

**OCENA JAKOŚCI NMPT TWORZONEGO
METODĄ DOPASOWANIA CYFROWYCH ZDJĘĆ LOTNICZYCH***

**EVALUATION OF DSM QUALITY GENERATED
FROM DIGITAL MATCHING OF AERIAL IMAGERY**

Tomasz Biegała, Ryszard Preuss

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: NMT, NMPT, true-ortho, modele 3D miast, dopasowanie obrazów, LIDAR, cyfrowe zdjęcia lotnicze

STRESZCZENIE: Niniejszy artykuł prezentuje rezultaty badań uzyskane w zakresie budowy gęstego numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) na podstawie chmury punktów generowanej przy pomocy programu Match-T DSM firmy INPHO. Do badań wykorzystano zdjęcia cyfrowe sporządzone kamerą Ultra Cam-D o pikselu terenowym 9 cm co pozwala przyjąć, że wyznaczone parametry jakościowe są reprezentatywne dla obszarów miejskich – zurbanizowanych. Określono istotne czynniki, które wpływają na przebieg automatycznego procesu korelacji. Finalnie na obiekcie eksperymentalnym uzyskano NMPT w strukturze GRID o rozmiarach 0.5 m wygenerowanej przeciętnie z ponad 30 punktów źródłowych przypadających na jedno oczko, wyznaczonych w procesie automatycznej korelacji zdjęć. Jakość geometryczną tak utworzonego produktu oceniono poprzez porównanie go z danymi pozyskanymi dla tego samego terenu techniką lotniczego skaningu laserowego (ALS). Utworzone wysokościowe modele różnicowe potwierdzają, że NMPT utworzony techniką automatycznej korelacji cyfrowych zdjęć lotniczych charakteryzuje się dokładnością wysokościową wyższą niż 0.20 m. Dodatkowo stwierdzono, że przy zastosowaniu większego pokrycia podłużnego i poprzecznego zdjęć następuje znaczne ograniczenie martwych pól (gdzie punkty NMPT nie są wyznaczane). Stosowanie stereogramów o zmiennym stosunku bazowym prowadzi do utworzenia NMPT o różnicowanej charakterystyce dokładnościowej. Przeprowadzone badania wskazują, że tworzenie gęstego NMPT drogą dopasowania obrazów zdjęć cyfrowych może być konkurencyjne do uzyskiwanego z lotniczego skaningu laserowego.

1. WPROWADZENIE

Numeryczny model terenu (NMT) oraz numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) to dwa standardowe samodzielne produkty, które znajdują coraz szersze zastosowania.

Są one również coraz częściej stosowane jako dane źródłowe do tworzenia takich produktów nowej generacji jak trójwymiarowe modele miast czy true-ortho. Produkty takie są opracowywane na ogół dla obszarów aglomeracji miejskich i dlatego muszą spełniać określone standardy techniczne np.: być zgodne z modelem CityGML. Tym wymaganiom technicznym mogą sprostać tzw. gęste NMT lub NMPT. Pod tymi pojęciami należy rozumieć dyskretne punkty (w liczbie od kilku do kilkudziesięciu punktów na m²) odzwierciedlające ukształtowanie pionowe terenu z dokładnością kilkunastu centymetrów. Wymienione kryteria od kilkunastu lat z powodzeniem spełnia technika lotniczego skaningu laserowego (ALS).

Dane z lotniczego skaningu laserowego charakteryzują 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.

Praktycznie jedyną wadą techniki ALS jest częsty brak synchronizacji procesu rejestracji tych danych z danymi obrazowymi (zdjęciami lotniczymi) co podnosi łączne koszty pozyskiwania danych źródłowych. Firmy produkujące sprzęt próbują ograniczyć ten mankament poprzez integrowanie skanera lotniczego z cyfrową kamerą lotniczą.

Innym sposobem pozyskiwania gęstego NMT lub NMPT może być jego generowanie techniką dopasowania obrazów (*matching*) stereogramów zdjęć lotniczych. Temu zagadnieniu poświęcono wiele badań w latach 90. poprzedniego wieku, tj. w okresie, gdy technika dopasowania obrazów jako proces w pełni automatyczny została wdrożona do produkcji (Gluech, 2009). W tym czasie jednak do tego procesu wykorzystywano zeskanowane zdjęcia analogowe.

