

DOKŁADNOŚĆ NMPT TWORZONEGO METODĄ AUTOMATYCZNEGO DOPASOWANIA CYFROWYCH ZDJĘĆ LOTNICZYCH

ACCURACY OF DSM BASED ON DIGITAL AERIAL IMAGE MATCHING

Joanna Lucyna Kubalska, Ryszard Preuss

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej

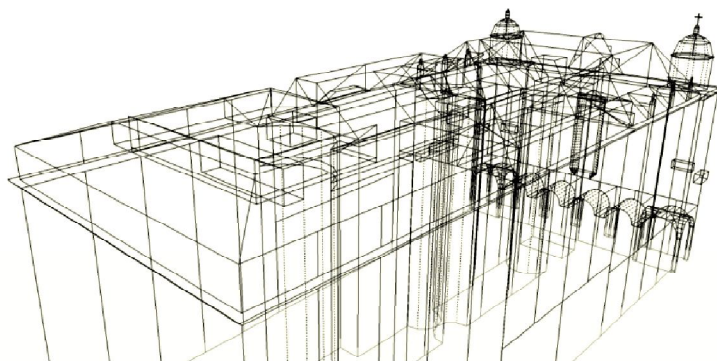
SŁOWA KLUCZOWE: NMPT, true-ortho, modele 3D miast, klasyfikacja obiektowa, cyfrowe dopasowanie obrazów, ALS, cyfrowe zdjęcia lotnicze

STRESZCZENIE: NMPT stanowią w bazach danych GIS coraz częściej samodzielny produkt, jak również są niezbędnymi danymi inicjalnymi do tworzenia innych produktów takich jak modele 3D miast, true-ortho czy klasyfikacja obiektowa. W niniejszym artykule prezentowane są wyniki badań praktycznych generowania NMPT na potrzeby klasyfikacji zieleni na terenach zurbanizowanych. Posiadane dane źródłowe pozwoliły na wytworzenie potrzebnego produktu zarówno stosując metodę automatycznego dopasowania cyfrowych zdjęć wykonaną kamerą Ultra Cam-D firmy Vexcel, jak również poprzez przetwarzanie chmury punktów zarejestrowanych techniką lotniczego skaningu laserowego (ALS). Do utworzenia NMPT z zastosowaniem techniki automatycznego dopasowania zastosowano program Match –T DSM firmy INPHO. Program ten optymalizuje konfigurację stereogramów z bloku wykorzystywanych zdjęć do tego procesu, co gwarantuje wysoką dokładność wysokościową wyznaczanych punktów i minimalizuje obszary martwych pól. Ocena uzyskanej dokładności wysokościowej punktów metodą matchingu została dokonana poprzez porównanie NMPT wytworzonego programem Match–T DSM z modelem wygenerowanym na podstawie danych lidarowych. Dalsze przeznaczenie tworzonych NMPT zdecydowało, że został on utworzony w siatce GRID o wymiarze oczka siatki 1m. Przy takich parametrach wyznaczono model różnicowy, który pozwolił na wyznaczenie dokładności względnej porównywanych modeli. Przeprowadzona analiza wskazuje, że generowanie NMPT techniką automatycznego dopasowania cyfrowych zdjęć jest konkurencyjne względem modeli opracowanych z chmury punktów pozyskanej techniką ALS. Dlatego też jeżeli na dany obszar terenu wykonywane są cyfrowe zdjęcia lotnicze o geometrii minimalizującej w praktyce obszary martwych pól dodatkowa rejestracja przy pomocy techniki skaningu laserowego wydaje się zbędna.

