

**PORÓWNANIE FOTOGRAMETRII I LOTNICZEGO SKANINGU
LASEROWEGO JAKO ŹRÓDEŁ DANYCH DO OPRACOWANIA NMT
DLA CELÓW PROJEKTOWYCH**

**COMPARISON OF PHOTOGRAMMETRY AND AIRBORNE LASER
SCANNING AS A SOURCES OF DTM GENERATION USED IN
CONSTRUCTION DESIGN**

Krystian Pyka¹, Agnieszka Rzepka², Małgorzata Słota¹

¹ AGH w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra
Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska

² MGGP Aero Sp. z o.o.

SŁOWA KLUCZOWE: NMT, ALS, fotogrametria, mapa projektowa

STRESZCZENIE: W pracy poszukiwano odpowiedzi na pytanie, czy fotogrametria i lotniczy skaningu laserowy mogą być stosowane do opracowania NMT dla celów projektowania budowlanego. Takim modelom przepisy techniczne stawiają wysokie wymagania dokładnościowe wraz z zasadą reprezentatywnego, ale ograniczonego do niezbędnego minimum, pikietowania terenu. Przeprowadzono badania dla terenu wzdłuż szlaku kolejowego, z typowym przebiegiem torowiska w nasypach lub przekopach, ze skarpami gęsto porośniętymi roślinnością, z otoczeniem rolnym lub zadrzewionym. Zarówno dane fotogrametryczne jak i dane z ALS charakteryzowały się bardzo dobrymi parametrami. Pomiar fotogrametryczny 3D przeprowadzono w sposób automatyczny, następnie wykonano niezbędną korektę i uzupełnienie pikiet na drodze stereoobserwacji. Dane ALS zostały przefiltrowane metodą opartą na algorytmie aktywnego modelu TIN, przez co uzyskano podzbiór chmury punktów reprezentujący powierzchnię topograficzną terenu. Badania potwierdziły wyższą jakość modelu z ALS w stosunku do NMT z pomiaru fotogrametrycznego. Wyższość dotyczy zarówno dokładności jak i możliwości pomiaru w obszarach pokrytych roślinnością. W podsumowaniu badań stwierdzono, że ani fotogrametria ani ALS nie nadają się obecnie do produkcyjnego zastosowania w opracowaniu map do projektowania budowlanego. O ile sam pomiar ALS jest odpowiednio dokładny i wydajny, to brakuje metod automatycznej detekcji linii strukturalnych, potrzebnych do wiernego przedstawienia terenu.

1. WPROWADZENIE

Fotogrametria lotnicza i skaningu laserowy są podstawowymi technikami pozyskiwania danych do opracowania NMT przeznaczonych do celów analitycznych, eksploatowanych w technologii GIS. W pracy poszukiwano odpowiedzi na pytanie, czy te techniki mogą być stosowane do opracowania NMT jako elementu tzw. mapy do celów projektowych. Wobec takiego NMT stosuje się bardzo wysokie wymagania dokładnościowe, dlatego opracowywany jest z reguły na podstawie bezpośredniego pomiaru geodezyjnego.

Standard de facto NMT do projektowania to postać trójkątowa oparta na wybranych w terenie najbardziej charakterystycznych elementach rzeźby terenu i pomierzonych z wysoką dokładnością. Tymczasem skaniny potrafią mierzyć z bardzo dużą gęstością terenową i wysoką dokładnością, ale traktuje cały obszar jednakowo, nie wyróżniając miejsc gdzie występują ekstrema wysokościowe czyli linie nieciągłości. Z drugiej strony w porównaniu z modelem fotogrametrycznym posiada właściwość dobrej penetracji roślinności, co przy opracowaniu map w terenach niezamieszkałych, a często wyłączonych z gospodarowania, jest bardzo cenną cechą. W ostatnich latach w Polsce przy dużych inwestycjach o charakterze liniowym korzystano kilkakrotnie z fotogrametrii lotniczej i skaningu laserowego jako technik wspomagających opracowanie mapy projektowej. Wyniki tych prac są różnie oceniane, nie doczekały się obiektywnej oceny. W artykule podjęto próbę analizy przydatności tych technik z koncentracją na aspekcie dokładnościowym i możliwości pomiaru w terenach pokrytych roślinnością.

