

**PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI CHMURY PUNKTÓW
WYGENEROWANEJ METODĄ DOPASOWANIA OBRAZÓW ZDJĘĆ
LOTNICZYCH Z DANymi Z LOTNICZEGO SKANOWANIA
LASEROWEGO**

**COMPARISON OF POINT CLOUDS DERIVED FROM AERIAL IMAGE
MATCHING WITH DATA FROM AIRBORNE LASER SCANNING**

Wojciech Dominik^{1,2}

¹ Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

² OPEGIEKA Sp. z o.o.

SŁOWA KLUCZOWE: chmura punktów, dopasowanie obrazów, semi-global matching, lotnicze skanowanie laserowe, numeryczny model pokrycia terenu

STRESZCZENIE: Celem niniejszego opracowania było zbadanie właściwości chmur punktów tworzonych metodą dopasowania obrazów zdjęć lotniczych semi-global matching (SGM) i porównanie ich z chmurami punktów z lotniczego skanowania laserowego. Do badań wykorzystane zostały zdjęcia lotnicze oraz dane z lotniczego skanowania laserowego pozyskane w latach 2010-2013 na obszarze centrum Elbląga. Na podstawie wejściowego zbioru danych wygenerowano chmury punktów metodą SGM, które poddano następnie analizie. Otrzymane chmury punktów badano poprzez porównanie dokładności wysokościowej względem profilu pomierzonego w terenie, porównanie wizualne profili chmur punktów oraz porównanie wizualne wygenerowanych na podstawie chmur punktów modeli pokrycia terenu. Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie szeregu szczegółowych wniosków dotyczących jakości chmur punktów SGM w odniesieniu do różnych czynników. Sformułowane wnioski szczegółowe prowadzą do generalnego spostrzeżenia, że chmury punktów SGM są produktem mniej niezawodnym, bardziej nieprzewidywalnym i zależnym od większej liczby czynników niż chmury punktów LIDAR. Mimo to przy odpowiednich parametrach chmury punktów SGM mogą przewyższać dokładnościowo chmury punktów LIDAR, a także dostarczać bardziej szczegółowej informacji dotyczącej pokrycia terenu. Skłania to do wniosku, że chmury punktów SGM mają potencjał i warto rozwijać tę metodę generowania chmur punktów.

1. WPROWADZENIE

Upowszechnienie się w ostatnich latach fotogrametrycznych wielkoformatowych kamer cyfrowych oraz pojawienie się bardziej skutecznych algorytmów dopasowania obrazów otworzyło nowe możliwości zastosowań zdjęć lotniczych. Istotnym osiągnięciem

w dziedzinie dopasowania obrazów było opracowanie algorytmu semi-global matching (SGM) (Hirschmüller, 2008). W odróżnieniu od najczęściej stosowanych dotychczas w pomiarach fotogrametrycznych algorytmów bazujących na korelacji fragmentów obrazów, algorytm SGM dopasowuje do siebie pojedyncze piksele zdjęć. Dzięki temu rezultatem dopasowania obrazów metodą SGM jest bardzo gęsta chmura punktów. Algorytm SGM jest coraz częściej implementowany w komercyjnych programach do opracowań fotogrametrycznych. W konsekwencji gęsta chmura punktów będąca efektem dopasowania obrazów zdjęć lotniczych staje się produktem powszechnie i łatwo dostępnym. Jego wygenerowanie wymaga bardzo niewielkiego nakładu dodatkowej pracy, gdyż jedynym elementem wejściowym są zdjęcia wraz z orientacją zewnętrzną, która jest wyznaczana przy niemal każdym opracowaniu fotogrametrycznym. Pojawia się jednak pytanie, jaka jest jakość wygenerowanej w ten sposób chmury punktów, czy jest to chmura punktów porównywalna do tej jaką uzyskuje się z lotniczego skanowania laserowego (LiDAR) i czy jest ona odpowiednia do tworzenia na jej podstawie produktów pochodnych takich jak numeryczny model terenu, numeryczny model pokrycia terenu czy wektorowe modele budynków.

Porównując metody SGM i LiDAR można z pewnością stwierdzić, że każda z nich ma swoje zalety i ograniczenia. Wśród zalet skanowania laserowego można wymienić: przenikanie roślinności, możliwość pomiaru bez względu na panujące warunki oświetleniowe, rejestrowanie wielokrotnych odbić impulsów laserowych, pomiar współrzędnych punktu na podstawie pojedynczej wiązki. Ograniczeniami tej metody są natomiast: czasochłonny proces pozyskiwania danych, stosunkowo słaba dokładność sytuacyjna, stosunkowo mała gęstość punktów czy też brak wyraźnych krawędzi obiektów w wynikowej chmurze punktów. Z kolei zaletami metody dopasowania obrazów są: bardzo duża gęstość wynikowej chmury punktów, wysoka dokładność sytuacyjna, dokładne przypisanie punktom atrybutów RGB oraz szybsze pozyskanie danych. Wśród ograniczeń tej metody można natomiast wskazać brak przenikania roślinności, warunek występowania tekstury obrazu do wykonania pomiaru, warunek widoczności danego punktu na co najmniej dwóch zdjęciach.