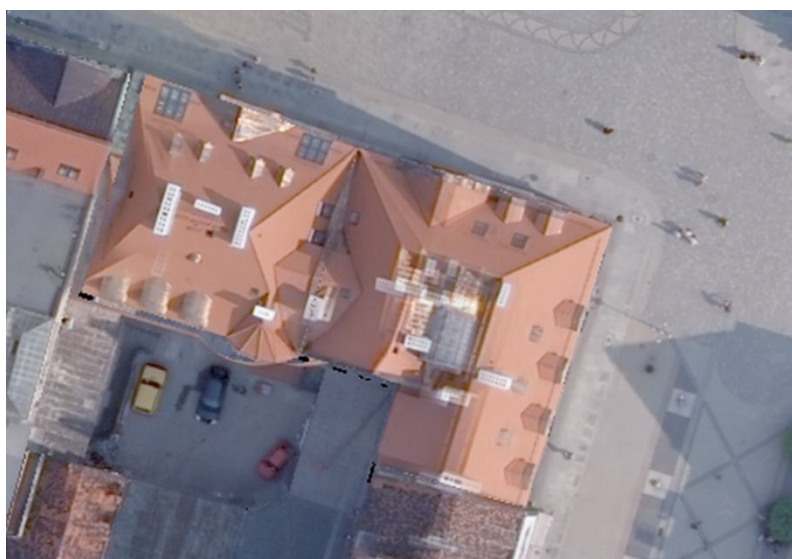
1. WPROWADZENIE

Obserwujemy coraz szersze zapotrzebowanie na Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT) opisujący w sposób dyskretny zarówno topografię terenu jak również wszystkie obiekty na niej występujące. NMPT stanowi już często standardowy samodzielny produkt w prowadzonych bazach danych. Przykładem bazy danych gdzie NMPT postrzegany jest jako produkt standaryzowany i referencyjny jest baza oparta na danych obrazowych prowadzona przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej

w Warszawie. Informacje o tym produkcie wraz z usługą przeglądania są dostępne w krajowym geoportalu utworzonym zgodnie z wymogami dyrektywy INSPIRE. Najczęściej NMPT wykorzystywany jest jako dane źródłowe do tworzenia takich produktów nowej generacji jak trójwymiarowe modele miast, true-ortho czy wykonywanie klasyfikacji obiektowej w synergii z danymi obrazowymi. Rysunki I.1, I.2 i I.3 stanowią prezentację przykładowych takich produktów, do wytworzenia których, niezbędny jest NMPT.



Rys. I.1 Przykład modelu szkieletowego budowli



Rys.I.2 Fragment true-ortho dla centrum miasta

Produkty tego typu są tworzone głównie na obszary miejskie i muszą spełniać wysokie wymagania dokładnościowe. Określają je już często zdefiniowane standardy np.: modele miast powinny być zgodne z modelem CityGML. Tym wymaganiom technicznym mogą sprostać tzw. gęste NMT lub NMPT. Pod tymi pojęciami należy rozumieć modele

odtworzyć ukształtowanie pionowe terenu z dokładnością kilkunastu centymetrów, które mogą być utworzone w wyniku przetwarzania pierwotnie pozyskiwanych dyskretnych punktów z gęstością do kilkudziesięciu punktów na m² odpowiednimi metodami.

Wyróżniona klasa roślinności	Zadane warunki	
	NDVI	Wysokość [m]
trawy	>0.10	$h < 0.20$
krzewy		$0.20 < h < 1.50$
niskie drzewa		$1.50 < h < 8.00$
wysokie drzewa		$h > 8.00$



warstwa traw



warstwa wysokich drzew

Rys.I.3 Przykład klasyfikacji roślinności na terenie zurbanizowanym

Główną metodą rejestrującą bezpośrednio „chmurę punktów” o odpowiedniej gęstości jest technika lotniczego skaningu laserowego (ALS).

Rejestracja danych tą techniką charakteryzuje się następującymi cechami:

- regularne pokrycie obszaru danymi pomiarowymi,
- duża gęstość pomiaru (aktualnie do kilkudziesięciu punktów na m²),
- wysoka dokładność wyznaczenia wysokości (od kilku do kilkunastu cm),
- niewielka liczba szumów (błędnych pomiarów),
- zdolność penetracji wiązki pomiarowej poprzez roślinność.

Innym sposobem pozyskiwania gęstego NMT lub NMPT może być jego generowanie techniką dopasowania obrazów (*matchingu*) stereogramów zdjęć lotniczych. Realizacja tego procesu jako procesu w pełni automatycznego została wdrożona do produkcji w latach 90-tych XX wieku (Gleuch, 2009). W tym czasie do tego zadania stosowano zeskanowane zdjęcia analogowe, a wyniki nie były w pełni zadowalające.

