

Stereometryczna weryfikacja DTM uzyskanego ze skaningu laserowego*

Lotniczy skaning laserowy zyskuje coraz większe znaczenie jako metoda pozyskiwania informacji o powierzchni topograficznej oraz elementach pokrycia terenu.

W ostatnich latach zostało opracowanych kilkanaście algorytmów do automatycznej filtracji danych laserowych. Niestety, istniejące metody posiadają jeszcze widoczne ograniczenia, związane z nieprawidłową eliminacją punktów w obszarach o skomplikowanym ukształtowaniu i użytkowaniu terenu i nadal niezbędny jest znaczący, interaktywny udział operatora.

W niniejszym referacie przedstawiona jest stereometryczna weryfikacja dwóch metod filtracyjnych: algorytmu aktywnego modelu TIN i algorytmu częstotliwościowego opartego na FFT. Algorytm aktywnego modelu TIN został rozwinięty na Wydziale Geodezji i Fotogrametrii w Królewskim Instytucie w Sztokholmie. Na opracowanym algorytmie bazuje komercyjne oprogramowanie - TerraScan. Metoda oparta na FFT została opracowana w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH i jest nadal w fazie badań empirycznych, określających jej wiarygodność i dokładność.

W prezentowanym opracowaniu dane uzyskane w wyniku filtracji zostały porównane ze stereogramami cyfrowych zdjęć lotniczych. Obrazy cyfrowe zostały pozyskane w trakcie nalotu laserowego, odpowiadają więc dokładnie danym uzyskanym w procesie skanowania.

Analiza polegała na wyborze próbek, charakteryzujących się różnym ukształtowaniem i użytkowaniem terenu (roślinność, zabudowa).

Dla każdego obszaru testowego zostały wyznaczone, na podstawie odchylek pomiędzy wzorcem pochodzącym z pomiaru stereometrycznego a odfiltrowaną powierzchnią, podstawowe parametry statystyczne: średni błąd kwadratowy RMSE, średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe.

Uzyskane wyniki ujawniają, że w przypadku terenów o skomplikowanym ukształtowaniu lub pokryciu, obydwie algorytmy wykazują pewne ograniczenia i różnice. Algorytm aktywnego modelu TIN lepiej eliminuje pomierzone punkty w miejscach pokrycia terenu gęstymi, wysokimi drzewami liściastymi oraz wysokimi trawami, niż algorytm oparty na FFT. W miejscach takich jak krzaki, pojedynczo rosnące drzewo, uzyskane wyniki odfiltrowania przy wykorzystaniu obu algorytmów są porównywalne. Natomiast teren o dużym stopniu zurbanizowania został prawidłowo odfiltrowany przez oba algorytmy.

1. Wprowadzenie

Filtracja danych laserowych to procedura eliminacji punktów odpowiadających elementom pokrycia terenu z pomierzonej chmury punktów. Pozwala ona na wyznaczenie przebiegu powierzchni topograficznej, czyli określenie DTM. Istnieje obecnie kilkanaście algorytmów do automatycznej filtracji danych laserowych. Do najważniejszych należą:

- algorytmy wykorzystujące metody analizy obrazu cyfrowego: filtry morfologiczne [Zhang i inni, 2002, Vosselman, 2001], metody gradientowe [Hyyppä i inni,

* Badania finansowane od roku 2004 w ramach grantu promotorskiego KBN: 18.25.150.697

- 2002], [Wack, Wimmer, 2002], segmentacja [Roggero, 2002], modelowanie aktywnych powierzchni [Elmqvist, 2002], FFT [Marmol, Jachimski, 2004].
- algorytmy wykorzystujące metody interpolacji: predykcja liniowa [Pfeifer i inni, 2001], interpolacja krzywymi sklejanymi [Brovelli i inni, 2002], aktywnego modelu TIN [Axelsson, 2000].

W ostatnim czasie główny nacisk jest położony na automatyzację procesu filtracji oraz określenie wiarygodności uzyskiwanych rezultatów. W 2003 roku w ramach Grupy Roboczej III/3 „3D reconstruction from airborne laser scanner and InSAR data” Komisji III ISPRS przeprowadzono badania związane z porównaniem istniejących metod automatycznej filtracji danych laserowych [Sithole, Vosselman, 2003]. Głównym celem prac badawczych było określenie sposobu funkcjonowania opracowanych algorytmów w określonych warunkach ukształtowania i pokrycia terenu.