W literaturze można spotkać coraz więcej opracowań dotyczących algorytmu SGM, jak również jego modyfikacji i udoskonalień oraz generowanej przy jego użyciu chmury punktów. Towarzyszy temu dyskusja dotycząca chmur punktów generowanych metodą SGM (dalej: chmury punktów SGM) oraz chmur punktów otrzymanych z lotniczego skanowania laserowego (dalej: chmury punktów LiDAR). Pojawiają się opinie, według których chmura punktów stworzona na podstawie zdjęć może konkurować z chmurą punktów ze skanowania laserowego, a w niektórych zastosowaniach może ją nawet zastąpić (Gehrke *et al.*, 2010; Leberl *et al.*, 2010).

Wśród publikacji na ten temat można również znaleźć prace przedstawiające ocenę dokładności chmur punktów SGM. Gehrke (Gehrke *et al.*, 2010) stwierdza, że dokładność chmur punktów SGM jest tożsama z dokładnością wynikającą z pomiaru metodą fotogrametrycznego wcięcia w przód, a zatem około 0.5 GSD dokładności sytuacyjnej i około 1.5 GSD dokładności wysokościowej. To jednak jest podejście dość uproszczone, gdyż pomija aspekt poprawności dopasowania odpowiadających sobie pikseli na zdjęciach. Bardziej rozbudowaną analizę dokładnościową chmur punktów generowanych metodą dopasowania obrazów można znaleźć w pracy Rothermela i Haali (Rothermel i Haala,

2011), gdzie autorzy analizują dokładność chmur punktów SGM w odniesieniu do chmur punktów LiDAR. Analizę dokładności chmur punktów przeprowadzono tu poprzez obliczenie odchylenia standardowego od płaszczyzny wpasowanej w chmurę punktów LiDAR w obrębie boiska piłkarskiego. Porównane zostały zdjęcia z trzech kamer (DMC I, UltraCamXp, RMK) o GSD 8cm przy różnych stosunkach bazowych (około 0.5 i około 0.25). Otrzymane odchylenie standardowe wynosiło około 0.5 GSD lub nawet mniej. Błędy systematyczne w odniesieniu do chmury punktów LiDAR również nie przekraczały 0.5 GSD. Niestety brak jest w wymienionej pracy analizy bezwzględnej dokładności badanych chmur punktów.

Najbardziej kompleksową analizę dokładności chmur punktów SGM, z jaką spotkał się autor przeprowadzili Hirschmüller i Bucher (Hirschmüller i Bucher, 2010). Autorzy tej publikacji prezentują badania wykonane na podstawie zestawu danych z kamer lotniczych DMC I, UltraCamX, Quattro DigiCAM oraz lotniczego skanera laserowego Leica ALS 50. Na podstawie porównania wizualnego modeli pokrycia terenu i profili terenowych oraz obliczeń dokładnościowych na punktach kontrolnych autorzy tej publikacji dochodzą do wniosku, że metoda SGM umożliwia wygenerowanie chmur punktów, które są dokładniejsze i bardziej szczegółowe od chmur punktów LiDAR.

Przytoczone badania dotyczące chmur punktów SGM mogą dawać pewien pogląd dotyczący charakterystyki danych generowanych tą metodą. Jednak, zdaniem autora, trudno formułować generalne wnioski na podstawie pojedynczych badań wykorzystujących różnego rodzaju dane i różną metodykę oceny dokładności. Dodatkowo autorzy dotychczasowych publikacji zazwyczaj nie rozpatrują wyników badań w odniesieniu do podstawowych czynników mających wpływ na właściwości chmur punktów SGM, takich jak stosunek bazowy, wielkość piksela terenowego (GSD), kierunek bazy, pora roku, kąt padania promieni słonecznych. Te okoliczności zmotywowały autora do podjęcia własnych badań mających na celu przeprowadzenie oceny właściwości chmur punktów SGM wygenerowanych na podstawie zdjęć z różnych kamer, przy uwzględnieniu czynników wpływających na jakość wyników. Wygenerowane chmury punktów SGM oraz wykorzystane w badaniu dane LiDAR zostały poddane analizie dokładności wysokościowej w odniesieniu do pomierzonego w terenie przekroju. Analiza pozwoliła na sformułowanie wniosków dotyczących dokładności wysokościowej oraz jakości chmur punktów SGM w odniesieniu do chmur punktów LiDAR.

2. DANE WYKORZYSTANE W BADANIACH

Do badań wykorzystane zostały zdjęcia lotnicze oraz dane z lotniczego skanowania laserowego pozyskane w latach 2010-2013 na obszarze centrum Elbląga. Dwa wykorzystane w badaniach zestawy chmur punktów z lotniczego skanowania laserowego charakteryzują się gęstością 1.3 pkt/m² oraz 10 pkt/m². Zdjęcia lotnicze zostały pozyskane kamerami DMC II 230, DMC I oraz DigiCAM60 z pikselem terenowym od 4.5 cm do 15 cm. Wykorzystano do badań 8 zestawów zdjęć lotniczych pozyskanych w różnych porach roku – od marca do grudnia. Aerotriangulacje wszystkich zestawów zdjęć zostały przeprowadzone z wykorzystaniem tych samych fotopunktów. Współrzędne płaskie fotopunktów zostały pomierzone metodą GPS RTK, natomiast rzędne wysokościowe pomierzono metodą

niwelacji technicznej w nawiązaniu do podstawowej osnowy wysokościowej I klasy. Do wyznaczenia charakterystyk dokładnościowych chmur punktów wykorzystano profil terenowy o długości około 50 m, składający się z 35 punktów pomierzonych metodą GPS RTK. Profil został pomierzony w terenie odkrytym, w dużej części utwardzonym (rys. 1). Czynniki pokrycia terenu roślinnością nie były brane pod uwagę w badaniach dokładności wysokościowej. Uznano, że jest to zagadnienie wymagające przeprowadzenia dodatkowych badań dotyczących filtracji chmur punktów SGM.