Proces dopasowania obrazów na takich zdjęciach charakteryzował się następującymi wadami:

- punkty korelowane nie pokrywały regularnie obszaru stereogramu,
- gęstość wyznaczanych punktów była niewystarczająca dla gęstego NMT,
- dla standardowego pokrycia zdjęć (60/20) występowały liczne martwe pola,
- zbiory danych wynikowych zawierały dużo szumów (obserwacji odstających).

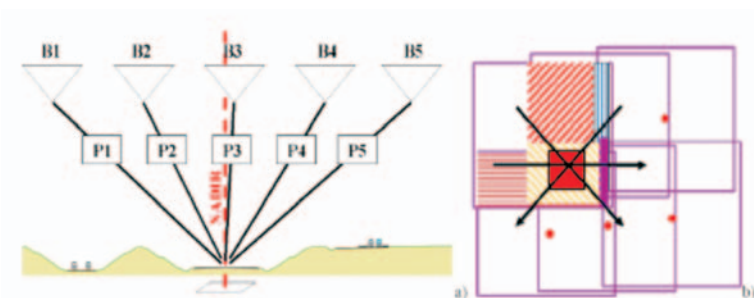
Po 2001 roku do rejestracji danych obrazowych zaczęto stosować cyfrowe kamery lotnicze. Obrazy pozyskiwane tymi kamerami posiadają radiometrię o głębi 11 bitów i charakteryzują się znacznie korzystniejszym współczynnikiem sygnału do szumu w porównaniu z obrazami cyfrowymi pozyskiwanymi drogą skanowania 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, a niekiedy jeszcze większe. Jednocześnie rozwinięto nowe pakiety oprogramowania do cyfrowego dopasowania zdjęć opartego na procedurze „multi-image matching” umożliwiające wykorzystanie zdjęć o zwiększonym pokryciu. W celu eliminacji punktów skorelowanych na roślin-

ności wykorzystuje się w niektórych programach obraz w podczerwieni (CIR), który jest standardowo rejestrowany we współczesnych kamerach cyfrowych. Wymienione zmiany technologiczne wprowadzone do rejestracji danych obrazowych oraz modyfikacje oprogramowania przyczyniły się do jakościowej poprawy produktów uzyskiwanych techniką dopasowania obrazów cyfrowych zdjęć lotniczych (Lemaire, 2008; Gluech, 2009).

W Zakładzie Fotogrametrii, Teledetekcji i SIP Politechniki Warszawskiej rozpoczęto w zeszłym roku prace nad różnymi uwarunkowaniami technicznymi i ekonomicznymi tworzenia true-ortho. Prace te są realizowane w ramach projektu badawczego nt. „Badanie jakości true-ortho w aspekcie wykorzystywanych do jego generowania danych źródłowych”. Do realizacji tych badań pozyskano cyfrowe zdjęcia lotnicze o rozdzielczości terenowej 9 cm oraz zakupiono pakiet oprogramowania firmy INPHO w tym program MATCH-T DSM do automatycznego generowania NMT/NMPT techniką dopasowania obrazów (*matching*). Niniejszy artykuł jest poświęcony prezentacji wyników badań w zakresie automatycznego dopasowania obrazów za pomocą tego oprogramowania.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA GENEROWANIA NMPT TECHNIKĄ DOPASOWANIA OBRAZÓW PROGRAMEM MATCH-T DSM

Zakupiony do realizacji prac eksperymentalnych pakiet programów firmy Inpho, należy do grupy zaawansowanych nowoczesnych narzędzi informatycznych pozwalających na maksymalną automatyzację procesu przetwarzania danych obrazowych na gotowe produkty zasilające bazy danych GIS. Oprogramowanie MATCH-T DSM pozwala na optymalne określenie NMT/NMPT ze zdjęć o zwiększonych pokryciach podłużnych i poprzecznych poprzez wykorzystanie procedury sekwencyjnego dopasowania obrazów (*multi-image matching*). Idea tego algorytmu jest pokazana na Rys. 1. Dopasowanie obrazów na stereogramach prowadzone jest dla ustalonego fragmentu terenu (Rys. 1b), a nie całej powierzchni stereogramu (Lemaire, 2008).



Rys. 1. Idea generowania NMT/NMPT ze zdjęć o zwiększonych pokryciach.