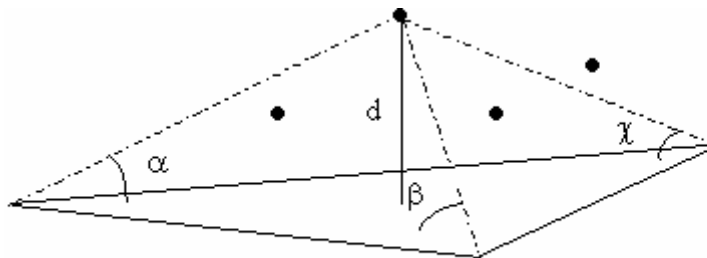
2. Krótka charakterystyka porównywanych algorytmów filtracyjnych

W niniejszym artykule zostanie przedstawiona stereometryczna weryfikacja dwóch metod filtracyjnych: algorytmu aktywnego modelu TIN [Axelsson, 2000] i algorytmu częstotliwościowego opartego na FFT [Marmol, 2002, 2003].

Algorytm aktywnego modelu TIN został opracowany na Wydziale Geodezji i Fotogrametrii w Królewskim Instytucie w Sztokholmie. Na opracowanym algorytmie bazuje komercyjne oprogramowanie, TerraScan [TerraScan, 1999]. Idea filtracji opiera się na powierzchni przebiegającej poniżej wszystkich punktów pomiarowych. Powierzchnia ta jest połączona z punktami terenowymi za pomocą tzw. punktów łączących, spełniających określone kryterium.

W pierwszym etapie na rozproszone punkty pomiarowe nałożona jest regularna siatka prostokątna, której rozmiar oczka jest określany przez parametry użytkownika. Dla każdego oczka dokonuje się wyboru punktu najniższego jako tzw. punktu łączącego, innymi słowy punkt ten jest klasyfikowany jako punkt terenowy. Na wyselekcjonowanych punktach przeprowadzana jest triangulacja, w wyniku której powstaje TIN, będący początkową reprezentacją powierzchni topograficznej. Oprócz punktów łączących, cała powierzchnia początkowa przebiega poniżej punktów pomiarowych. Ostateczna powierzchnia jest generowana przez dodawanie kolejnych punktów do TIN-a. Kolejne punkty są wybierane ze zbioru punktów pomiarowych i na podstawie określonych kryteriów są akceptowane lub odrzucane jako nowe punkty łączące. Z każdym kolejnym krokiem iteracyjnym powierzchnia topograficzna jest dokładniej odzwierciedlana. Określono dwa kryteria doboru nowych punktów łączących:

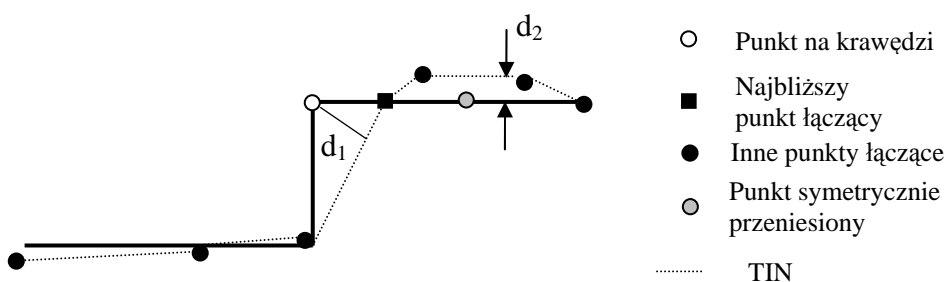
- odległość iteracyjna – bazuje na odległości pomiędzy kandydatem na punkt łączący a płaszczyzną trójkąta w danym kroku operacji,
- kąt iteracyjny – maksymalny kąt powstały pomiędzy prostą przechodzącą przez punkt łączący i punkt będący kandydatem na punkt łączący, a płaszczyzną trójkąta (Rys.1).



Rys. 1. Kryteria doboru nowych punktów łączących: d – odległość iteracyjna, α , β , γ - kąt iteracyjny.

Parametry określające dopuszczalną odległość i kąt iteracyjny wyznaczone są w oparciu o medianę wartości, oszacowaną z histogramów różnic wysokości i kątów w danym kroku iteracyjnym.