Rys. 1. Profil pomierzony w terenie metodą GPS RTK służący jako odniesienie do oceny dokładności badanych chmur punktów

3. METODYKA BADAŃ

W pierwszym etapie eksperymentu, na podstawie wejściowego zbioru danych wygenerowano chmury punktów metodą SGM. Do wygenerowania chmur punktów wykorzystano aplikację SURE udostępnioną do celów naukowych przez Instytut Fotogrametrii Uniwersytetu w Stuttgarcie (Rothermel *et al.*, 2012). W aplikacji SURE zaimplementowany jest algorytm semi-global matching autorstwa Hirschmüllera (Hirschmüller, 2008) z niewielkimi modyfikacjami usprawniającymi jego działanie.

Dopasowanie obrazów metodą SGM składa się z dwóch zasadniczych kroków. W pierwszym etapie dla każdego piksela zdjęcia bazowego, wzdłuż jego linii epipolarnej jest wyznaczana funkcja kosztów. Funkcja ta przedstawia różnicę intensywności pomiędzy pikselem ze zdjęcia bazowego a poszczególnymi pikselami leżącymi wzdłuż linii epipolarnej na zdjęciu dopasowywanym (im większa różnica intensywności tym większy „koszt”). Oprócz różnicy intensywności, dla każdej pary pikseli wyznaczane jest również przesunięcie współrzędnych pikselowych wzdłuż linii epipolarnej – paralaksa. Teoretycznie poprawnie dopasowanym pikselem jest ten, dla którego różnica intensywności w stosunku do piksela bazowego jest minimalna. Zatem po znalezieniu dla każdego piksela ze zdjęcia bazowego odpowiadającego mu piksela ze zdjęcia dopasowywanego o najmniejszej różnicy

intensywności można wygenerować chmurę punktów na podstawie wyznaczonych uprzednio paralaks. W praktyce jednak nie zawsze para pikseli o minimalnej różnicy intensywności jest poprawnym powiązaniem, co prowadzi do błędnie pomierzonych punktów. Z tego powodu do algorytmu wprowadzany jest dodatkowy warunek penalizujący znaczne różnice paralaks dla sąsiadujących ze sobą pikseli. Warunek ten sprawia, że algorytm dąży do tego, aby powstała mapa paralaks była powierzchnią jak najbardziej gładką, tym samym energia całkowita powstałej mapy paralaks jest minimalizowana. Aby zoptymalizować działanie algorytmu, paralaksy są sumowane i minimalizowane wzdłuż ośmiu kierunków wychodzących z danego piksela (Hirschmüller, 2008). Po wyznaczeniu optymalnej mapy paralaks, współrzędne terenowe dla każdego piksela są wyznaczane poprzez fotogrametryczne wcięcie w przód, w wyniku czego powstaje chmura punktów.

W przeprowadzonych badaniach generowano chmury punktów metodą SGM na podstawie par zdjęć o różnych właściwościach. Przy przygotowaniu wejściowych par zdjęć kierowano się takimi właściwościami jak: kamera, za pomocą której zostały pozyskane, wielkość piksela terenowego (GSD), stosunek bazowy pary zdjęć, data wykonania nalotu (faza okresu wegetacji), kąt słońca w czasie pozyskiwania zdjęć, kierunek bazy stereopary. Kierując się podziałem według wymienionych kryteriów wyselekcjonowano 21 par zdjęć. Na podstawie każdej pary zdjęć została wygenerowana chmura punktów metodą SGM.

Otrzymane chmury punktów badano poprzez:

- Porównanie dokładności wysokościowej profili chmur punktów w odniesieniu do profilu terenowego pomierzonego w odkrytym terenie metodą GPS RTK
- Porównanie wizualne profili chmur punktów wygenerowanych metodą SGM w odniesieniu do chmur punktów LiDAR
- Ocenę wizualną wygenerowanego na podstawie chmur punktów SGM numerycznego modelu pokrycia terenu w odniesieniu do numerycznego modelu pokrycia terenu wygenerowanego na podstawie chmur punktów LiDAR.