Dla tego obszaru są ustalane optymalne do korelacji zdjęcia realizujące najkorzystniejsze wyznaczenie wysokości. Ta procedura jest powtarzana wzdłuż sześciu kierunków względem bazy fotografowania. W efekcie dany fragment terenu jest rekonstruowany z wielu kombinacji stereogramów, co znacznie zwiększa zgęszczenie wyznaczanych punktów oraz eliminuje martwe pola występujące w przypadku stosowania pojedynczych stereogramów. Według tej zasady finalny produkt generowany jest sekwencyjnie dla całego obszaru opracowania. Proces ten jest w pełni automatyczny i ma charakter przetwarzania wsadowego. Poza procesem dopasowania obrazów program może realizować kolejne etapy obliczeniowe (filtrację i interpolację produktu PAKO punktów po bezpośrednim dopasowaniu) prowadzące do wytworzenia użytkowego NMT/NMPT w postaci struktury GRID. Etap filtracji jest niezbędny ze względu na występujące błędy wynikające z istniejących na zdjęciach szumów. Proces i efekty modułu filtracji dobrze ilustruje Rys. 2. Obiekty nie należące do powierzchni NMPT mogą być automatycznie usunięte poprzez dobór właściwych parametrów wygładzających chmurę skorelowanych punktów. Ostateczny wymiar struktury wynikowej GRID NMT/NMPT jest ustalany autonomicznie przez program i zależy to od liczby skorelowanych punktów. Dla wyznaczonego produktu finalnego podawana jest pełna charakterystyka statystyczna i dokładnościowa (przykład Tab. 1). Jak wynika z przedstawionej charakterystyki oprogramowania program MATCH-T DSM działa według ściśle ustalonej strategii, jednak uzyskiwane rezultaty są uzależnione od doboru szeregu parametrów sterujących takich jak: typ terenu, stopień wygładzania, współczynnik filtracji, gęstość korelacji, zakres progów paralaks i inne.



Rys. 2. Efekty działania modułu filtracji: 2a – model z punktów PAKO; 2b – model po przeprowadzeniu filtracji.

Dlatego też jakość produktu finalnego zależy również od doświadczenia osoby obsługującej charakteryzowany program. Takie doświadczenie jest szczególnie istotne przy opracowaniu terenów zurbanizowanych o wysokiej zabudowie.

Standardowymi produktami tego oprogramowania są:

- PAKO – punkty bezpośrednio z procesu korelacji (plik ASCII),
- NMT – odtwarzający ukształtowanie terenu (plik GRID),
- NMPT – odtwarzający ukształtowanie terenu+ pokrycie terenu (plik GRID),
- zestawienia statystyczne i dokładnościowe procesu obliczeniowego.

Wyznaczane autonomicznie oczko struktury GRID dla NMT/NMPT najczęściej osiąga wymiary rzędu 5 pikseli terenowych (GSD) wykorzystywanych zdjęć cyfrowych, natomiast dokładność określenia wysokości jest rzędu 2 piksele (GSD).

3. OPIS WYKONANYCH PRAC EKSPERYMENTALNYCH

Przeprowadzone badania zostały ukierunkowane na ocenę jakości NMPT możliwego do wyznaczenia drogą dopasowania obrazów zdjęć lotniczych. Wymagało to w pierwszym etapie wyznaczenia optymalnych parametrów sterujących dla programu MATCH-T DSM generującego NMPT w obszarze zurbanizowanym. Właściwą charakterystykę NMPT dla takiego typu terenu określono poprzez obliczenie gęstości i dokładności dopasowania wyznaczanych punktów w funkcji wykorzystywanej konfiguracji zdjęć (Biegała, 2008).

3.1. Charakterystyka wykorzystywanych materiałów

Głównym obszarem testowym, na którym były wykonywane prace eksperymentalne jest obszar Wrocławia. Obszar ten jest pokryty:

- zdjęciami z kamery cyfrowej UltraCam-D, o pikselu 0.09 m, pokryciu podłużnym $p=70\%$, i poprzecznym $q=60\%$,
- danymi wysokościowymi z lotniczego skaningu laserowego Optech ALT-M2050, pozyskanymi z wysokości 1000 m, o pokryciu poprzecznym szeregów 30% i średniej gęstości punktów laserowych 3-4 punkty/m²,
- obrysami budynków z bazy katastralnej.

Dane te były pozyskane w 2006 roku na zamówienie Urzędu Miasta Wrocławia i zostały udostępnione dla realizacji projektu przez firmę Tele Atlas oraz francuską firmę FiC Conseil. Dla potrzeb projektu wytypowano dwa obszary ze Starego Miasta, charakteryzujące się bardzo gęstą zabudową, o złożonych bryłach budynków ze skomplikowanymi kształtami dachów. Na jednym z nich występuje dodatkowo zieleń miejska (Rys. 3). Powyższe dane pozwoliły na kompleksowe, wariantowe przetwarzanie informacji i uzyskanie wiarygodnych odpowiedzi na postawione problemy badawcze.