Algorytm jest właściwy dla powierzchni ciągłych. W przypadku nieciągłości powierzchni topograficznej występujących często na terenach zurbanizowanych, następuje błędne usunięcie krawędzi, ponieważ przekraczają one ustaloną wartość progową. W takich przypadkach rozważane jest także otoczenie punktu. Punkt na krawędzi zostaje symetrycznie przeniesiony, względem najbliższego punktu łączącego, wzdłuż prostej łączącej te dwa punkty. Wyznaczana jest jego różnica względem płaszczyzny trójkąta (Rys.2). W każdym kolejnym kroku iteracji TIN będzie się rozszerzał w kierunku nieciągłości. Proces iteracji jest zakończony, gdy nie istnieją żadne punkty pomiarowe spełniające zadane kryterium.



Rys.2. Schemat postępowania w przypadku nieciągłości terenu: $d_1 > d_{max}$, $d_2 < d_{max}$.

Algorytm częstotliwościowy oparty na FFT został opracowany w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w 2001 roku. Metoda wykorzystuje dwa główne narzędzia teorii przetwarzania sygnałów cyfrowych: analizę widmową (FFT) i filtry cyfrowe. Analiza widmowa umożliwia otrzymanie zależności pomiędzy dziedziną przestrzenną powierzchni topograficznej a jej dziedziną częstotliwościową. Dyskretne dane przestrzenne są opisywane w dziedzinie częstotliwości przez zastosowanie FFT.

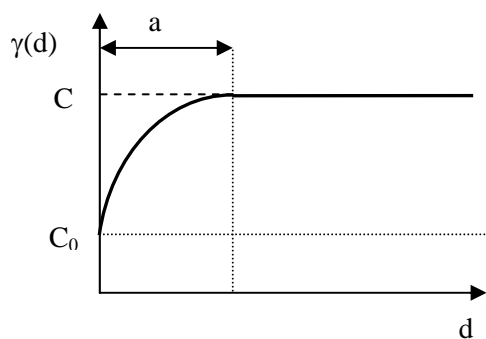
Kwadrat modułu zespolonej funkcji FFT jest funkcją rzeczywistą nazywaną gęstością widmową mocy (widmo mocy) [Marmol, 2002]. Wykres, będący estymacją gęstości widmowej mocy to tzw. periodogram. Znajomość charakterystyki tej krzywej pozwala na wyznaczenie przedziału reprezentującego prawdziwe wysokości powierzchni topograficznej i przedziału szumu informacji (wyznaczenie tzw. częstotliwość odcięcia f_c).

W kolejnym etapie przeprowadzana jest analiza semiwariogramu, podstawowego wykresu teorii geostatystycznej. Nowatorstwo geostatystyki polega na potraktowaniu analizowanego parametru (w naszych badaniach: współrzędnej wysokościowej), jako tzw. „zmiennej zregionalizowanej”, której wartości są funkcją współrzędnych położenia punktów pomiaru. Strukturę zmienności opisuje w syntetycznej formie semiwariogram, który określa zależność między średnim zróżnicowaniem wartości wysokości (semiwariancją) i odległością między punktami pomiaru.

Dla dyskretnej i regularnej sieci pomiarów wartości semiwariancji $\gamma(d)$ ustala się ze wzoru:

$$\gamma(d) = \frac{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + d)]^2}{2n}$$

gdzie: $z(x)$, $z(x+d)$ – wartości wysokości w punktach pomiarowych oddalonych o d
 n – liczba par punktów pomiarowych odległych o d



C_0 – podstawa wywołana składową losową, lokalne zróżnicowanie w skali pojedynczej próbki, tzw. „efekt samorodków” (*ang. nugget effect*),

C – wartość progowa (*ang. sill*),

a – zasięg oddziaływania,

h – odległość,

$\gamma(h)$ – semiwariancja

Rys. 3. Przykładowy semiwariogram.

Aby możliwe było przeprowadzenie ilościowej oceny zmienności wysokości na badanych powierzchniach, konieczne jest przybliżenie semiwariogramów empirycznych prostymi funkcjami analitycznymi. Analiza semiwariogramów

teoretycznych pozwala na określenie parametru tzw. zasięgu oddziaływania a , który jest przyjmowany jako wartość rzędu filtru.

Znajomość częstotliwości odcięcia i rzędu filtru pozwala na zastosowanie filtru cyfrowego, który nie przepuszcza określonych składowych częstotliwościowych powierzchni topograficznej. W niniejszych badaniach wykorzystano filtr dolnoprzepustowy o skończonej odpowiedzi impulsowej (ang. *Finite Impulse Response* – *FIR*). W celu poprawienia charakterystyki częstotliwościowej tego filtru wprowadzono okno Bartletta [Marmol, 2002].