4. WYNIKI

Poniżej opisano rezultaty każdej z trzech metod oceny właściwości chmur punktów wygenerowanych metodą SGM w odniesieniu do chmur punktów LiDAR

4.1. Ocena dokładności wysokościowej chmur punktów na podstawie profilu terenowego

Na podstawie różnic wysokości pomiędzy badanymi chmurami punktów a pomierzonym profilem terenowym obliczono parametry charakteryzujące dokładność, takie jak średnia różnica wysokości, maksymalne ujemne i dodatnie odchyłki, błąd średni oraz odchylenie standardowe. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości statystyczne charakteryzujące dokładność wysokościową wzdłuż profilu terenowego obliczone dla badanych chmur punktów wyrażone w metrach

| Chmury punktów <i>semi-global matching</i> | | | | | | | | | | |
|--|--------|-----------------|-------------|------------|---------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------|------------------------|
| kamera | GSD | stosunek bazowy | data nalotu | kąt słońca | kierunek bazy | średnia różnica wysokości | maksymalna ujemna odchyłka | maksymalna dodatnia odchyłka | błąd średni | odchylenie standardowe |
| DMC II 230 | 5 cm | 0.52 | 24.10.2011 | 24 | N - S | -0.061 | -0.170 | +0.030 | 0.075 | 0.044 |
| DMC II 230 | 5 cm | 0.35 | 24.10.2011 | 24 | N - S | -0.051 | -0.170 | +0.100 | 0.070 | 0.049 |
| DMC II 230 | 5 cm | 0.17 | 24.10.2011 | 24 | N - S | -0.047 | -0.190 | +0.100 | 0.078 | 0.063 |
| DMC II 230 | 5 cm | 0.52 | 25.03.2012 | 37 | N - S | +0.002 | -0.050 | +0.160 | 0.042 | 0.043 |
| DMC II 230 | 5 cm | 0.35 | 25.03.2012 | 37 | N - S | -0.024 | -0.080 | +0.130 | 0.049 | 0.044 |
| DMC II 230 | 5 cm | 0.17 | 25.03.2012 | 37 | N - S | -0.018 | -0.150 | +0.110 | 0.062 | 0.060 |
| DMC II 230 | 7 cm | 0.34 | 27.03.2013 | 34 | N - S | +0.002 | -0.110 | +0.160 | 0.056 | 0.057 |
| DMC II 230 | 7 cm | 0.34 | 27.03.2013 | 34 | E - W | -0.023 | -0.190 | +0.130 | 0.068 | 0.065 |
| DMC II 230 | 15 cm | 0.51 | 23.03.2012 | 37 | N - S | +0.014 | -0.150 | +0.320 | 0.099 | 0.100 |
| DMC II 230 | 15 cm | 0.34 | 23.03.2012 | 37 | N - S | -0.022 | -0.240 | +0.340 | 0.109 | 0.108 |
| DMC II 230 | 15 cm | 0.17 | 23.03.2012 | 37 | N - S | +0.012 | -0.220 | +0.340 | 0.118 | 0.119 |
| DMC I | 10 cm | 0.46 | 30.09.2010 | 30 | N - S | -0.006 | -0.160 | +0.210 | 0.077 | 0.078 |
| DMC I | 10 cm | 0.31 | 30.09.2010 | 30 | N - S | +0.042 | -0.100 | +0.230 | 0.092 | 0.084 |
| DMC I | 10 cm | 0.15 | 30.09.2010 | 30 | N - S | +0.045 | -0.130 | +0.200 | 0.108 | 0.100 |
| DigiCAM 60 50mm | 4.5 cm | 0.40 | 19.05.2013 | 47 | N - S | -0.326 | -0.840 | -0.180 | 0.354 | 0.138 |
| DigiCAM 60 50mm | 4.5 cm | 0.40 | 06.12.2011 | 13 | N - S | -0.129 | -0.500 | +0.100 | 0.179 | 0.126 |
| DigiCAM 60 50mm | 15 cm | 0.43 | 06.12.2011 | 13 | N - S | -0.303 | -0.740 | +0.030 | 0.347 | 0.173 |
| DigiCAM 60 50mm | 15 cm | 0.29 | 06.12.2011 | 13 | N - S | -0.351 | -0.580 | +0.800 | 0.424 | 0.242 |
| DigiCAM 60 50mm | 15 cm | 0.14 | 06.12.2011 | 13 | N - S | -0.440 | -0.900 | -0.050 | 0.489 | 0.217 |
| DigiCAM 60 50mm | 15 cm | 0.29 | 06.12.2011 | 13 | E - W | -0.066 | -0.250 | +0.230 | 0.119 | 0.100 |
| DigiCAM 60 50mm | 15 cm | 0.14 | 06.12.2011 | 13 | E - W | -0.170 | -0.480 | +0.100 | 0.214 | 0.131 |

| Chmury punktów <i>Lidar</i> | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|----------------|-------------|---------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------|------------------------|
| skaner | gęstość | kąt skanowania | data nalotu | pokrycie poprzeczne | kierunek szeregow | średnia różnica wysokości | maksymalna ujemna odchyłka | maksymalna dodatnia odchyłka | błąd średni | odchylenie standardowe |
| RIEGL LMS-Q680i | 1.3 | 30 | 21.12.2011 | 20% | N - S | 0.091 | -0.06 | 0.18 | 0.101 | 0.045 |
| RIEGL LMS-Q680i | 10 | 30 | 05.03.2012 | 60% | N - S | 0.092 | -0.04 | 0.18 | 0.098 | 0.035 |