Rys. 3. Fragmenty ortofotomap przedstawiające obszary testowe – Wrocław, Stare Miasto.

3.2. Określenie optymalnych parametrów sterujących

Dobór parametrów sterujących strategią działania programu MATCH-T ma istotny wpływ na rezultat finalny generowanego NMPT. W celu wyznaczenia optymalnych parametrów sterujących dla terenu zurbanizowanego przeprowadzono szereg wariantowych obliczeń przy różnych wartościach parametrów. Szczegółowa analiza uzyskiwanych wyników, poprzez ich porównywanie z danymi LIDAR, pozwoliła ostatecznie na określenie optymalnych parametrów sterujących. Do dalszych prac ostatecznie wytypowano i stosowano następujące parametry:

- typ terenu: ekstremalny (*extreme*),
- stopień wygładzenia terenu: niski (*low*),
- gęstość generowanych punktów: gęsta (*dense*),
- zakres progów paralaks: 15–20 pikseli,
- liczba iteracji algorytmów do wykrycia błędów dużych i małych: maksymalna,
- filtracja punktów ze względu na stopień wygładzenia terenu (*smoothing rate by curvature/3D points*): 0.15.

3.3. Badanie procesu automatycznego dopasowania

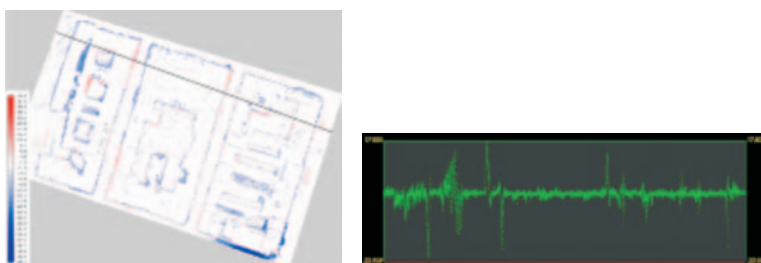
Wykorzystywany do prac badawczych program MATCH-T DSM tworzy bogatą dokumentację analityczną przeprowadzanego procesu dopasowania. W postaci pliku ASCII jest dokumentowana liczba skorelowanych punktów, średni błąd wysokościowy ich wyznaczenia oraz parametry wygenerowanego na ich podstawie NMT lub NMPT poprzez podanie: rozmiaru oczka struktury GRID, dokładności wysokościowej wyznaczonych węzłów GRID oraz ich ogólnej liczby na obszarze objętym obliczeniami. Wartości tych wszystkich parametrów dla obszaru testowego nr 1 są zamieszczone w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie wyników korelacji dla obszaru nr 1.

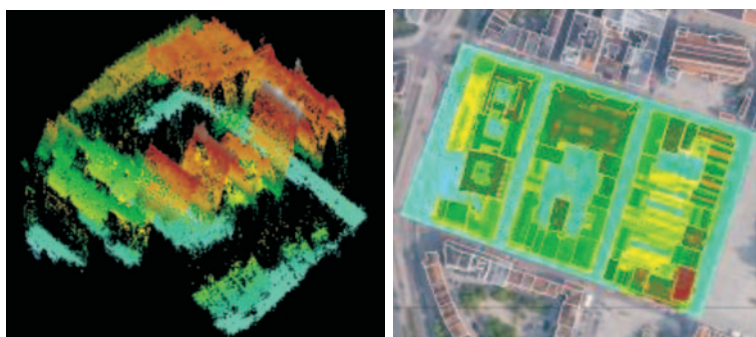
Pokrycie podłużne/poprzeczne zdjęć (%)	70/60	60/40
liczba 3D-punktów po filtracji	8 018 653	4 727 531
liczba generowanych punktów NMPT	201123	201123
liczba oczek GRID w obrębie NMPT	155468	155433
liczba 3D-punktów na oczko GRID	29.3	17.3
wymiar terenowy oczka GRID	0.47 [m]	0.47 [m]
teoretyczna dokładność wysokościowa 3D-punktów	0.36 [m]	0.24 [m]
szacowana dokładność wewnętrzna NMPT	0.14 [m]	0.22 [m]