2. NMT DLA CELÓW PROJEKTOWYCH

W praktyce geodezyjnej mapa dla celów projektowych należy do bardzo popularnego asortymentu prac. Taka mapa jest wymagana prawie dla każdej inwestycji budowlanej, zarówno takiej która zajmuje niewielki obszar jak i dla przedsięwzięć o znacznej rozciągłości przestrzennej. O ile treść mapy projektowej jest zarysowana przepisami (Rozporządzenie, 2011) to forma jej przekazania projektantowi, poza wersją papierową z niezbędną pieczętką, nie jest uregulowana i kształtuje się na drodze negocjacji pomiędzy geodetą a projektantem. W tych negocjacjach projektanci mają zdecydowanie ważniejszy głos, jako że są nie tylko odbiorcami produktu ale także - bezpośrednimi lub pośrednimi - płatnikami.

Zgodnie z przepisami jednym z elementów mapy projektowej jest rzeźba terenu, przedstawiana za pomocą warstwic i pikiet, przy czym ta tradycyjna wizualizacja kartograficzna dotyczy w praktyce tylko wersji papierowej. Projektanci dużych inwestycji wymagają, aby rzeźba była przekazana nie tylko jako elektroniczna, wektorowa wersja mapy papierowej lecz żądają także aby opis rzeźby miał formę NMT.

Oczekiwania projektantów co do jakości i postaci NMT są następujące (Zieliński, 2004):

- model powinien opisywać rzeźbę za pomocą pikiet i linii strukturalnych,
- średnia gęstość danych nie powinna przekraczać 2-4 pkt /ar (wyższa może być tylko w terenach górskich),
- dokładność danych - na „poziomie centymetrowym”,
- postać NMT – trójkątowa,
- format danych - kompatybilny ze stosowanymi przez programy CAD do zadań 3D.

Powyższe wymagania można wyrazić w skrócie następująco: NMT powinien być zbudowany na podstawie jak najmniejszej liczby reprezentatywnych i dokładnych pikiet. Sugerowana przez projektantów gęstość pikiet przekłada się na ich średnią odległość w przedziale 5 -10 m. Ponieważ pikietami z których utworzony zostanie NMT muszą być obligatoryjnie naziemne elementy podziemnego uzbrojenia terenu oraz punkty przekrojów

ulic i dróg, zatem zalecenie co do gęstości pikiet należy odnieść do obszarów mało zurbanizowanych.

Warto także ustosunkować się do oczekiwania projektantów w zakresie dokładności danych. Gdy mówią o dokładności 1 cm (załóżmy, że to błąd średni) to znając realia pomiarowe należy rozumieć, że chodzi o „twarde pikiety” (studzienki, kratki, krawężniki), a dokładność ma charakter względny (rozdzielczość pomiaru). Przepisy geodezyjne zakładają dokładność, wyrażoną błędem średnim względem osnowy, o wielkości 5 cm dla obiektów budowlanych i pikiet markowanych w terenie a 10 cm - dla pozostałych pikiet (Rozporządzenie, 2011).

Trzeba się w pełni zgodzić z projektantami w kwestii postaci modelu. Tylko model trójkątowy zachowuje dokładność danych pomiarowych i respektuje topologię zdeterminowaną przez linie szkieletowe. Postać siatki kwadratowej, poza szczególnymi wyjątkami (np. pomiar płyty lotniska), nie nadaje się do projektowania budowlanego a jedynie do zadań analityczno-koncepcyjnych.

Jak wynika z powyższej charakterystyki NMT dla celów projektowych, model wysokościowy opracowany przy okazji krajowych projektów fotogrametrycznych (LPIS, TBD) nie spełnia oczekiwań projektantów. Nie wyklucza to fotogrametrii jako źródła danych do takiego NMT, przy czym muszą być spełnione określone warunki techniczne pomiaru fotogrametrycznego. Podobnie jest z techniką skanowania laserowego. Problem ten jest przedmiotem analiz przedstawionych w dalszej części artykułu.

