028	232,270	7,50
70m	390 028	232,270	7,50
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany na stacji cyfrowej DELTA			
	781 504	232,624	11,58

Zródło: opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

**Tabela 6.** Analiza wysokościowa wygenerowanego NMT. Obszar testowy nr 5.  
Teren wzdłuż koryta rzeki.

**Tabela 6.** Analysis of heights accuracy of generated DTM. Test area 5. River valley.

Długość boku trójkąta	Liczba punktów	Średnia wysokość [m]	Odchylenie standardowe
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany w oprogramowaniu TerraScan			
2m	94 564	204,847	1,28
15m	107 116	204,699	1,37
45m	107 116	204,699	1,37
70m	107 116	204,699	1,37
GRID o oczku siatki 1m x 1m wygenerowany na stacji cyfrowej DELTA			
	215 512	204,723	1,39

Zródło: opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

## WNIOSKI

Podsumowując analizę wysokościową NMT będącego produktem lotniczego skaningu laserowego oraz GRIDa wygenerowanego na stacji cyfrowej DELTA można sformułować poniższe wnioski.

– Dla jakości NMT, który został wygenerowany w oprogramowaniu firmy Terrasolid za pomocą aplikacji TerraScan oraz TerraModeler wykorzystując metodę triangulacji, istotną rolę pełni wartość boku trójkąta. W oparciu o przeprowadzone badania dla pięciu obszarów testowych zauważono, że taką samą dokładność uzyskano dla długości boku trójkąta równych: 15 m, 45 m oraz 70 m. Jednocześnie otrzymano wartości bardziej zbliżone do tych uzyskanych dla NMT generowanego na stacji cyfrowej DELTA. Natomiast mniejszą dokładnością charakteryzuje się wartość boku trójkąta równa 2 m. Nasuwa się wniosek, że optymalna długość boku trójkąta w metodzie triangulacji wynosi od 15 do 70 m.

1. Porównując średnie wysokości punktów siatki, otrzymanej w/w metodami uzyskano różnice w zakresie od 2 do 37 cm. Niskie wartości różnicy zanotowano w terenie użytkowanym rolniczo, który ponad to jest terenem płaskim. Większe rozbieżności występują w terenie zadrzewionym oraz zabudowanym.

2. Wyniki przeprowadzonego eksperymentu badawczego prowokują do dalszych rozważań. Nie ulega wątpliwości, że integracja danych lidarowych i fotogrametrycznych sprawdza się na obszarze o łagodnej i mało urozmaiconej rzeźbie terenu, czyli inaczej w terenach odkrytych. Im obszar jest bardziej skomplikowany, tym jakość się zmniejsza. Świadczą o tym wyniki uzyskane dla obszaru testowego nr 2 charakteryzującego się liczną zabudową, siecią dróg oraz deniwelacjami. Podobna sytuacja ma miejsce dla obszaru zadrzewionego i zakrzewionego, w którym gęsty las całkowicie przykrywa teren, więc tym trudniej zrysować linie nieciągłości oraz linie grzbietowe.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzony eksperyment badawczy wykazał, iż dane lidarowe i fotogrametryczne są komplementarne, a mankamenty jednej technologii mogą być niwelowane dzięki wykorzystaniu danych pozyskanych drugą metodą.

Analiza wysokościowa wykazała, że rozbieżności pod względem średniej wysokości punktu regularnej siatki GRID wygenerowanej pierwszym sposobem, jako produkt lotniczego skaningu laserowego oraz drugim sposobem, poprzez wykorzystanie cyfrowych zdjęć lotniczych i stacji fotogrametrycznej DELTA, są rzędu kilkunastu centymetrów.

Wygenerowanie Numerycznego Modelu Terenu korzystając z danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego nie jest tak bardzo czasochłonne, jak w przypadku otrzymania NMT dzięki zrysonym liniom strukturalnym rzeźby terenu, a dokładność pomiarów lidarowych pozwala na otrzymanie pre-

czyjnego produktu w postaci NMT. Poza tym w terenach, gdzie gęsta roślinność, np. las utrudnia widoczność przyziemia, praca w trybie stereoskopowym staje się bardzo czasochłonna i uciążliwa, a w dodatku nie zawsze otrzyma się zadowalające rezultaty. Dlatego też, warto połączyć dwie metody w celu uzyskania lepszych efektów i jednocześnie zmniejszyć nakład pracy. Wygenerowana siatka w postaci GRID, która następnie podlega kontroli na stacji cyfrowej oraz uzupełnieniu, gdy jest to konieczne, to nie tylko kontrola jakości NMT uzyskanego metodą lidarową, ale także szybki i łatwy sposób na zwiększenie dokładności opracowania.

Obecny rozwój technologii fotogrametrycznych nie tylko powoduje wzrost jakości danych wejściowych, ale także usprawnia pracę z tymi danymi oraz zmniejsza nakład pracy, w rezultacie otrzymując produkt o wysokiej jakości. Niniejsza publikacja podała przykład na usprawnienie pracy przy tworzeniu Numerycznego Modelu Terenu mając do dyspozycji nowoczesne dane cyfrowe i lidarowe [Bryś 2011].

## BIBLIOGRAFIA

- Bryś M., 2011, *Integracja danych pochodzących ze zdjęć lotniczych oraz lotniczego skaningu laserowego na przykładzie obiektu Chańcza* – praca magisterska napisana pod kierunkiem dr inż. Bogusławy Kwoczyńskiej, UR w Krakowie, 150 ss.  
Plan odnowy miejscowości Chańcza na lata 2010–2017, Chańcza 2010, Rada Gminy Raków.

Dr inż. Bogusława Kwoczyńska  
Katedra Geodezji Rolnej, Katastru i Fotogrametrii  
Uniwersytet Rolniczy im.H.Kołłątaja  
ul. Balicka 253a  
30-149 Kraków  
adres e-mail: rmkwoczy@cyf-kr.edu.pl

Mgr inż. Małgorzata Bryś  
MGGP S.A.  
Kraków ul. Lea 112  
adres e-mail: goska.bryś@gmail.com