3. Charakterystyka materiałów wykorzystanych do badań

Materiały do prezentowanych badań empirycznych [Piechocka, 2004] zostały udostępnione przez firmę Simmons Aerofilms z siedzibą w Cheddar w Anglii. Szczegółowe informacje dotyczące obszaru nie zostały ujawnione. Otrzymane dane są w formie 3 katalogów. W pierwszym z nich jest obraz binarny skaningu laserowego, w drugim zdjęcia wykonywane kamerą cyfrową podczas skaningu. Ostatni katalog to zbiór surowych danych skaningu laserowego, pomiary wykonane przez system GPS, INS oraz współrzędne punktów (X,Y,Z) pomierzone skanerem laserowym.

Zdjęcia zostały wykonane kamerą cyfrową firmy Hasselblad.

Parametry kalibracji kamery cyfrowej Hasselblad:

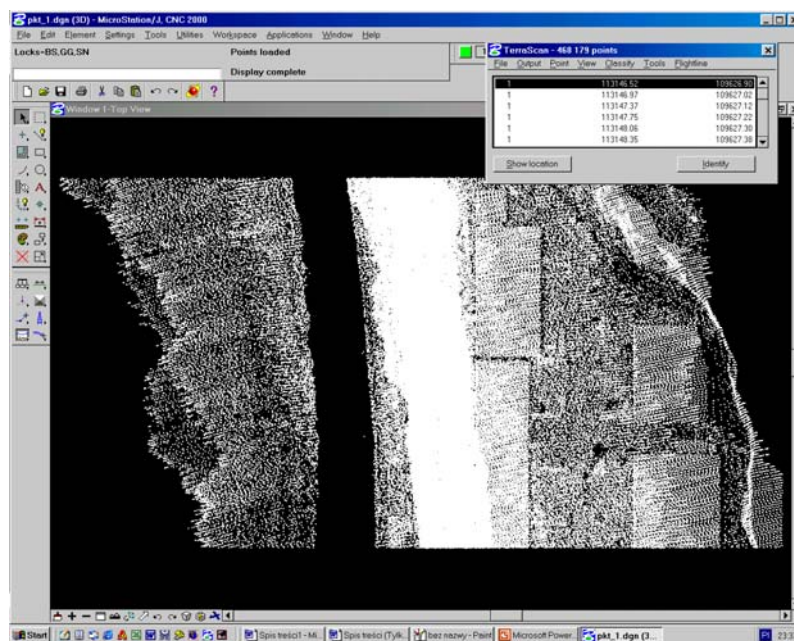
- rozmiar zdjęcia = 2032 x 3056 (pix)
- współrzędne punktu głównego (X_oY_o)= 1.17, 2.72 (pix)
- stała kamery $c_k = 4311.72$ (pix)
- dystorsja pozostała niewiadomą

4. Analiza filtracji metodą aktywnego modelu TIN

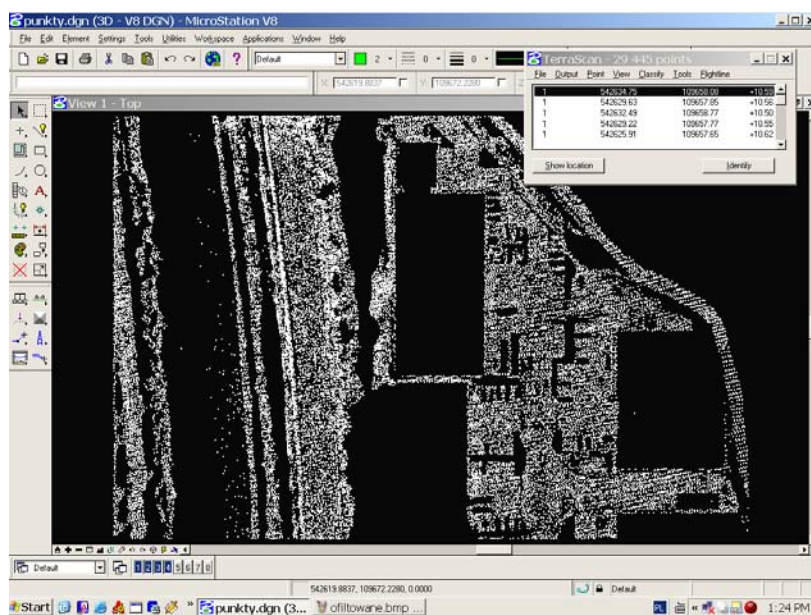
Przy pierwszej metodzie filtracyjnej zastosowano algorytm Axelssona, który jest wykorzystany w komercyjnym oprogramowaniu Terrascan. W nakładce MDL pod MicroStation po wczytaniu zeskanowanych punktów, wybiera się metodę klasyfikacji punktów, a procedura filtrująca to procedura o nazwie „GROUND”. Procedura ta umożliwia przeprowadzenie triangulacji na najniższych punktach. W wyniku triangulacji powstaje siatka TIN, która jest wstępną reprezentacją powierzchni topograficznej. Aby filtracja została prawidłowo przeprowadzona należy oszacować wstępne wartości parametrów, które są uzależnione od obszaru badań. Należą do nich: maksymalna wielkość budynków, kąt iteracyjny i długość iteracyjna. Na początku analizy określa się maksymalną wielkość budynków. Oznacza to, że na obszarze o wielkości $[max_szerokość_bud \times max_długość_bud]$, przynajmniej jeden punkt zostanie zaklasyfikowany do powierzchni topograficznej. Na analizowanym terenie długość największego budynku wynosiła 60 m.