3. MATERIAŁ I STRATEGIA BADAWCZA

Jako obszar testowy dla sprawdzenia przydatności pomiaru fotogrametrycznego i laserowego do opracowania NMT dla celów projektowych wybrano teren rozciągnięty wzdłuż szlaku kolejowego Kraków -Tarnów w okolicy Bochni, z typowym przebiegiem torowiska w nasypach lub przekopach, ze skarpami porośniętymi roślinnością. Wybrano odcinek pokryty danymi z dwóch projektów: fotogrametrycznego wykonanego przez firmę TMC z Krakowa oraz skaningowego wykonanego wspólnie przez MGGP Aero z Tarnowa i AGH Kraków. Projekt fotogrametryczny był elementem opracowania mapy sytuacyjno-wysokościowej dla celów modernizacji linii kolejowej. Projekt skaningowy był wykonany dla potrzeb analizy przydatności ALS do pomiarów wysokościowych na terenach kolejowych (Pyka et al, 2012).

Zdjęcia lotnicze były wykonane w połowie października 2007 roku, kamerą cyfrową Vexcel, z wysokości ok. 680 m nad terenem, co dało średnią rozdzielczość terenową 5 cm. Dokładność sytuacyjna opracowania fotogrametrycznego nie przekracza wielkości 1 piksela, zatem przy stosunku wysokości lotu do bazy wynoszącym 3,7 dla użytej kamery, błąd średni wysokościowy kształtuje się na poziomie ok. 18 cm.

Skaning był wykonany w lipcu 2010 roku skanerem typu *full-waveform* z wysokości 500 m, z gęstością odpowiednio 11 pkt/m²; wyrównanie trajektorii wsparte płaszczyznami referencyjnymi dało średni wektor błędu 3D o wielkości 4.5 cm. Tak dobrą dokładność uzyskano kosztem dodatkowych nalotów poprzecznych, poprawiających geometrię

trajektorii oraz dzięki dużej liczbie terenowych elementów referencyjnych (Pyka *et al.*, 2012).

Obydwa krótko scharakteryzowane projekty posiadają bardzo dobre wskaźniki jakościowe, praktycznie na najwyższym osiągalnym obecnie produkcyjnie poziomie. Dlatego uznano, że jest to dobry materiał do analizy porównawczej tych technik w kontekście opracowania NMT.

Uznano a priori, że problem tworzenia NMT będzie rozpatrywany z pominięciem szczegółów sytuacyjnych mapy zasadniczej (tzw. „twardych pikiet”). Co prawda część takich pikiet może być pomierzona fotogrametrycznie, ale jest to praca którą nie da się zautomatyzować a ponadto dokładność pomiaru mogłaby być zbyt niska. Zatem nie można uniknąć uzupełnienia danych do NMT z dotykowego pomiaru geodezyjnego. Z kolei taki pomiar geodezyjny jest trudny a czasami niemożliwy w terenach pokrytych roślinnością a przy tym traci efektywność wraz ze wzrostem obszaru opracowania. Stąd zdecydowano, że przedmiotem badań będą pomiary wysokościowe w obszarach odkrytych, zarówno uprawianych rolniczo jak i o charakterze nieużytków pokrytych roślinnością krzaczastą, czyli takich na których najczęściej są planowane inwestycje liniowe. Teren położony wzdłuż linii kolejowej uznano za wystarczające przybliżenie warunków jakie występują w pozamiejskich terenach przeznaczonych pod duże, zwłaszcza liniowe inwestycje budowlane.

