

MOŻLIWOŚCI TWORZENIA NUMERYCZNEGO MODELU POKRYCIA TERENU ZE STEREOPARY ZDJĘĆ SATELITARNYCH VHRS

POSSIBILITIES OF GENERATING DIGITAL SURFACE MODEL FROM STEREOPAIRS OF VHRS SATELLITE IMAGES

Krzysztof Bakula, Wojciech Woźniak

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

SŁOWA KLUCZOWE: NMPT, stereopara, zdjęcia satelitarne, dopasowanie obrazów

STRESZCZENIE: Celem niniejszego artykułu było ukazanie możliwości tworzenia numerycznych modeli wysokościowych na podstawie pary satelitarnych zdjęć stereoskopowych. Zdjęcia obejmowały obszar centralnej Warszawy. Wyniki skontrolowano z modelem powstałym na podstawie lotniczego skanowania laserowego (LIDAR). Stereopara pochodziła z satelity o bardzo dużej rozdzielczości Pleiades, zaś dane LIDAR zostały pozyskane w ramach projektu ISOK. W eksperymencie analizowano wpływ parametrów gęstego dopasowania obrazów, liczby fotopunktów niezbędnej do poprawnej georeferencji scen satelitarnych wstępnie orientowanych współczynnikami RPC, oceniono dokładność względem modelu wysokościowego LIDAR z uwzględnieniem eliminacji błędów grubych oraz spowodowanych martwymi polami. Prace przeprowadzono w oprogramowaniu Trimble Inpho. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość zastosowania wyłącznie 2-3 fotopunktów na obszarze opracowania, aby uzyskać zadowalające wyniki orientacji, a dalej tworzonego modelu wysokościowego. W analizie dokładności modelu wysokościowego uzyskano wyniki na poziomie pojedynczego piksela. Dla terenów odkrytych przy 214 fotopunktach kontrolnych z danych LIDAR błąd wysokościowy RMS wyniósł 50 cm.

1. WPROWADZENIE

W dzisiejszych czasach teledetekcyjne dane wysokościowe można gromadzić na wiele sposobów: na podstawie zdjęć lub skanowania laserowego pozyskiwanych przez samoloty, drony lub inne platformy lotnicze, a także przez zobrazowania pozyskiwane z pułapu satelitarnego. Zdjęcia lotnicze, jak i lotnicze skanowanie laserowe (LIDAR) charakteryzują się wysoką rozdzielczością, dzięki czemu numeryczne modele wysokościowe z tych technik są wysokiej dokładności (Hejmanowska *et al.*, 2008; Biegała i Preuss, 2009; Kubalska i Preuss, 2013; Kurczyński i Bakula, 2013; Dominik, 2014). Zdjęcia satelitarne posiadają zazwyczaj mniejszą rozdzielczość przestrzenną, jednak satelity mogą szybciej

zobrazować większy obszar. W ostatnich latach powstało wiele nowych systemów satelitarnych bardzo wysokiej rozdzielczości (VHRS), oferujących zdjęcia o rozdzielczości zbliżonej do zdjęć lotniczych.

Jeszcze kilkanaście lat temu zdjęcia satelitarne były wykorzystywane do opracowań tematycznych przez branże takie jak geologia, hydrologia, leśnictwo, rolnictwo, ochrona środowiska itp. W systemach tych istotniejsze były możliwości teledetekcyjne niż fotogrametryczne, gdyż terenowe wielkości piksela zobrazowań z satelitów mieściły się w przedziale od 15 do 80 m (np. misje Landsat). Jednak pojawienie się pierwszych satelitów bardzo wysokiej rozdzielczości otworzyło nowe możliwości dla fotogrametrii, jak również zaowocowało późniejszym powstawaniem kolejnych systemów.