Dla badanego obszaru przyjęto kąt iteracyjny 5°, ponieważ teren był płaski. Długość iteracyjną przyjęto 1.5 m.

Na Rys.4 przedstawiono wszystkie punkty pomiarzone podczas skaningu laserowego. Następny zrzut z ekranu przedstawia punkty odfiltrowane z wpisanymi parametrami iteracyjnymi podanymi powyżej.



Rys.4. Wczytanie wszystkich punktów z pomiaru skanerem laserowym (program MicroStation, nakładka Tscan).

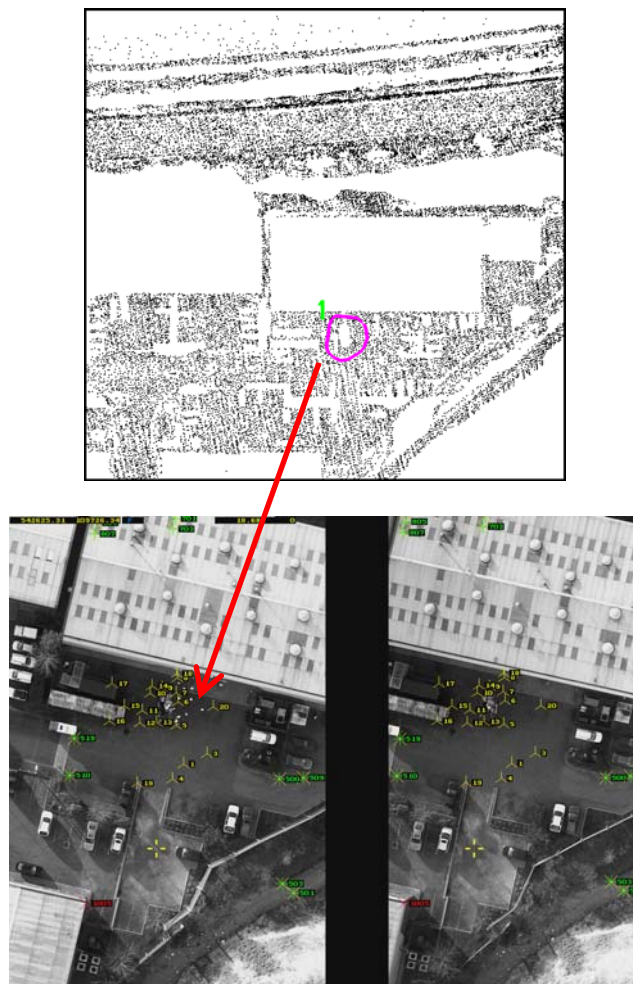


Rys.5. Punkty zaklasyfikowane do powierzchni terenu. Filtracja przeprowadzono w programie MicroStation, nakładka Tscan.

Analiza dotyczyła wybranych próbek, charakteryzujących się różnym ukształtowaniem i charakterem terenu (roślinność, zabudowa).

Zostało wybranych siedem obszarów, różnorodnych pod względem pokrycia terenu. Ze skanu odczytywano w MicroStation współrzędne X,Y,Z punktów. Każda próbka zawierała 30 punktów. Współrzędne poszczególnych punktów zapisywano do pliku z rozszerzeniem *.pnt. Plik, zawierający informacje na temat punktów w danej próbce, wczytywano do VSD i analizowano punkt po punkcie.