4. OPRACOWANIE NMT Z DANYCH FOTOGRAMETRYCZNYCH I LASEROWYCH

Wysokościowy pomiar fotogrametryczny do NMT wykonano w kilku etapach. Wpierw wygenerowano siatki kwadratowe, o rozmiarze 1x1 m. Zadanie to wykonano metodą *matchingu* typu ABM, na stacji cyfrowej SocetSet. Tak uzyskane modele robocze połączono w jeden zbiór dla każdego z dwóch obszarów testowych, każdy o powierzchni kilkunastu hektarów. Zastosowano trzy strategie w stosunku do pikiet zawieszonych nad terenem (roślinność krzaczasta, drzewa, pojedyncze zabudowania) lub leżących poniżej terenu (błędy *matchingu*):

- pozostawienie wszystkich pikiet bez korekty,
- manualne usunięcie pikiet odstających na drodze stereoobserwacji,
- usunięcie pikiet odstających na drodze filtracji automatycznej.

Filtrację automatyczną wykonano z wykorzystaniem algorytmu opartego na metodzie aktywnego modelu TIN, stosowanego powszechnie do klasyfikacji chmury punktów (Axelsson, 1999, 2000). Kolejnym krokiem był pomiar linii szkieletowych, głównie były to krawędzie nasypu kolejowego. Pomiar ten wzbogacił zbiór danych skorygowanych manualnie. Zestawienie tak uzyskanych rodzajów NMT jest zawarte w tabeli 1.

Z punktu widzenia programu SocetSet zbiór regularnie rozłożonych punktów może być traktowany jako model trójkątowy TIN (jest to interpretacja siatki kwadratowej jako siatki złożonej z trójkątów równoramiennych). Wybrano tą opcję, gdyż pozwala ona na dogodniejszą edycję danych (korzystano m.in. z możliwości ustawienia bufora wokół linii szkieletowej w celu automatycznego usunięcia położonych tam punktów).

Na rysunku 1 przedstawiono mały fragment jednego z obszarów testowych, widoczna jest siatka fotogrametryczna po edycji i linie strukturalne.



Rys. 1. Fragment obszaru testowego z widocznymi punktami pomiaru fotogrametrycznego (siatkę rozrzedzono dla zwiększenia czytelności)

Głównym celem przetwarzania danych ALS było wydobycie z chmury punktów tych, które reprezentują powierzchnię topograficzną terenu. Działanie to przeprowadzono w programie TerraScan, wykonując następujące czynności (TerraScan, 2012):

- odfiltrowanie punktów błędnych leżących poniżej terenu, tj. pojedynczych punktów leżących znacząco niżej niż najbliższe ich otoczenie,
- wydobycie punktów reprezentujących teren przy zastosowaniu algorytmu aktywnego modelu TIN,
- klasyfikacja według przewyższenia nad terenem pozostałych punktów, wydzielając klasy do 1 m, od 1 m do 3 m i ponad 3 m nad terenem (tylko dla celów sprawdzenia poprawności całego procesu).

Dodatkowo dane ALS zostały poddane bardziej złożonemu procesowi przetwarzania dla określenia gęstości pikiet terenowych, co zostało opisane w rozdziale 5.

5. ANALIZA DOKŁADNOŚCI NMT

Przyjęto założenie, że analiza zostanie wykonana poprzez porównanie modeli fotogrametrycznych z modelem powstałym ze skaningu laserowego. Wykorzystane dane ALS były poddane analizie dokładności w stosunku do niwelacyjnej precyzyjnej w ramach badań opisywanych w (Pyka *et al.*, 2012). Analiza ta była wykonana na trzech odcinkach torów o długości ok. 1 km każdy, wykazała błędy średnie kwadratowe o wielkościach od 2 cm do 8.6 cm. Natomiast wielkość błędu dla wszystkich kontrolowanych punktów z trzech odcinków wyniosła 6.9 cm. Wobec tak dobrych wartości uznano, że model z ALS posłuży w niniejszej analizie jako referencyjny, co oczywiście jest pewnym uproszczeniem.