Szczegółowa analiza statystyki załączonej w tabeli 1 wskazuje, że przeciętnie wynikowy punkt struktury GRID powstaje z interpolacji około 30 punktów wyznaczonych w procesie korelacji cyfrowych zdjęć lotniczych. Dokładność wysokościowa jego wyznaczenia na skutek tak dużej nadliczbowości jest ponad 2.5 razy wyższa niż dokładność

pojedynczego punktu korelowanego. Jakość geometryczna tak wyznaczonego NMPT została zweryfikowana poprzez porównanie tego produktu z danymi wysokościowymi pozyskanymi z lotniczego skaningu laserowego. W tym celu sporządzono modele różnicowe w programie SCOP++. Model taki został wygenerowany przy zastosowaniu struktury GRID o wymiarze oczka 10 cm. Na rysunku 4 przedstawiono lokalizację profilu kontrolnego na obszarze testowym oraz uzyskane wzdłuż tego przekroju odchyłki. Błąd średni określony w tym profilu wyniósł $m_z = \pm 17$ cm (po odrzuceniu błędów grubych powstałych na obrysach dachów). Widzimy, że dokładność NMPT oszacowana w programie MATCH-T DSM jest wiarygodna. Widoczne na profilu błędy grube (rzędu wysokości zabudowy) są wynikiem przyjętego modułu oczka siatki modelu różnicowego oraz występowania obszarów martwych pól zarówno dla danych ze skaningu laserowego jak i NMPT generowanego metodą cyfrowej korelacji zdjęć lotniczych. Ostateczne rezultaty generowania wysokościowego modelu pokrycia terenu zaprezentowano na rysunku 5. Po lewej stronie zwizualizowano chmurę punktów w rzucie aksonometrycznym, a po prawej jako model wysokościowy kodowany paletą barw. Z tych prezentacji możemy wnioskować, że modele takie z powodzeniem mogą być wykorzystywane zarówno do dalszego przetworzenia na model 3D miasta lub stanowić podstawę generowania



Rys. 4. Profil kontrolny; jego lokalizacja i uzyskane odchyłki.



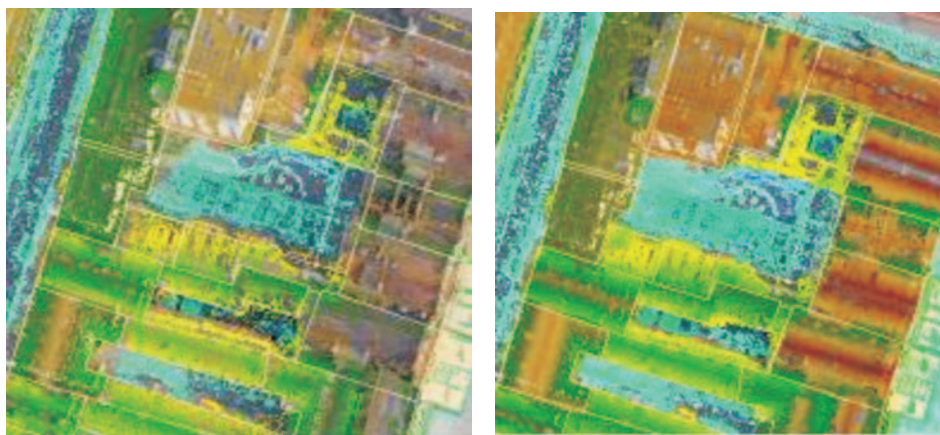
Rys. 5. Rezultat automatycznego dopasowania obrazów przeprowadzony dla obszaru testowego 1.

true-ortho. Właśnie te zastosowania będą dalej weryfikowane w ramach grantu nt. „Badanie jakości true-ortho w aspekcie wykorzystywanych do jego generowania danych źródłowych”.

3.4. Ustalenie wpływu zwiększonego pokrycia zdjęć

Dla określenia wpływu zwiększonego pokrycia podłużnego i poprzecznego zdjęć cyfrowych z dostępnych zdjęć zestawiono dwa komplety zdjęć. Jeden o pokryciu standardowym – w przypadku zdjęć wykonanych kamerą cyfrową Ultra CamD to 60/40 oraz drugi o pokryciu zwiększonym do 70/60. Obliczenia i generowanie NMPT wykonano przy identycznych parametrach sterujących. Rezultaty obliczeń w formie analitycznej zestawiono w tabeli 1 zamieszczonej powyżej.