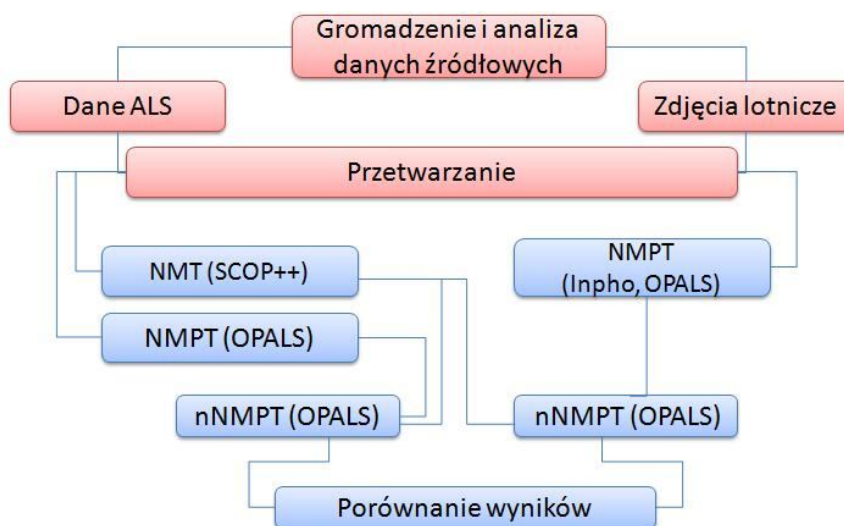
Po 2001 roku do rejestracji danych obrazowych zaczęto stosować cyfrowe kamery lotnicze. Obrazy pozyskiwane tymi kamerami posiadają 11-bitową radiometrię i charakteryzują się znacznie korzystniejszym współczynnikiem sygnału do szumu w porównaniu z obrazami cyfrowymi pozyskiwanymi drogą skanowania analogowych zdjęć lotniczych. Te kamery zmieniły również podejście do krycia zdjęciami terenów zurbanizowanych. Dla obszarów pokrytych zwartą i wysoką zabudową powszechnie

zaczęto stosować zwiększone pokrycie podłużne i poprzeczne (80/60) zdjęć lub jeszcze większe. Jednocześnie rozwinięto nowe pakiety oprogramowania do cyfrowej korelacji zdjęć opartej na procedurze „multi- image matching” umożliwiające wykorzystanie zdjęć o zwiększonym pokryciu. Wymienione zmiany technologiczne wprowadzone do rejestracji danych obrazowych oraz modyfikacje oprogramowania przyczyniły się do jakościowej poprawy produktów uzyskiwanych techniką dopasowania obrazów (*matchingu*) cyfrowych zdjęć lotniczych ((Lemaire, 2008, Gluech, 2009).

Niniejszy artykuł poświęcony jest prezentacji wyników badań porównujących te dwie metody pozyskiwania danych pierwotnych do generowania NMPT.

2. METODYKA PROWADZENIA BADAŃ

W ramach wykonywania pracy dyplomowej „Inwentaryzacja zieleni na obszarze zurbanizowanym z wykorzystaniem True-Ortho w podczerwieni opracowanym w pakiecie programów Inpho” (Kubalska ,2013) niezbędnym było utworzenie NMPT dla celów klasyfikacji obiektowej.



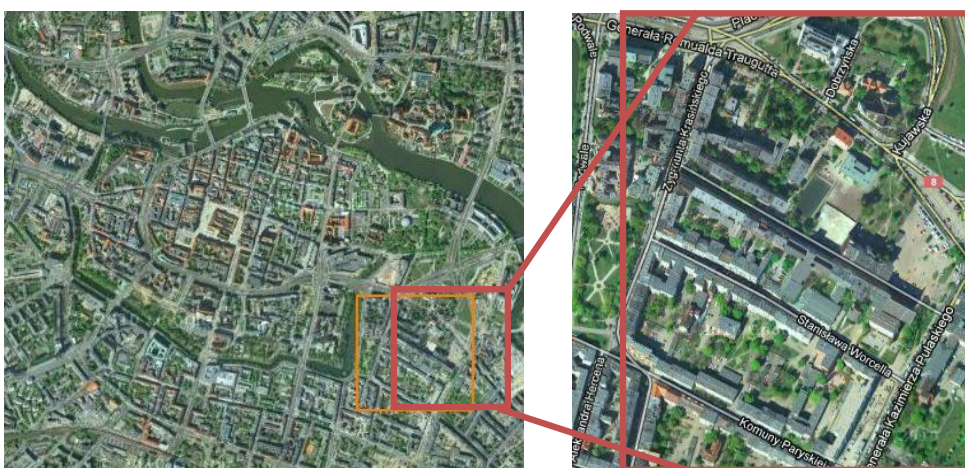
Rys. II.1 Schemat prowadzenia badań

Mając do dyspozycji dane źródłowe scharakteryzowane w rozdziale 3 produkt w postaci gęstego Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (nNMPT) postanowiono wygenerować zarówno z danych ALS jak i dostępnych zdjęć lotniczych i wynikowo określić przydatność porównywanych metod do utworzenia NMPT w postaci GRID o rozmiarze oczka siatki 1m (używanego następnie dla celów klasyfikacji zieleni). Badania te przeprowadzono według schematu przedstawionego na rys. II.1.. Dane z lotniczego skaningu lotniczego przetwarzano w programach SCOP++ oraz OPALS. Zastosowanie modułu OpalsAlgebra w systemie OPALS (oprogramowanie Instytutu Fotogrametrii