W celu porównania opracowanych modeli zaimportowano dane ALS (po wykonaniu opisanej w poprzednim punkcie filtracji) do programu SocetSet, który dane punktowe przetworzył do postaci siatki trójkątów. Dzięki temu powstała możliwość interpolacji wysokości w dowolnym miejscu obszaru wyznaczonego przez otoczkę wypukłą zbioru danych. Różnice wysokości między modelami określano z wzoru (1):

$$\Delta h = h_{\text{FOTO}} - h_{\text{ALS}} \quad (1)$$

gdzie:

h_{FOTO} – wysokość pikiet pomierzonych fotogrametrycznie

h_{ALS} – wysokość wyinterpolowana z NMT uzyskanego z danych ALS.

Następnie wykorzystując funkcję *Quality Statistics* obliczono statystykę różnic wysokości między modelami. Model z ALS został potraktowany jako referencyjny, co wynika z przeprowadzonej a priori analizy dokładności, która wykazała około 3-krotnie lepszą dokładność ALS. Liczba badanych różnic wysokości była równa liczbie punktów z których utworzone były poszczególne modele fotogrametryczne i wahała się w przedziale od ok. 80000 do ok. 150000. W tabeli 1 zestawiono błędy średnie kwadratowe, odchylenie standardowe (liczone po usunięciu czynnika systematycznego) i średnie różnice pomiędzy wysokościami z modeli fotogrametrycznych w odniesieniu do modelu ALS. Podano wyniki dla jednego z badanych obszarów testowych, gdyż statystyki dokładnościowe dla obu obszarów są bardzo zbliżone i prowadzą do identycznych wniosków.

Tabela 1. Porównanie dokładności modeli fotogrametrycznych w stosunku do ALS

L.p.	Typ NMT	Filtracja pikiet terenowych	Błąd średni [m]	Odch. std. [m]	Różnica średnia [m]
1	siatka 1x1 m	brak	1.11	0.88	0.68
2	pochodny do siatki 1 x 1 m	automatyczna	0.41	0.38	0.11
3	pochodny do siatki 1 x 1 m	manualna	0.16	0.15	0.03
4	j.w. + linie	manualna	0.16	0.16	-0.01

Należy nadmienić, że powyższa statystyka powstała po odrzuceniu średnio ok. 2% różnic, które uznano za błędy grube. Aplikacja *Quality Statistics* wykonuje analizę w sposób iteracyjny, stopniowo odrzucając punkty o odchyłkach przekraczających trzy

wielokrotności odchylenia standardowego. Uznano, że w sytuacji kiedy rejestracja fotogrametryczna i skanerowa były wykonane w odstępie 3 lat, a w terenie wokół linii kolejowej prowadzone były bieżące prace budowlane i rolnicze, znaczna część dużych różnic wynika ze zmian zagospodarowania terenu. Teza ta znalazła potwierdzenie w sondażowych analizach porównawczych zagospodarowania – w ciągu tych trzech lat pojawiły się np. przydomowe składy materiałów budowlanych, czy składowiska odpadów, które na modelu z ALS były zakwalifikowane jako teren.

Zgodnie z przewidywaniami największe błędy uzyskano dla modeli fotogrametrycznych utworzonych na drodze *matchingu* jako siatka 1 x 1 m i nie poddanych żadnej filtracji (poz. 1 w tabeli 1). Duża wartość błędu średniego (ponad 1 m) i średniej różnicy (0.68 m) jest skutkiem osadzenia wielu pikiet nad terenem.

Znacznie lepszy wyniki osiągnięto dla modeli powstałych poprzez automatyczną filtrację punktów siatki 1 x 1 m. (poz. 2 w tabeli 1). Błąd średni zmniejszył się ponad dwukrotnie a błąd systematyczny kilkukrotnie. Algorytm nie odfiltrował wszystkich punktów które *matching* fotogrametryczny posadził na gęstych krzewach. To błędne zakwalifikowanie części pikiet fotogrametrycznych miało stosunkowo mały wpływ na zmniejszenie się odchylenia standardowego w stosunku do błędu średniego. Tą sytuację należy tłumaczyć faktem, że po filtracji automatycznej zostały w zbiorze punkty błędne, zawieszony nad lub pod terenem. Jest to o tyle zrozumiałe, że filtracja metodą aktywnego modelu TIN zakłada, że wszystkie najniższe punkty zbioru reprezentują teren (poza błędami grubymi).