Rysunek 6 przedstawia ilustrację graficzną uzyskanego NMPT w postaci prezentacji wyznaczonych wysokości z zastosowaniem kodowania kolorami. Analiza tych danych wyraźnie wskazuje, że przy dwukrotnie zwiększonym pokryciu podłużnym zdjęć cyfrowych uzyskuje się również dwukrotne zwiększenie liczby punktów skorelowanych (PAKO). Wysokości tych punktów są teoretycznie mniej dokładnie wyznaczone (mniej korzystny stosunek bazowy), jednak pozwalają one na dokładniejsze wyznaczenie użytkowego NMPT przy tym samym rozmiarze struktury GRID. Dodatkowo rysunek 6 oraz wykonane modele różnicowe pozwalają zauważyć, że przy zwartej zabudowie, na skutek zastosowanego zwiększonego pokrycia zdjęć, następuje znaczące ograniczenie zjawiska martwych pól.



Rys. 6. Rezultaty korelacji zdjęć cyfrowych o różnym pokryciu podłużnym; obraz lewy – pokrycie 40%, obraz prawy – pokrycie 70%.

4. PODSUMOWANIE

Badania empiryczne omówione w niniejszym artykule stanowią aktualną i wiarygodną ocenę jakości NMPT tworzonego metodą dopasowania cyfrowych zdjęć lotniczych. Parametry wykorzystywanych do badań materiałów źródłowych (terenowy wymiar GSD oraz zwiększone pokrycie podłużne i poprzeczne) gwarantują pełną reprezentatywność uzyskanych rezultatów dla terenów zurbanizowanych. Analiza prezentowanych wcześniej wyników pozwala na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

- w przeprowadzonych badaniach uzyskano gęstość skorelowanych punktów przekraczającą gęstość rejestracji ALS,
- dokładność wysokościowa pojedynczych punktów 3D została wyznaczona na poziomie $0.03 \pm 0.04\%$ wysokości lotu,
- otrzymana gęsta chmura punktów w wyniku dopasowania obrazów pozwala wyekstrahować budynki oraz przeprowadzić wektoryzację kształtów dachów,
- istnieje problem z dobrą korelacją punktów dla obszarów małych przestrzeni pomiędzy budynkami (tzw. studnie).

Porównanie dodatkowo zwiększonego i standardowego pokrycia zdjęć wskazuje, że przy zwiększonym pokryciu zdjęć:

- następuje znaczące zmniejszenie występowanie tzw. martwych pól,
- dwukrotnie zwiększa się liczba generowanych punktów,
- zmniejsza się dokładność wysokościowa generowania pojedynczych punktów 3D przy jednoczesnym wzroście dokładności punktów struktury GRID,
- znacząco maleje liczba błędów odstających od wynikowego modelu NMPT.

5. LITERATURA

- Biegała T., 2008. *Badanie gęstości wyznaczanych punktów technologią automatycznej korelacji na podstawie zdjęć cyfrowych*. Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska.
- Gołębiowski K., 2008. *Ekstrakcja budynków z danych LIDAR dla terenów miejskich*. Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska.
- Gluech, 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*. XXIth ISPRS Congress, Commission III, 3-11 July 2008, Beijing.

**EVALUATION OF DSM QUALITY GENERATED
FROM DIGITAL MATCHING OF AERIAL IMAGERY**

KEY WORDS: DTM, DSM, True – ortho, 3D city models, Matching, LIDAR, Digital aerial images

SUMMARY: This paper presents the evaluation of very dense DSM received from point clouds generated with Match-T DSM software. The digital photographs were taken with an Ultra Cam-D camera. The received GSD of 10 cm can be representative for very dense urban areas. The main factors which had an influence on the matching process were determined. The final DSM with 0.5 metre grid points was generated from a very dense cloud of points (30 points for each grid point on average). To evaluate the quality of this product, the DSM from imagery matching was compared with DSM generated from LIDAR data. The differential elevation models have confirmed that the DSM from imagery matching has accuracy better than 0.20 m. In addition, it was observed that by using larger overlap between photographs in and between strips, the obscured areas are considerably limited. However, it was also found, that by using stereo-pairs with various base to flying height ratios, DSMs with different accuracy can be obtained. In conclusion, the research has confirmed that the dense DSM from imagery matching is competitive with that from LIDAR data.

mgr inż. Tomasz Biegała
tomasz.biegala@gmail.com
telefon: +48 22 2347694

dr inż. Ryszard Preuss
ryszard.preuss@wp.pl
telefon: +48 22 2347694

* wersja kolorowa artykułu jest dostępna na stronie <http://www.sgp.geodezja.org.pl/ptfit>