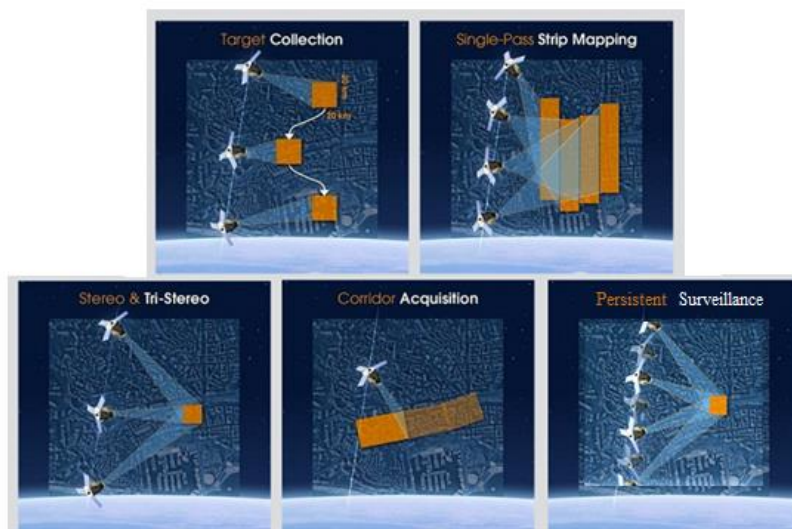
Pierwsze satelity VHRS zostały wysłane na orbitę na przełomie XX i XXI wieku. Rozdzielczość przestrzenna zdjęć, które wtedy były wykonywane wynosiła ok. 1 m. Zestawienie pierwszych satelitów VHRS znaleźć można w pracy Kurczyńskiego (2013). Pierwsze takie systemy (Ikonos II, QuickBird 2, OrbView-3, Eros) oferowały zdjęcia z rozdzielczością radiometryczną 11-bitową. Największą rozdzielczość przestrzenną wyrażoną terenowym rozmiarem piksela (GSD) posiadał system QuickBird. W zakresie panchromatycznym oferował w nadirze zobrazowania o wielkości piksela 0.64 m, a w zakresie multispektralnym poniżej 3 m. W następnych latach powstawały nowe systemy satelitarne, które oferowały jeszcze lepszą rozdzielczość przestrzenną zdjęć. W 2007 roku na orbitę został wysłany satelita WorldView, w 2008 satelita GeoEye, w 2011 Pleiades, a w 2012 kolejny satelita z serii SPOT, który osiągnął rozdzielczość przestrzenną zobrazowań zbliżoną do systemów VHRS. Na każdy z tych systemów składa się także bliźniaczy satelita posiadający identyczne lub zbliżone parametry, dzięki czemu systemy mogą dostarczyć więcej produktów oraz zmniejsza się czas rewizyty satelitów na danym obszarze. W pracy Wyczalka *et al.* (2010) przedstawiono parametry systemów satelitarnych stworzonych w późniejszych latach. Po około dekadzie od pojawienia się pierwszych satelitów VHRS rozdzielczość terenowa w zakresie panchromatycznym wzrosła już do 0.3 m dla WorldView 2. Każdy z tych systemów poza wysoką rozdzielczością oferował dodatkowe możliwości. Satelita WorldView 2 pozwalał uzyskać zdjęcia w aż ośmiu zakresach spektralnych (niebieski brzegowy, niebieski, zielony, żółty, czerwony, czerwonego brzegowy, bliska podczerwień, bliska podczerwień 2/SWIR). Doskonale nadaje się dzięki temu do opracowań teledetekcyjnych. SPOT 6/7 jest to system posiadający nieco gorszą rozdzielczość terenową (GSD o wartości 1.5 m), ale jednak oferuje bardzo duże zobrazowania o wielkości pojedynczej sceny 60 x 60 km. Satelity systemu SPOT 6 i SPOT 7 posiadają podobne orbity co satelity Pleiades, ale ich orbity obrócone są względem siebie o odległość kątową równą 180° (są po przeciwnej stronie Ziemi), natomiast względem Pleiades o 90° . Oba systemy są zintegrowane i pozwalają na jeszcze szybsze przesyłanie danych do użytkownika.

Satelita Pleiades 1A został wysłany na orbitę okołozemską 16 grudnia 2011 roku przez Airbus Defence & Space. Wyposażony jest w jedno urządzenie obrazujące składające się z dwóch teleskopów Korsha o ogniskowej 12.9 m. Jest w stanie zrobić barwne zobrazowanie w rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 0.5 m (choć jest to piksel podlegający przepróbkowaniu ze źródłowego obrazu o GSD ok. 0.7 m). Jego bliźniaczy satelita Pleiades 1B wykonuje zdjęcia o takich samych parametrach. Został wysłany w kosmos rok później, a dokładnie 2 grudnia 2012 roku. Poza wysoką rozdzielczością satelity te odznaczają się dużą możliwością zakresu obrazowania z jednej orbity dzięki możliwości wychylenia osi kamery

w płaszczyźnie orbity o kąty od 35° do 45° od linii pionu. Użytkownik może pozyskać zatem dane z satelitów na kilka sposobów, co opisano poniżej i zwizualizowano na rysunku 1 (www.nik.com.tr):