Najlepsze dokładności uzyskano dla modeli edytowanych manualnie. Osiągnięty błąd średni 16 cm (poz. 3 i 4 w tabeli 1), potwierdza założenia dokładnościowe a priori. Jeśli przyjąć błąd średni 7 cm dla ALS, to z prawa przenoszenia się błędów dostaniemy 15 cm dla fotogrametrii (zakładano 18 cm). Między modelami nie występuje istotny błąd systematyczny, przy czym widoczny jest pozytywny wpływ linii strukturalnych, które praktycznie zmniejszyły średnią różnicę do zera.

Przeprowadzone badanie i analiza porównawcza potwierdziły wstępne założenia dokładnościowe odnośnie fotogrametrii i skaningu. Uwypukliły jednocześnie fakt, że pomiar fotogrametryczny w terenie zakrzewionym może ukazać się zbyt rzadki do prawidłowego modelowania terenu.

6. WPLYW SKANOWANIA METODĄ FALI CIĄGŁEJ NA GĘSTOŚĆ DANYCH

Postanowiono zbadać jak zmniejsza się gęstość pikiet na obszarach krzaczastych i zadrzewionych w stosunku do obszarów otwartych. Badanie to wykonano na fragmencie obszaru testowego o powierzchni ok. 1.7 ha, zilustrowanym na rysunku 2. Na drodze klasyfikacji danych ALS (Tóvári, Vögtle, 2004), wydzielono teren oraz cztery klasy o różnej wysokości roślinności, wyszczególnione w tabeli 2.



Rys. 2. Obszar wybrany do zbadania gęstości pikiet terenowych

W celu generalizacji wyniku klasyfikacji oraz wydzielenia odrębnych obszarów dla poszczególnych klas wykonano: (a) konwersję chmury punktów do postaci rastrowej (rozmiar piksela 30cm), (b) filtrację filtrem medianowym 3x3, (c) automatyczną wektoryzację rastra. Ostatecznie uzyskano podział obszaru na 5 klas o zdefiniowanych wektorowo granicach, co ułatwiło analizę odbić impulsów laserowych.

Skaner wysyłał średnio 11 impulsów na 1 m² przy średniej wielkości plamki w terenie 25 cm. Odbicie każdego impulsu było rejestrowane w sposób ciągły a nie dyskretny, co w przypadku trafienia plamki na powierzchnię drzewa czy krzewu dawało odbicie rozciągnięte w czasie. Analiza profilu fali odbitej daje możliwość wykrycia ekstremów odpowiadających kolejnym odbiciom. Detekcja ekstremów została wykonana przy pomocy oprogramowania firmy Riegl, producenta skanera.

Dla wydzielonych 5 typów pokrycia terenu zliczano odbicia we wszystkich obszarach reprezentujących poszczególne typy a następnie obliczono średnie gęstości na 1 m². Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie gęstości odbić w zależności od pokrycia terenu

lp	Typ pokrycia terenu	Wszystkie odbicia pkt/m ²	Odbicia od terenu pkt/m ²
1	teren otwarty	11.0	10.2
2	roślinność, $h < 0.5\text{m}$	12.3	5.8
3	roślinność, $0.5 < h < 2.5\text{m}$	14.6	1.9
4	roślinność, $2.5 < h < 8.0\text{m}$	17.2	0.9
5	roślinność, $h > 8.0\text{m}$	18.2	0.6