Politechniki Wiedeńskiej) pozwoliło na uzyskanie efektu poprawnego wygładzenia powierzchni gładkich (np. jezdni) oraz dobry opis powierzchni chropowatych (np. obszarów wysokiej roślinności). Dla generowania nNMPT metodą automatycznego dopasowania obrazów (ang. matching) zastosowano pakiet programowy firmy INPHO (moduł MATCH-T DSM). Program ten realizuje wyznaczanie chmury punktów homologicznych na zadanym obszarze z stereogramów zdjęć posiadających optymalną geometrię. Wynik tego procesu, który przebiega w pełni automatycznie zależy od przyjętych parametrów sterujących. W niniejszych badaniach przyjęto parametry sterujące określone w pracy „Badanie gęstości wyznaczanych punktów technologią automatycznej korelacji na podstawie zdjęć cyfrowych” (Biegała, 2008).

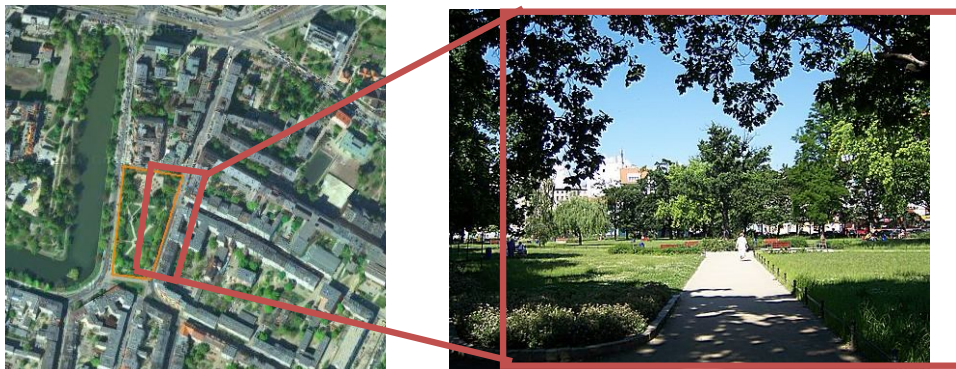
3. OPIS WYKONANYCH PRAC EKSPERYMENTALNYCH

Przeprowadzone badania wykonano dla obszaru położonego na Starym Mieście Wrocławia, usytuowanego w centralnej części miasta po lewej stronie Odry, a dokładnie w sąsiedztwie zachowanych do dzisiejszych czasów fragmentów Fosi Miejskiej. Wybrany obszar miasta jest terenem skomplikowanym dla tworzenia NMPT i docelowo przeprowadzenia klasyfikacji zieleni na podstawie danych obrazowych. Na rys. III.1 kolorem czerwonym zaznaczono wybrany do opracowania fragment miasta i jego lokalizację na zdjęciu.



Rys III.1 Fragment Wrocławia wybrany do dalszego opracowania
Źródło: www.maps.google.pl

Dla przeprowadzenia klasyfikacji obiektowej jest to reprezentatywny obszar, na którym znajdują się zarówno otwarte przestrzenie terenów zieleni miejskiej, boiska szkolne, jak i zamknięte podwórka otoczone wysoką zabudową z licznymi zadrzewieniami i zakrzewieniami. Teren opracowania zawiera się między ulicami Podwale, Generała Romualda Traugutta, Generała Kazimierza Pułaskiego oraz Komuny Paryskiej. Charakterystycznym miejscem w tej części miasta jest Park tzw. Worcella prezentowany na rysunku III.2



Rys. III.2 Tereny zieleni we Wrocławiu: Park Worcella przy Fosie Miejskiej
Źródło: www.maps.google.pl

3.1. CHARAKTERYSTYKA WYKORZYSTYWANYCH MATERIAŁÓW

Dla wykonania prac eksperymentalnych zgromadzono, przeanalizowano i przetworzono następujące materiały:

- lotnicze zdjęcia cyfrowe,
- projekt wyrównanego bloku zdjęć (aerotriangulacja),
- dane lotniczego skaningu laserowego (LIDAR).