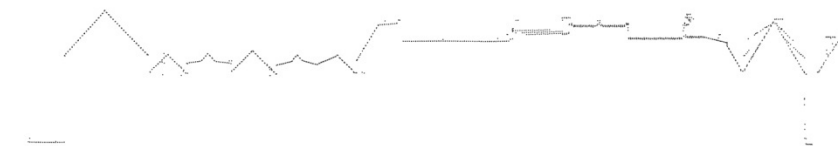
Dane przedstawione w tabeli 1 stanowią obszerny materiał będący podstawą do oceny dokładności wysokościowej chmur punktów SGM w porównaniu do chmur punktów LiDAR, przy uwzględnieniu czynników mających wpływ na właściwości chmur punktów SGM. Autor chciałby zwrócić uwagę na kilka podstawowych prawidłowości wynikających z tabeli 1:

- Chmury punktów LiDAR są obarczone większym błędem systematycznym niż chmury punktów SGM wygenerowane na podstawie zdjęć z kamer wielkoformatowych DMC I i DMC II
- Nie występuje zależność między błędem systematycznym a terenową wielkością piksela
- Chmury punktów wygenerowane ze zdjęć o większym pikselu terenowym charakteryzują się większym odchyleniem standardowym, na co wskazują również maksymalne wartości odchyłek
- Niemal wszystkie zestawy zdjęć z kamer wielkoformatowych DMC I i DMC II dostarczają chmurę punktów o większej dokładności (mniejszym błędzie średnim) niż chmury punktów LiDAR
- Wyraźnie widoczna jest zależność stosunku bazowego i odchylenia standardowego - na podstawie par zdjęć o większym stosunku bazowym generowana jest chmura o mniejszym odchyleniu standardowym
- Odchylenie standardowe chmury punktów LiDAR jest mniejsze od niemal wszystkich chmur punktów SGM. Jedynie chmury punktów generowane na podstawie zdjęć o największym stosunku bazowym dorównują pod tym względem chmurom punktów LiDAR
- Chmury punktów SGM wygenerowane na podstawie zdjęć z kamery DigiCAM są obarczone znacznym błędem systematycznym, którego przyczyną jest dla autora niewyjaśniona, jednak wartość odchylenia standardowego nieznacznie gorsza od kamer wielkoformatowych wskazuje, że zdjęcia te również dostarczają chmurę punktów oddającą poprawnie ukształtowanie terenu.

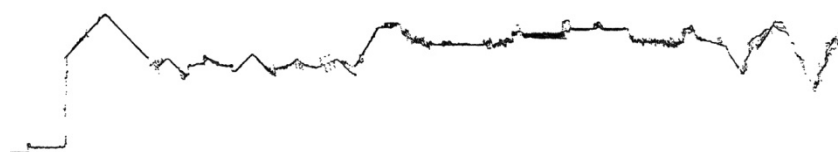
4.2 Porównanie wizualne profili terenowych

Na podstawie wszystkich chmur punktów SGM zostały stworzone wizualizacje profilu o szerokości 1 m. Analiza została przeprowadzona na dwóch odcinkach profilu przebiegających przez teren o gęstej zabudowie (dachy kamienic) oraz teren porośnięty drzewami. Wszystkie profile chmur punktów SGM były konfrontowane z profilami chmur

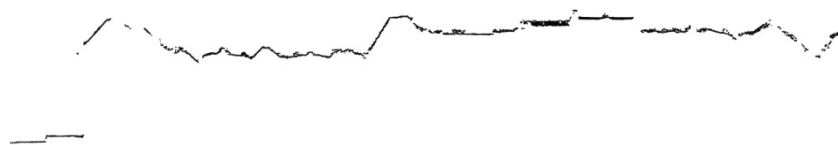
punktów LiDAR. Na rysunkach 2 - 11 przedstawiono najciekawsze zdaniem autora wyniki porównania.



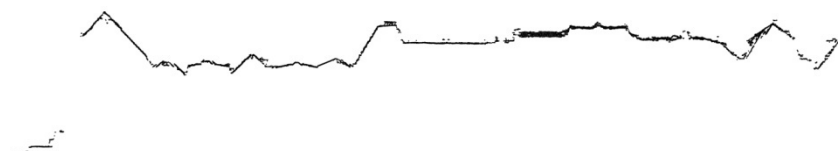
Rys. 2. Profil przez teren zabudowany, chmura punktów LiDAR 10 pkt/m²



Rys. 3. Profil przez teren zabudowany, chmura punktów SGM, kamera DMC II 230, GSD 5 cm, stosunek bazowy 0.17



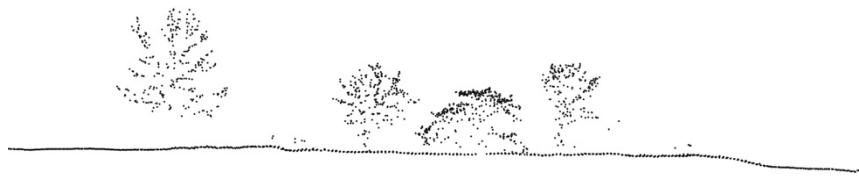
Rys. 4. Profil przez teren zabudowany, chmura punktów SGM, kamera DMC II 230, GSD 5 cm, stosunek bazowy 0.52



Rys. 5. Profil przez teren zabudowany, chmura punktów SGM, kamera DigiCAM60, GSD 4.5 cm, stosunek bazowy 0.4