Jak pokazuje tablica 2, wraz ze wzrostem wysokości roślinności następuje zwiłokrotnienie odbić a przez to wynikowa gęstość odbicia jest większa od gęstości

emitowanej przez skaner (11 pkt/m²). W przypadku wysokich drzew pojedynczy impuls odbijał się maksymalnie do pięciu razy, przeważały dwu i trzykrotne odbicia, co w sumie dało średnio 6 odbić więcej niż było impulsów skierowanych na drzewa (pozycja 5 w tabeli 2). Im niższa roślinność tym liczba wielokrotnych odbić malała, w przypadku niskich krzaków liczba ta sporadycznie przekraczała dwa, przy przewadze odbić pojedynczych – dlatego przyrost odbić jest mniejszy, średnio uzyskano 1 dodatkowe odbicie (pozycja 2 w tabeli 2). Zwraca uwagę duża przenikliwość impulsów przez krzaki, gdzie uzyskano średnio 5.8 pikiet terenowych (pozycja 3 w tabeli 2). Tymczasem dla fotogrametrii teren był w tych miejscach praktycznie niewidoczny (pomimo piksela o wielkości 5 cm). Natomiast w obszarach pod wysokimi drzewami liściastymi, pomimo zauważonego wcześniej przyrostu wszystkich odbić, odbicia od terenu zmniejszyły się do ok. 0.5 pkt na 1 m² (pozycja 5 w tabeli 2). Oznacza to średnią odległość pikiet w na poziomie kilku metrów, czyli bardzo dużo w porównaniu do geodezyjnych pomiarów bezpośrednich. Zatem zastosowany typ skanera próbkuje wysokości terenowe z wystarczającą gęstością także w obszarach quasi leśnych.

7. PODSUMOWANIE

Badania potwierdziły założenia a priori w zakresie dokładności wysokościowego pomiaru fotogrametrycznego i skanerowego. Metoda fotogrametryczna, nawet przy wysokorozdzielczych zdjęciach, nie zapewnia wymagań dokładnościowych stawianych mapom dla celów projektowych. Niekorzystnie duży stosunek bazowy jaki osiąga się fotogrametrycznymi kamerami cyfrowymi powoduje nawet 4-krotne obniżenie dokładności pomiaru wysokościowego w stosunku do sytuacyjnego (w kamerach analogowych relacja była korzystniejsza, dla szerokokątnych wynosiła ok. 2:1).

Technika ALS jest w stanie zagwarantować wymagane dokładności mapy projektowej w zakresie pomiaru wysokościowego. Warto zwrócić uwagę, że jeszcze kilka lat temu badania wykazywały mniejszą dokładność pomiaru wysokości tą techniką (Hejmanowska, Warchoń, 2010). Świadczy to o tym, że technika ALS ulega szybkiemu doskonaleniu. Skaner rejestrujący w trybie fali ciągłej zapewnia gęste próbkowanie terenu zakrzaczonego, gęstość spada w terenach zadrzewionych, ale w dalszym ciągu jest wysoka jeśli porównać ją ze strategią pikietowania w geodezyjnych pomiarów bezpośrednich.

Technika ALS ma jednak poważną wadę z punktu widzenia opracowania NMT dla celów projektowych - model nie zawiera linii strukturalnych. Brak linii nie jest w żaden sposób rekompensowany przez dużą gęstość danych, gdyż NMT o gęstości kilku punktów na m² jest uznawany przez projektantów za nadmiernie redundancyjny i nie akceptują go ze względów operacyjnych. Linie strukturalne mogą być uzupełnione na drodze manualnej edycji, ale wówczas dane muszą być odpowiednio gęste. Zmniejszenie gęstości skanowania do poziomu 0.5 punktu na m², co dałoby oczekiwaną przez projektantów gęstość NMT, o której mowa w rozdziale 2, uniemożliwi wprowadzenie do NMT linii strukturalnych. Zatem pozostaje gęste skanowanie, edycja linii a następnie rozrzedzenie siatki NMT algorytmami wygładzającymi dane. Aby wyniki były poprawne, dane muszą zawierać bardzo dobrze zdefiniowane linie strukturalne, co przy obecnym stanie rozwoju przetwarzania danych ALS, wymaga pracochłonnej edycji manualnej. Należy dodać, że jest ona znacznie bardziej złożona niż w przypadku pomiaru fotogrametrycznego.