Przykładowa próbka – obszaru zurbanizowanego:



Rys.5. W górnej części: odfiltrowane punkty metodą aktywnego modelu TIN z zaznaczonym fragmentem próbki nr 1, w dolnej: stereogram obrazu z wczytanymi punktami danej próbki.

5. Filtracja metodą częstotliwościową opartą na FFT

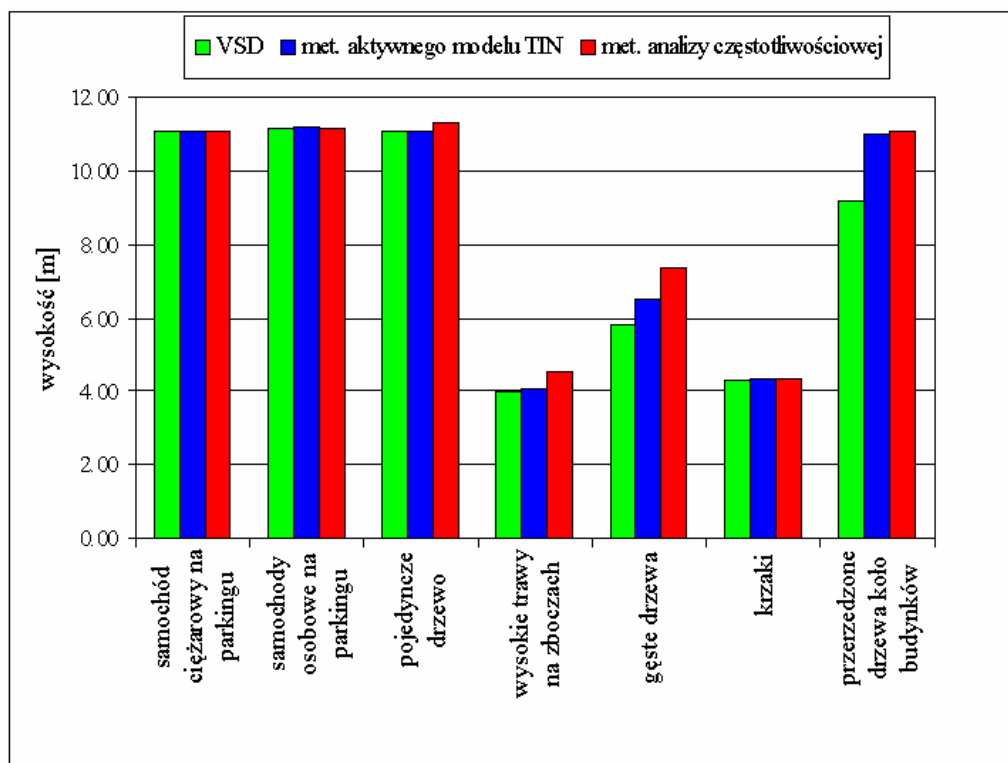
Opracowana w AGH metoda działa iteracyjnie i składa się z kilku etapów. Pierwszy etap polega na wyinterpolowaniu, z chmury punktów rozproszonych, wysokości w narożnikach przyjętej regularnej siatki kwadratów. Interpolacja jest konieczna, ponieważ FFT operuje na danych regularnych. W kolejnym etapie konieczne jest usunięcie trendu. Analiza trendu polegała na aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów zbioru punktów pomiarowych funkcją wielomianową. Po przeprowadzeniu interpolacji i usunięciu trendu można zastosować FFT oraz określić częstotliwość odcięcia, która wynosiła w tym przypadku 0.02 [1/m]. Ostatnim etapem jest wyznaczenie rzędu filtru na podstawie analizy semiwariogramu. Dla badanego obszaru zasięg oddziaływania, a tym samym rząd filtru wynosił 46 m.

Poprawność odfiltrowanych danych badano na tej samej zasadzie jak w algorytmie aktywnego modelu TIN. W pierwszym etapie wybrano próbki. Wybierano te same obszary do przeprowadzenia badań, co w poprzedniej analizie. Następnie porównano odfiltrowane punkty z obrazem stereoskopowym. Każda próbka to zbiór 30 punktów odczytanych z obszaru o promieniu około 5m. Odczytane współrzędne punktów, poszczególnych próbek, zapisywano w plikach o rozszerzeniu *.pnt. Pliki te wczytywano do VSD, gdzie przeprowadzono analizę stereoskopową.