Dane te zostały pozyskane dla fragmentu Starego Miasta Wrocławia w maju 2006 roku i udostępnione dzięki uprzejmości firmy GISPRO Sp. z o.o.

Lotnicze zdjęcia cyfrowe

Firma GISPRO Sp. z o.o. wykonała lotnicze zdjęcia cyfrowe dla obszaru centrum Wrocławia, łącznie w ramach całego projektu wykonano ok. 3500. Pozyskano je wielkoformatową, wieloobiektywową, cyfrową kamerą UltraCam_D. Udostępnione zdjęcia pozyskane zostały w czterech kanałach: czerwonym (R), zielonym (G), niebieskim (B) oraz w kanale bliskiej podczerwieni (NIR) z rozdzielczością radiometryczną wynoszącą 12 bit. Rysunek II.3 ilustruje przykładowe zdjęcia wykorzystywane w badaniach. Tak duża rozdzielczość radiometryczna wykorzystywanych zdjęć jest istotną zaletą na obszarach zurbanizowanych o wysokiej zabudowie. Zobrazowania wielospektralne rejestrowane w 4-krotnie niższej rozdzielczości geometrycznej zostały przetworzone w wyniku procesu tzw. wyostrzenia (ang. *pansharpen*) do rozdzielczości obrazu panchromatycznego. W ramach tego projektu zdjęcia wykonano z rozdzielczością przestrzenną GSD=10 cm i pokryciem podłużnym i poprzecznym wynoszącym odpowiednio p=70% oraz q=60%, umożliwiającym minimalizację martwych pól i poprawne wygenerowanie *true-ortho*. Obrazy pozyskano w formacie 23 x 15 cm i zapisano je w uniwersalnym formacie plików

graficznych TIFF (ang. *Tagged Image File Format*). W tabeli III.1 zestawiono dane dotyczące zdjęć użytych w projekcie.



Rys. III.3. Zdjęcia wykorzystane w pracy w barwach rzeczywistych i podczerwieni

Tabela III.1 Zestawienie danych charakteryzujących zdjęcia

Charakterystyka procesu wykonania zdjęć	
Platforma pozyskania	samolot
System rejestracji	pasywny
Urządzenie rejestrujące	cyfrowe, kamera UltraCam _D
Rejestrowane zakresy	RGB, IR
Rozdzielczość radiometryczna	12 bitów
Rozdzielczość przestrzenna	10 cm
Pokrycie podłużne	70%
Pokrycie poprzeczne	60%
Format zapisu	tiff
Data pozyskania	maj 2006 r.

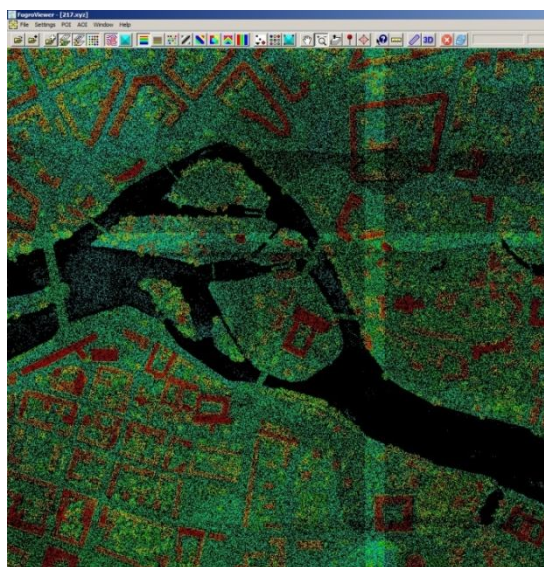
Dane pochodzące z lotniczego skaningu laserowego