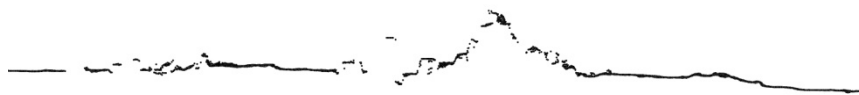
Rys. 6. Profil przez teren zabudowany, chmura punktów SGM, kamera DMC II 230, GSD 15 cm, stosunek bazowy 0.17



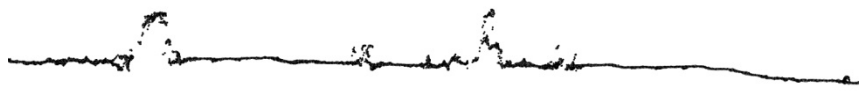
Rys. 7. Profil przez teren zadrzewiony, chmura punktów LiDAR 10 pkt/m², przed okresem wegetacji



Rys. 8. Profil przez teren zadrzewiony, chmura punktów SGM, kamera DMC I, GSD 10 cm, stosunek bazowy 0.15, okres wegetacji



Rys. 9. Profil przez teren zadrzewiony, chmura punktów SGM, kamera DMC I, GSD 10 cm, stosunek bazowy 0.46, okres wegetacji



Rys. 10. Profil przez teren zadrzewiony, chmura punktów SGM, kamera DMC II 230, GSD 5 cm, stosunek bazowy 0.17, przed okresem wegetacji



Rys. 11. Profil przez teren zadrzewiony, chmura punktów SGM, kamera DMC II 230, GSD 5 cm, stosunek bazowy 0.17, okres wegetacji

Na podstawie profili przedstawionych na rysunkach 2 - 11 można sformułować następujące spostrzeżenia:

- Chmura punktów wygenerowana ze zdjęć o mniejszym stosunku bazowym stanowi znacznie bardziej wierne i kompletne odwzorowanie kształtu zabudowy
- Generowanie chmur punktów na podstawie zdjęć z kamery DigiCAM daje bardzo podobne rezultaty do chmur punktów generowanych na podstawie kamery wielkoformatowej
- Chmura punktów generowana ze zdjęć o GSD 15 cm znacznie ustępuje jakościowo chmurze punktów generowanej ze zdjęć o GSD 5 cm.
- Chmura punktów LiDAR wykazuje wyraźną przewagę w pomiarze wąskich ulic (z prawej strony profilu terenu zabudowanego)
- Odpowiednia konfiguracja zdjęć potrafi dostarczyć znaczną liczbę punktów na fasadach budynków (rys. 3)
- Jedynie chmura punktów wygenerowana na podstawie pary zdjęć o najmniejszym stosunku bazowym w przybliżeniu poprawnie odwzorowuje kształt koron drzew
- Okres wegetacji ma kluczowy wpływ na odwzorowanie kształtu koron drzew przez chmurę punktów SGM. Żadna z chmur punktów wygenerowana ze zdjęć wykonanych poza okresem wegetacji nie przedstawia choćby przybliżonego kształtu koron drzew
- Roślinność bywa źródłem błędów w chmurze punktów SGM. Występują przypadki gdzie w miejscu występowania drzew pomierzone zostały punkty pod powierzchnią terenu.

4.3. Ocena wizualna modeli pokrycia terenu

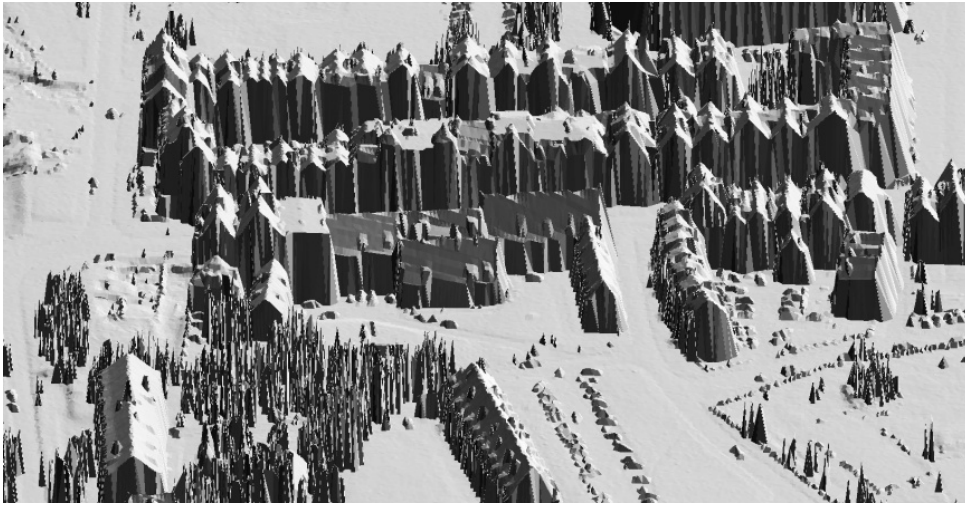
Na podstawie opisanych powyżej procedur oceny jakości chmur punktów SGM wyselekcjonowano chmurę punktów o najlepszej jakości. Ocena na podstawie charakterystyk dokładnościowych oraz wizualizacji profilu pozwoliła dojść do wniosku, że najlepsze wyniki prezentuje chmura punktów wygenerowana na podstawie zdjęć z kamery DMC II 230 o pikselu terenowym 5 cm i stosunku bazowym 0.17. Wybrana chmura punktów stanowi pewien kompromis pomiędzy wysoką dokładnością osiąganą przy dużych stosunkach bazowych a wiernością odwzorowania kształtu pokrycia terenu. Stworzono wizualizację wyselekcjonowanej chmury punktów w postaci cieniowanej powierzchni, którą skonfrontowano z wizualizacjami stworzonymi na podstawie chmur punktów LiDAR o gęstości 1.3 pkt/m² i 10 pkt/m². Wizualizacje wszystkich trzech chmur punktów przedstawione są na rysunkach 12 - 14.