6. Porównanie i analiza zastosowanych algorytmów filtracyjnych

Analizę porównawczą przedstawiono poniżej na wykresie nr 1. Przebadano siedem obszarów na obydwu skanach. Obszary badawcze wybierano tak, aby reprezentowały różne sposoby użytkowania terenu (budynki, roślinność, samochody na betonowym parkingu). Po odfiltrowaniu zeskanowanych punktów niezależnie przy użyciu obydwóch algorytmów stwierdzono, że budynki zostały poprawnie wyeliminowane jako punkty nienależące do terenu. Kolejna próbka to parking, miejsce gdzie jedynymi przeszkodami były zaparkowane samochody. Samochody były dobrymi obiektami do sprawdzenia czy algorytmy usuwają punkty położone od 1.70 m do 3.00 m powyżej powierzchni terenu. Kolejne próbki wybrano w następujących miejscach wysokie, gęste drzewa liściaste; krzaki; wysokie trawy; pojedyncze drzewo; luki w zakrzywieniach. Na stereogramie nie udało się znaleźć obszaru porośniętego drzewami iglastymi.

Na wykresie, na osi rzędnych, umieszczono średnią arytmetyczną wysokości punktów ze skaningu, po zastosowaniu obydwu algorytmów filtracyjnych dla poszczególnych próbek. Dołączono również wysokość odczytaną z obrazu stereoskopowego w programie VSD. Natomiast na osi odciętych zamieszczono poszczególne próbki z odpowiednią nazwą.



Wykres 1. Porównanie metod filtracji z obserwacją stereometryczną (VSD) dla poszczególnych próbek.

Tabela nr 1.
Średnie wartości wysokości oraz odchylenia standardowe poszczególnych próbek uzyskane przy zastosowaniu dwóch algorytmów filtrujących oraz pomiaru stereoskopowego.

próbki	wysokość [m]		
	VSD	met. aktywnego modelu TIN	met. analizy częstotliwościowej
samochód ciężarowy na parkingu (P-1)	11.10	11.09±0,002	11.08±0,001
samochody osobowe na parkingu (P-2)	11.16	11.20±0,002	11.17±0,007
pojedyncze drzewo (P-7)	11.10	11.10±0,006	11.30±0,003
wysokie trawy na zboczach (P-9)	4.00	4.08±0,006	4.52±0,008
gęste drzewa (P-4)	5.80	6.51±0,006	7.00±0,003
krzaki (P-5)	4.30	4.35±0,007	4.37±0,010
Przerzedzone drzewa koło budynków (P-6)	9.20	11.00±0,010	11.10±0,011

Analizując wykres, przedstawiający wyniki uzyskane po odfiltrowaniu punktów, stwierdzono, że różnice pomiędzy dwoma metodami są nieduże.

Zarówno metoda aktywnego modelu TIN, jak i metoda analizy częstotliwościowej dokładnie klasyfikują punkty w przypadku budynków i parkingu (samochody ciężarowe i osobowe).

Dla próbki porośniętej krzakami obie metody uzyskały podobny wynik, metoda Axelssona 4.35 m, natomiast w metodzie analizy częstotliwościowej 4.37 m. Pomiar stereoskopowy odbiegał nieznacznie od odfiltrowanych punktów, gdyż wyniósł 4.30 m (P-5).

W przypadku dużego zagęszczenia drzew liściastych, maksymalna różnica pomiędzy metodami wynosi 88 cm. Metoda aktywnego modelu sieci TIN lepiej sklasyfikowała punkty nienależące do powierzchni ziemi. Jednak i tutaj widać różnicę w stosunku do pomiaru na VSD.

Dokładność odfiltrowania wysokich traw na poboczu drogi jest wyższa w przypadku metody aktywnego modelu TIN. Jednakże, należy zauważyć, że dokładny wybór punktu odniesienia na stereogramie nie jest do końca wiarygodny, ponieważ odfiltrowane trawy rosną na zboczu rzeki. Dlatego trudno było dokładnie określić tą samą wysokość terenu.

7. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej pracy była konfrontacja DTM powstałego ze skaningu laserowego z pomiarem stereometrycznym, jak również sprawdzenie i porównanie dwóch metod filtracji, metody aktywnego modelu TIN oraz metody analizy częstotliwościowej, opartej na FFT.