Dane LIDAR-owe (ALS) zostały pozyskane w tej samej misji fotolotniczej, co zdjęcia cyfrowe, czyli w maju 2006 roku. Jest to cenne i istotne przy wykorzystywaniu takiego zestawu danych podczas klasyfikacji roślinności, gdyż mamy pewność, że zarówno pozyskiwanie zdjęć jak i chmury punktów ALS odbywało się w tym samym okresie wegetacyjnym roślin. Sprzęt wykorzystany do tego celu to lotniczy skaner laserowy OPTECH ALTM 2050 umieszczony na pokładzie samolotu Cessna 402B. W czasie lotu

zarejestrowano blisko 1500 milionów punktów z częstotliwością skanowania równą 100 kHz oraz częstotliwością impulsu 50 kHz. Na rys. III.4 pokazano wizualizację zarejestrowanej chmury punktów ALS. Osiągnięta dokładność wysokościowa pomiaru punktów wynosi 10 cm otrzymywana została dla lotu na pułapie 1000 metrów. Opracowanie danych wykonano w układzie współrzędnych PUWG2000, natomiast obliczenia elementów pracy skanera przeprowadzono na podstawie danych z trzech stacji referencyjnych GPS usytuowanych na terenie Wrocławia. Najistotniejsze informacje oraz charakterystykę procesu rejestracji przedstawiono w tabeli III.2.

Tabela III.2. Charakterystyka pozyskanych danych lidarowych

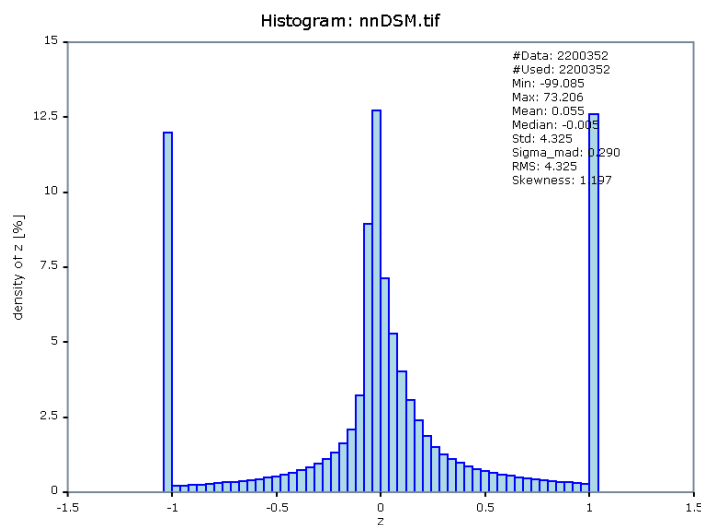
Zestawienie danych dotyczących skaningu laserowego	
Platforma pozyskania	samolot
Skaner	OPTECH A TM 2050
Częstotliwość impulsu	50 kHz
Częstotliwość skanowania	100 kHz
Dokładność wysokościowa	11 cm
Dokładność sytuacyjna	15 cm
Pokrycie poprzeczne	30%
Układ współrzędnych	PUWG 2000
Wysokość lotu	1000 m
Data pozyskania danych	maj 2006 r.



Rys. III.4 Wizualizacja pozyskanych punktów ALS na terenie Wrocławia
Źródło: Opracowanie własne w programie FUGRO Viewer

3.2. UZYSKANE REZULTATY I WNIOSKI

Wykorzystując pakiet programów OPALS wygenerowano z danych źródłowych ALS wtórny nNMPT w postaci regularnej siatki GRID o rozmiarze oczka 1m. Rozmiar ten został dobrany empirycznie w ten sposób aby wynik generalizacji NMPT nie wpłynął na poprawność prowadzonej następnie klasyfikacji terenów zielonych. Jednocześnie korzystając z tego samego pakietu programowego określono średnią gęstość rejestracji danych lidarowych oraz ich dokładność pomiaru wysokościowego. Dla wykorzystywanych danych pomiarowych uzyskano średnią gęstość równą 5.3 punktów/m². Natomiast średnia dokładność pomiaru wysokościowego wyniosła $m_z = \pm 11$ cm (oszacowana na podstawie pomiarów znajdujących się w obszarze pokrycia szeregow ALS). Z pierwotnie wygenerowanej chmury punktów PAKO metodą automatycznego dopasowania lotniczych zdjęć cyfrowych w programie MATCH-T wygenerowano również wtórny produkt w postaci regularnej siatki GRID zdefiniowanej identycznie jak w przypadku pomiarów ALS. Dla utworzonego produktu program podaje również syntetyczne charakterystyki ilustrującym jego jakość. Dla wykorzystywanych zdjęć cyfrowych średnia gęstość punktów z dopasowania obrazów wyniosła 97 punktów/m² z wewnętrzną wysokościową dokładnością $m_z = \pm 14$ cm. Mając identyczny nNMPT na ten sam obszar wytworzony dwukrotnie z różnych danych źródłowych dokonano ich porównania poprzez bezpośrednie odjęcie od siebie wyznaczonych wysokości w każdym oczku siatki GRID.