Reasumując należy stwierdzić, że żadna z badanych metod nie nadaje się obecnie do produkcyjnego zastosowania w opracowaniach podkładów projektowych. Fotogrametria nie zapewnia odpowiednio wysokich dokładności a ponadto wymaga wspomagania inną techniką w terenach pokrytych roślinnością. Skaniny spełnia wymogi dokładnościowe, dobrze radzi sobie z pikietowaniem terenów zakrzaczonych i raczej wystarczająco dobrze w terenach leśnych. Aby technika mogła być rekomendowana do rozważanych celów konieczne są algorytmy automatycznej detekcji linii strukturalnych. Widząc dynamiczny rozwój w zakresie metod przetwarzania skaningu należy przypuszczać, że oczekiwane rozwiązania pojawiają się w niedługim czasie.

8. LITERATURA

Axelsson P., 1999. Processing of laser scanner data-algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54 (2-3), pp. 138-147.

Axelsson P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII-1/B4, pp. 408-413.

Hejmanowska B., Warchoń A., 2010. Analiza porównawcza wysokości terenu uzyskanej za pomocą lotniczego skaningu laserowego, pomiaru GPS oraz pomiaru na modelu stereoskopowym z kamery ADS 40, *Acta Sci. Pol., Geodesia et Descriptio Terrarum* 9(3) 2010, 13-24.

Pyka K., Borowiec N., Poręba M., Słota M., Kundzierewicz T., 2012. *Airborne laser scanning data for railway line survey*. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, Nr 03/2012, s. 260-263.

Rozporządzenie, 2011. Rozporządzenie ministra spraw wewnętrznych i administracji z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego.

4.1.1. TerraScan, 2012. TerraScan User's Guide. <http://www.terrasolid.com>

Tóvári, D., Vögtle, T. 2004. Classification methods for 3D objects in laserscanning data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXV-1/B3, pp. 110-117.

Zieliński T., 2004. Numeryczny model terenu. *Magazyn Autostrady* 7/2004, str. 24-28.

COMPARISON OF PHOTOGRAMMETRY AND AIRBORNE LASER SCANNING AS A SOURCES OF DTM GENERATION USED IN CONSTRUCTION DESIGN

KEY WORDS: DTM, ALS, photogrammetry, pre-design map

Summary

Photogrammetry and airborne laser scanning are basic data acquisition techniques for generation of digital terrain models used for GIS analysis. This study focuses on the question of the suitability of these DTM creation methods for construction design purposes. According to the technical regulations such models have to be highly precise and should be characterized by economical and at the same time terrain representative sampling.

Comparative study has been conducted between photogrammetry and airborne laser scanning. Test area is stretched along the typical rail route with slopes covered with dense vegetation and the agricultural or wooded surroundings. Both the photogrammetric and ALS data were very good quality. The photographs were taken with a digital camera with a pixel size of 5 cm, scanning data were acquired by full-waveform laser scanner with point density of 11 pkt/m². Automatic matching was used for 3D photogrammetric measurements followed by necessary manual checks and final points adjustment as well as additional stereoscopic point-line measurement. ALS data were filtered based on active TIN model algorithm, which resulted with a subset of the point cloud representing the topographic surface area.

Studies have confirmed better quality of the ALS-based DTMs in comparison with the photogrammetry-based digital terrain models. This superiority refers to both the accuracy of models and the measurement ability in areas covered with vegetation. ALS method provides DTM data within required accuracy of 10 cm, whereas photogrammetric method failed to deliver that level of accuracy. On the other hand it is very difficult to generate structural lines based on the ALS data, these lines are essential for accurate but not overly dense representation of the terrain. Additionally the study incorporated the impact of full-waveform scanning method on density of the terrain points in areas with varied vegetation height cover. Only 50% decrease in the point density on bushed areas was observed in comparison with opened regions. In the areas beneath the trees smaller amount of point samples were surveyed, however achieved density was at least as good as in direct measurements.

Conducted studies have shown that currently neither photogrammetry nor ALS techniques are suitable for map creations needed in construction design phase. While ALS measurements itself are precise and efficient, the lack of automatic detection of structural lines from point clouds prevents the accurate representation of the surveyed areas.

Dane autora:

Dr hab. inż. Krystian Pyka
krisfoto@agh.edu.pl