Powierzchnia wykorzystana do analizy, pod względem zabudowy i użytkowania terenu (drzewa, krzaki, wysokie trawy) stanowiła dobry, ale nie doskonały przykład do porównania algorytmów filtracji. Brakowało dużych powierzchni pokrytych lasami liściastymi, aby było można sprawdzić jak w takich przypadkach zachowują się algorytmy. Algorytmy nie zostały również sprawdzone dla terenów pokrytych drzewami iglastymi, gdyż takiego rodzaju zadrzewienie nie występowało na polu testowym.

Podsumowując analizę, na podstawie przedstawionych powyżej wyników, nie można wysunąć wniosku, aby któryś z algorytmów filtrujących był optymalny. Jednak dla większości próbek, wyniki uzyskane po odfiltrowaniu punktów dwoma metodami są porównywalne z pomiarem stereoskopowym. Algorytmy obu metod filtracji sprawdziły się i ich wyniki są porównywalne na polach testowych: parking (P-1, P-2), samotne drzewo liściaste (P-7), jak również w miejscu porośniętym krzakami (P-5). Różnica wysokości terenu po odfiltrowaniu przeredzonych drzew między metodą Axelssona (P-6), a metoda analizy częstotliwościowej wynosi 10 cm. Natomiast znacznie lepiej wypadł algorytm aktywnego modelu TIN w przypadku terenów porośniętych wysokimi trawami (P-9) oraz gęstymi drzewami (P-4). Na tych polach testowych różnice odpowiednio wynoszą 44 cm i 49 cm.

Powyższa analiza potwierdza, że generowanie DTM przy pomocy skaningu laserowego posiada jeszcze pewne ograniczenia, które wymagają dalszych badań.

Warto nadmienić, że generowanie DTM z wykorzystaniem danych ze skaningu laserowego jest dużo szybsze, niż tradycyjną metodą fotogrametryczną. Altimetria laserowa jest metodą korzystniejszą w przypadku terenów zalesionych. W tradycyjnej metodzie fotogrametrycznej trudno jest oszacować wysokość terenu na obszarach gęsto zalesionych, co w przypadku algorytmu aktywnego modelu TIN nie stanowi problemu.

Wynik przeprowadzonych badań pozwala stwierdzić, że rozwój i udoskonalanie metod filtracji laserowej jest zdecydowanie zagadnieniem przyszłościowym.

Literatura:

- Axelsson P., 2000, DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXIII/4B, Amsterdam.
- Brovelli M. A., Cannata M., Longoni U. M., 2002, Managing and processing LIDAR data within GRASS. Proceedings of the Open source GIS – GRASS user conference, Trento.
- Hyypä J., Pyssalo U., Hyypä H., Samberg A., 2002, Elevation accuracy of laser scanning – derived digital terrain and target models in forest environment. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV / 3A, Graz.
- Marmol U., 2002, Analiza częstotliwościowa jako metoda filtrowania profili powierzchni topograficznej. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji Vol. 12 b „Fotogrametria i teledetekcja w społeczeństwie informacyjnym”, Warszawa.
- Marmol U., 2003, Pozyskiwanie Numerycznego Modelu Powierzchni Topograficznej (NMPT) w oparciu o dane wysokościowe pochodzące z lotniczego skanera laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji Vol. 13 b „Fotogrametria bliskiego i dalekiego zasięgu”. Wrocław.
- Marmol U., Jachimski J., 2004, A FFT based method of filtering airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXIII/3, s. 1147-1152, Istanbul.
- Piechocka N., 2004, Weryfikacja DTM ze skaningu laserowego na podstawie pomiarów stereometrycznych, praca dyplomowa, AGH Kraków.
- Pfeifer N., Stadler P., Briese Ch., 2001, Derivation of digital terrain models in SCOP++ environment. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models, Stockholm
- Roggero M., 2002, Object segmentation with region growing and principal component analysis. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV / 3A, Graz.
- Sithole G., Vosselman G., 2003, Report: ISPRS comparison of filters. ISPRS Commission III, Working Group 3. <http://www.geo.tudelft.nl/frs/isprs/filtertes>
- TerraScan, 1999, TerraScan for Microstation. User's guide. TerraSolid Ltd.
- Vosselman G., 2001, Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm.

- Wack R., Wimmer A., 2002, Digital terrain models from airborne laser scanner data – a grid based approach. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV / 3B, Graz.
- Zhang K., Chen S., Whitmann D., Shyu M., Yan J., Zhang C., 2002, A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data. Journal of Latex Class Files. Vol.1(8).