Na podstawie porównania wizualnego modeli utworzonych z chmury punktów SGM i chmur punktów LiDAR można sformułować następujące spostrzeżenia:

- Chmura punktów SGM charakteryzuje się wielokrotnie większą gęstością (300 pkt/m²) niż chmury punktów LiDAR (1.3 pkt/m² i 10 pkt/m²)
- Wyraźnie widoczna jest większa szorstkość modelu stworzonego na podstawie chmury punktów SGM
- Chmura punktów SGM przewyższa pod względem szczegółowości chmurę punktów LiDAR o gęstości 1.3 pkt/m². W odniesieniu do chmury punktów LiDAR o gęstości 10 pkt/m² trudno dokonać jednoznacznej oceny dotyczącej szczegółowości. Obie chmury punktów wydają się charakteryzować podobną

szczegółowością. Występują zarówno obiekty widoczne tylko na chmurze punktów LiDAR jak również obiekty widoczne tylko na chmurze punktów SGM.

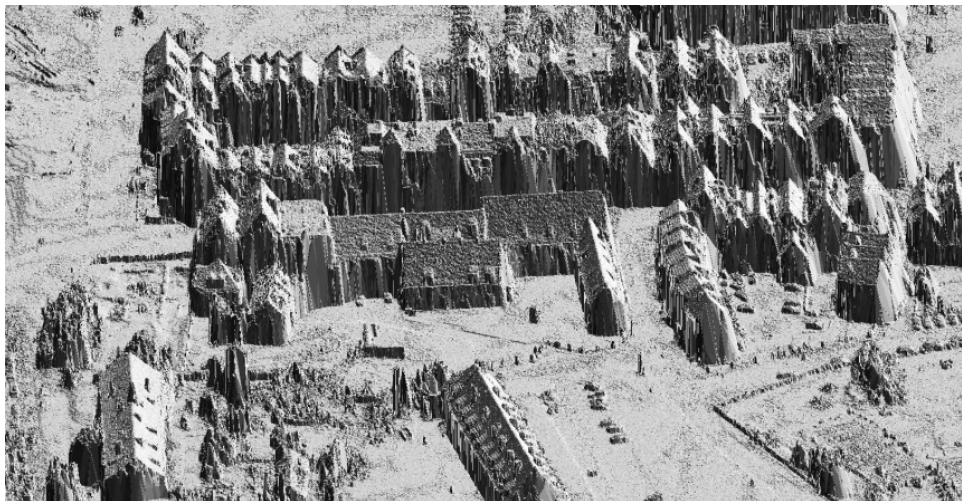
- Chmura punktów SGM wyraźnie ustępuje chmurze punktów LiDAR pod względem odwzorowania kształtu koron drzew. Należy przy tym zaznaczyć, że prezentowana na rysunku 14 chmura punktów została wygenerowana ze zdjęć pozyskanych przed okresem wegetacji.



Rys. 12. Numeryczny model pokrycia terenu wygenerowany na podstawie chmury punktów LiDAR o gęstości 1.3 pkt/m²



Rys. 13. Numeryczny model pokrycia terenu wygenerowany na podstawie chmury punktów LiDAR o gęstości 10 pkt/m²



Rys. 14. Numeryczny model pokrycia terenu wygenerowany na podstawie chmury punktów SGM o gęstości 300 pkt/m²

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone prace dostarczyły obszerny materiał do badań nad właściwościami chmur punktów SGM. Generalnym spostrzeżeniem, jakie można sformułować po przeprowadzeniu badań jest to, że chmura punktów SGM jest produktem o całkowicie odmiennej naturze od chmury punktów LiDAR. Przy porównaniu tych dwóch produktów należy rozpatrywać właściwości chmur punktów SGM w kontekście wielu czynników wpływających na ich jakość. Powyższe spostrzeżenie prowadzi do wniosku, że chmury punktów SGM są produktem o mniej przewidywalnej jakości niż chmury punktów LiDAR. Są bardziej podatne na szereg czynników trudnych do kontrolowania (jakość zdjęć) i niejednorodnych na obszarze opracowania (geometria wcięcia, cienie). Skanowanie laserowe jest bardziej niezawodne, mniej zależne od czynników zewnętrznych. Planując nalot LiDAR przy zadanych parametrach możemy się spodziewać jaki produkt otrzymamy. Jakość jest w przybliżeniu jednolita na całym obszarze opracowania. Z góry wiadomo w jakich miejscach jakość chmur punktów LiDAR może być słabsza – np. brak odbić od wody czy niektórych typów pokrycia dachowego. W przypadku chmur punktów tworzonych metodą dopasowania zdjęć lotniczych wpływ wielu czynników na jakość otrzymanej chmury punktów nie jest jeszcze w pełni rozpoznany. Badania przedstawione w niniejszej pracy miały na celu powiększenie wiedzy w tym zakresie.