- *Target* (pojedyncze cele) - służy do pozyskiwania zobrazowań z mniejszych, oddalonych od siebie obszarów; można uzyskać 15 ujęć (20km x 20km) w korytarzu o szerokości 1000 km utworzonym poprzez wychylenie $\pm 30^\circ$,
- *StripMapping* (szeroki zasięg w jednym przelocie) - satelity tworzą obraz terenu poprzez łączenie kilku pasów w blok; dzięki tej metodzie podczas jednego przelotu satelita może przekazać obszar nawet 100 km x 100 km,
- *Stereo i tri-stereo* - metoda z której korzystano w niniejszej pracy; służy do tworzenia modeli 3D, NMT, NMPT; metoda pozwalająca na pozyskanie obrazu stereo dla obszaru o rozmiarze do 20km x 280km,
- *Corridor* - metoda, z której korzysta się przy monitorowaniu długich ciągów takich jak wybrzeża mórz lub rzek bądź granic państw; dzięki szybkim rewizytom obu satelitów nawet granice dużych państw mogą być zobrazowane w krótkim czasie,
- *Persistent Surveillance* - metoda ta polega na monitorowaniu przez satelitę danego obszaru jak najdłużej przez jeden przelot; dzięki temu można analizować ruchome obiekty, ich trajektorie i prędkość.

W przeciągu kilkunastu ostatnich lat próbowano już korzystać z zasobów pałapu satelitarnego, aby tworzyć różne modele wysokościowe (chmury punktów, numeryczne modele pokrycia terenu - NMPT, modele 3D miast i budynków). Aby było to możliwe użytkownik musi posiadać sceny obrazujące ten sam teren pozyskane z różnej orbity lub tej samej orbity, ale z różnego miejsca położenia satelity na niej - sceny te muszą tworzyć pokrycie stereoskopowe.



Rys. 1. Metody pozyskiwania danych przez satelity Pleiades (źródło: <http://www.satpalda.com>)

Fig. 1. Methods of data acquisition for Pleiades satellite (source: <http://www.satpalda.com>)

Przykładem tworzenia NMPT na podstawie stereopar satelitarnych jest stworzony przez Japończyków ASTER GDEM. Jest to NMPT stworzone z ponad miliona stereopar satelitarnych ASTER z udziałem dopasowania obrazów (ang. *image matching*). Pokrywa on 99% obszarów lądowych Ziemi, z dokładnością wysokościową nie gorszą niż 20 m, która znacząco zależy od morfologii terenu, przez co jest możliwe wystąpienie przypadkowych błędów, co sprawia, że nie zawsze dane te są wiarygodnym źródłem danych wysokościowych. Porównując model ten z modelami stworzonymi na podstawie lotniczego skanowania laserowego widać, że jest on kilkadziesiąt razy mniej dokładny (Bakula *et al.*, 2015). Przy tworzeniu NMPT przez użytkownika bezpośrednio ze stereopar satelitarnych ASTER błędy średnie wyznaczenia wysokości przez model są nie mniejsze niż 6 m i odchylenie standardowe nie mniejsze niż 4 m. Jednak jest to dokładność wystarczająca do generowania produktów fotogrametrycznych takich jak ortofotomapa w skali 1:25000, przy bardzo atrakcyjnych cenach pozyskania danych (Lewiński i Ewiak, 2004).

Jednym z pierwszych NMPT utworzonych ze stereopary zdjęć satelitarnych pozyskanych z jednej orbity był ITM-1 (IKONOS Terrain Model -1) oferujący dwa standardy danych, ITM-5c (dokładność 30 m) oraz ITM-5e (dokładność 6 m). Tworząc jednak NMPT ze zdjęć satelitarnych IKONOS (terenowy rozmiar piksela 0.8 m) z wykorzystaniem współczynników wielomianowych (RPC) i fotopunktów przy orientacji zewnętrznej zdjęć, można otrzymać dużo lepsze dokładności orientacji scen na poziomie błędu wysokościowego RMS równego 1.6 m oraz dokładność finalnego NMT wynoszącą 1.7 m (Koza, 2006).