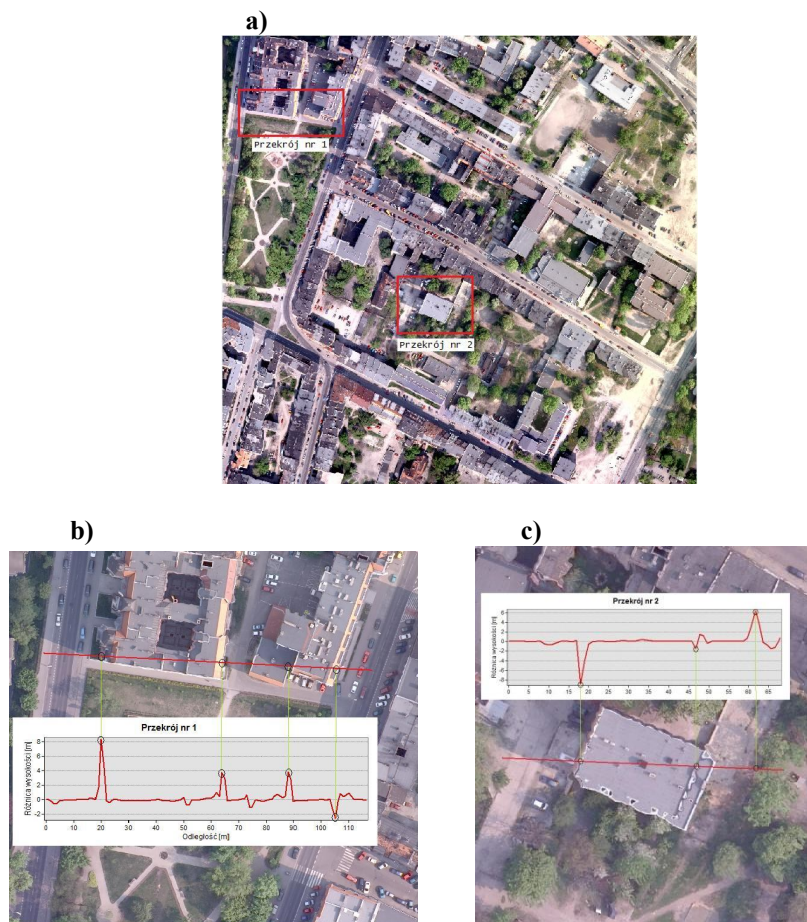


Rys.III.5 Statystyka rozbieżności $nnDSM = nDSM_{ALS} - nDSM_{MACH}$

Obliczone różnice posłużyły do sporządzenia histogramu, który jest prezentowany na rys. III.5. Jednocześnie wyznaczono średnią rozbieżność różnic wysokości, która wyniosła $m_{\Delta z} = \pm 5.5$ cm. Widzimy, że porównywane NMPT charakteryzują się bardzo dobrą zgodnością, wyższą niż oszacowana dokładność wyznaczenia wysokości z poszczególnych porównywanych metod. Jednocześnie jednak histogram sygnalizuje nam, że w anlizowanych zbiorach pojawiają znaczne rozbieżności rzędu kilkunastu metrów

zaburzające rozkład normalny analizowanego histogramu. Dla wykrycia przyczyn powstawania tak znacznych rozbieżności na obszarze utworzonego NMPT utworzono dwa przekroje pionowe. Na rys. III.6a pokazano lokalizacje wygenerowanych przekrojów pionowych, które są prezenowane na rys. III.6b i III.6c.

Przekroje pionowe na tych rysunkach zostały zaprezentowane na tle true-ortho w celu dokładnego wyznaczenia lokalizacji występujących maksymalnych rozbieżności pomiędzy porównywanymi nNMPT. Widzimy, że rozbieżności te powstają w miejscach nieciągłościach tworzonych modeli wysokościowych (np.krawędzie budowli lub wysoki drzewostan) i mogą dochodzić do wartości tej nieciągłości. Jest to spowodowane występowaniem w tych obszarach martwych pól (brak pomierzonych punktów w źródłowych danych ALS lub chmurze utworzonej metodą dopasowania zdjęć lotniczych), które są zróżnicowane obszarowo w zależności od zastosowanego sposobu rejestracji.