Mimo wykazanych w badaniach ewidentnych ograniczeń chmur punktów SGM, przeprowadzone prace pozwalają sformułować wniosek, że chmury punktów SGM, wygenerowane ze zdjęć o odpowiednich parametrach, mogą charakteryzować się lepszą bezwzględną dokładnością wysokościową niż chmury punktów LiDAR na odkrytym terenie. Analizy wizualne obu rodzajów chmur punktów pozwalają stwierdzić, że pod względem szczegółowości odwzorowania pokrycia terenu chmury punktów SGM mogą

dorównywać lub nawet przewyższać chmury punktów LiDAR. Można zatem stwierdzić, że chmury punktów SGM mają potencjał i warto rozwijać tę metodę generowania chmur punktów, gdyż jest to produkt osiągalny przy niewielkim nakładzie pracy, który dla określonych zastosowań mógłby zastąpić chmury punktów LiDAR wymagające przeprowadzenia dodatkowego kosztownego nalotu.

Podstawowym zidentyfikowanym w badaniach problemem chmur punktów SGM jest kwestia obszarów pokrytych roślinnością, gdzie chmury punktów SGM wyraźnie ustępują chmurze punktów LiDAR zarówno pod względem dokładności jak i szczegółowości odwzorowania pokrycia terenu. Trudno spodziewać się, że w tym obszarze chmury SGM będą mogły zastąpić chmury punktów LiDAR.

Przedstawione badania stanowią bazę wyjściową do dalszych prac nad właściwościami chmur punktów SGM, jakie autor zamierza podejmować w przyszłości. Wśród obszarów wymagających dalszych badań autor wskazałby m.in. takie zagadnienia jak:

- wpływ parametrów radiometrycznych zdjęć wykorzystanych do generowania chmur punktów,
- filtracja chmur punktów SGM,
- łączenie chmur punktów SGM powstałych na podstawie wielu par zdjęć.

6. LITERATURA

Gehrke S., Morin K., Downey M., Boehrer N., Fuchs T., 2010. Semi-global matching: an alternative to LiDAR for DSM generation? *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38(1).

Hirschmüller H., 2008. Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 30(2), pp. 328-341.

Hirschmüller H., Bucher T., 2010. *Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching*. DGPF, Vienna.

Leberl F., Irschara A., Pock T., Meixner P., Gruber M., Scholz S., Wiechert A., 2010. Point Clouds: Lidar versus 3D Vision. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(10): 1123–1134.

Rothermel M., Haala N., 2011. Potential of Dense Matching for the Generation of High Quality Digital Elevation models. ISPRS Hannover Workshop High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, p. 331-343.

Rothermel M., Wenzel K., Fritsch D., Haala N., 2012. SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. Proceedings LC3D Workshop, Berlin.

COMPARISON OF POINT CLOUDS DERIVED FROM AERIAL IMAGE MATCHING WITH DATA FROM AIRBORNE LASER SCANNING

KEY WORDS: point cloud, image matching, semi-global matching, airborne laser scanning, digital surface model

Summary

The aim of this study was to investigate the properties of point clouds derived from aerial image matching and to compare them with point clouds from airborne laser scanning. A set of aerial images acquired in years 2010-2013 over the city of Elblag were used for the analysis. Images were acquired with the use of three digital cameras: DMC II 230, DMC I and DigiCAM60 with a GSD varying from 4.5 cm to 15 cm. Eight sets of images that were used in the study were acquired at different stages of the growing season – from March to December. Two LiDAR point clouds were used for the comparison – one with a density of 1.3 p/m² and a second with a density of 10 p/m².

Based on the input images point clouds were created with the use of the semi-global matching method. The properties of the obtained point clouds were analyzed in three ways:

- by the comparison of the vertical accuracy of point clouds with reference to a terrain profile surveyed on bare ground with GPS-RTK method
- by visual assessment of point cloud profiles generated both from SGM and LiDAR point clouds
- by visual assessment of a digital surface model generated from a SGM point cloud with reference to a digital surface model generated from a LiDAR point cloud.

The conducted studies allowed a number of observations about the quality of SGM point clouds to be formulated with respect to different factors. The main factors having influence on the quality of SGM point clouds are GSD and base/height ratio. The essential problem related to SGM point clouds are areas covered with vegetation where SGM point clouds are visibly worse in terms of both accuracy and the representation of terrain surface. It is difficult to expect that in these areas SGM point clouds could replace LiDAR point clouds.

This leads to a general conclusion that SGM point clouds are less reliable, more unpredictable and are dependent on more factors than LiDAR point clouds. Nevertheless, SGM point clouds generated with appropriate parameters can have better accuracy than LiDAR point clouds and present more detailed information about the terrain surface.

Dane autora:

Mgr inż. Wojciech Dominik

e-mail: wojciech.a.dominik@gmail.com

telefon: +48 22 234 7694

Przesłano 6.08.2014

Zaakceptowano 20.12.2014