Rys. III.6 a,b,c Analiza rozbieżności na przekrojach

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszym artykule rezultaty badań stanowią wiarygodną ocenę jakości NMPT tworzonego metodą automatycznego dopasowania cyfrowych zdjęć lotniczych. Wykorzystywane materiały źródłowe w postaci zdjęć o rozdzielczości terenowej GSD=10 cm i zwiększonym pokryciu podłużnym i poprzecznym (p=70% i q=60%) należy uznać za typowe dla terenów zurbanizowanych. Wykorzystanie dla takich parametrów zdjęć oprogramowania realizującego „sekwencyjny matching” wraz z algorytmami eliminującymi szumy wyznacza chmurę punktów pozwalającą na wtórne wygenerowanie gęstego nNMPT. W omawianych badaniach punkt siatki GRID był wyznaczany z 97 skorelowanych punktów, czyli prawie 15 razy więcej niż podczas rejestracji wykorzystywanym skanerem lotniczym. Tak duża nadliczowość pozwala na efektywne filtrowanie obserwacji odstających, co potwierdziła średnia dokładność różnic wysokości wyznaczona dla modelu różnicowego GRID. Dodatkowo zwiększone pokrycia zdjęć do minimum ograniczyła obszary martwych pól w metodzie „matchingu”. W metodzie ALS obszary martwych pól zależą od kąta wybierania skanera. Dla wykorzystywanych danych przekraczały one rozmiar siatki generowanego GRID i stąd powstałe rozbieżności pokazane na profilach pionowych. Dokładność wyznaczenia wysokości metodą automatycznego dopasowania zdjęć ($m_z = \pm 14$ cm) jest porównywalna z dokładnością metody ALS. Dlatego w podsumowaniu należy stwierdzić, że porównywane metody pomiaru danych dla utworzenia NMPT są w pełni porównywalne i konkurencyjne. Wybór konkretnej metody jest więc warunkowany jedynie względami ekonomicznymi. Jeżeli na dany obszar wykonujemy równocześnie produkt w postaci tradycyjnej ortofotografii lub tru-ortho to w pełni do utworzenia tych produktów jak i NMPT i NMT wystarczą cyfrowe zdjęcia lotnicze.

5. LITERATURA

Biegała T., 2008. Badanie gęstości wyznaczanych punktów technologią automatycznej korelacji na podstawie zdjęć cyfrowych. Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska

Kubalska J. L., 2013. Inwentaryzacja zieleni na obszarze zurbanizowanym z wykorzystaniem True-Ortho w podczerwieni opracowanym w pakiecie programów Inpho. Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska

Guelch, C., 2009. Advanced Matching Techniques for High Precision Surface and Terrain Models, Photogrammetric Week'09

Lemaire, C. 2008. Aspects of The DSM Production with High Resolution Images, XXI th ISPRS Congress, Commission III, 3-11 July 2008, Beijing

Nielsen M., 2004. True orthophoto generation, Master thesis, Technical University of Denmark

ACCURACY OF DSM BASED ON DIGITAL AERIAL IMAGE MATCHING

KEY WORDS: DSM, True-ortho, object-oriented classification, 3D city models, Matching, ALS, Digital aerial images

Summary

Digital Surface Models (DSM) are used in GIS databases as a single product more often. They are also necessary to create other products such as 3D city models, true-ortho and object-oriented classification. This article presents results of DSM generation for classification of vegetation in urban areas. Source data allowed producing DSM with using of image matching method and ALS data. The creation of DSM from digital images, obtained by Ultra Cam-D digital Vexcel camera, was carried out in Match-T by INPHO. This program optimizes the configuration of images matching process, which ensures high accuracy and minimize gap areas. The analysis of the accuracy of this process was made by comparison of DSM generated in Match-T with DSM generated from ALS data. Because of further purpose of generated DSM it was decided to create model in GRID structure with cell size of 1 m. With this parameter differential model from both DSMs was also built that allowed determining the relative accuracy of the compared models. The analysis indicates that the generation of DSM with multi-image matching method is competitive for the same surface model creation from ALS data. Thus, when digital images with high overlap are available, the additional registration of ALS data seems to be unnecessary.

Dane autorów:

mgr inż. Joanna Lucyna Kubalska
e-mail: asiakubalska@gmail.com
telefon: (022) 234 76 94

dr inż. Ryszard Preuss
e-mail: ryszard.preuss@wp.pl
telefon: (022) 234 76 94