Pod względem tworzenia NMPT ze stereopar zobrazowań satelitarnych możliwość tę dawał również satelita Cartosat 1. Jest to satelita Indyjskiej Agencji Kosmicznej zwany również IRS-P5. Został wysłany w kosmos w 2005 roku i jest jednym z 8 satelitów indyjskiego programu kosmicznego. Jego heliosynchroniczna orbita znajduje się w odległości 618 km od Ziemi. Potrafi pozyskiwać zobrazowania w zakresie panchromatycznym o rozdzielczości terenowej 2.5 m. Jest to satelita, którego główną misją jest pozyskiwanie zdjęć stereoskopowych służących do wykonania modeli wysokościowych. W roku 2006 został zorganizowany program C-SAP (*Cartosat-1 Scientific Assessment Programme*) mający na celu sprawdzenie dokładności tworzonych modeli. W programie uczestniczyło 11 zespołów, w tym jeden z Polski. Stereopara obrazowała okolice Rawy Mazowieckiej i została zorientowana na podstawie współczynników RPC i fotopunktów. W zależności od użytych fotopunktów błąd RMS wyznaczenia współrzędnych płaskich i wysokości wynosił od 1 m do 1.5 m. W ostateczności wykorzystano 9 fotopunktów. Model porównano z NMPT powstałym z map topograficznych w skali 1:25000, co dało różnice na większości terenu nie przekraczające 3 - 4 m (Dąbrowski *et al.*, 2006).

Wiele późniejszych prac dotyczyło również zagadnień tworzenia numerycznych modeli wysokościowych z użyciem dopasowania obrazów dla stereopar czy trzech scen w pokryciu (tripletów) (Alganci *et al.*, 2018; Ghuffar, 2018; Rupnik *et al.*, 2018). Do ich rezultatów odniesiono się w dyskusji nad uzyskanymi w niniejszej pracy rezultatami.

Celem prac eksperymentalnych opisanych w niniejszym artykule jest odpowiedź na pytanie, czy obecnie zdjęcia satelitarne VHRS mogą konkurować ze zdjęciami lotniczymi lub skanowaniem laserowym w zakresie tworzenia numerycznego modelu pokrycia terenu. W artykule zaprezentowane zostaną możliwości wykorzystania zdjęć stereoskopowych z pałapu satelitarnego do tworzenia numerycznego modelu pokrycia terenu oraz określona

będzie dokładność modeli wysokościowych z uwzględnieniem różnorodnych problemów, które można napotkać przy tworzeniu modelu wysokościowego ze scen satelitarnych.

2. METODYKA

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wykorzystane dane fotogrametryczne, wysokościowe dane referencyjne oraz opis metodyki wykonanego eksperymentu.

2.1. Opis danych

Przedmiotem opracowania były okolice Wisły w centralnej części Warszawy. Jest to teren mocno zurbanizowany, a także w pewnym stopniu zadrzewiony i zakrzewiony w najbliższym otoczeniu rzeki. Obszar tego rodzaju jest najtrudniejszym dla tworzenia NMPT ze zdjęć, gdyż mamy do czynienia zarówno z obiektami antropogenicznymi, jak i roślinnością i wodą. Stereopara pochodzi z satelity Pleiades 1B w czasie pojedynczego przelotu satelity. Drugie zdjęcie zostało zrobione bezpośrednio po 45 sekundach od pierwszego. Zdjęcia posiadają 4 zakresy spektralne: B0 (Niebieski), B1 (Zielony), B2 (Czerwony), B3 (Bliska podczerwień). Widok stereopary przedstawiono na rysunku 2. Dane pozyskano od firmy Airbus Defence & Space Geo. Zobrazowania stereoskopowe zostały zrobione przez Pleiades w dniu 20 czerwca 2013 r. Producent udostępnił dane we własnym formacie „dimap”. Jest to format posiadający wszystkie niezbędne dane pozwalające na dalsze przetwarzanie stereopary:

- zintegrowany obraz w formacie JPEG 2000 lub GeoTIFF,
- współczynniki RPC pozwalające na łatwą georeferencję i ortorektyfikację,
- pliki KMZ, które pozwalają na wyświetlanie zobrazowań w programie Google Earth,
- specjalne maski w tym maska chmur i niewidocznych obszarów.
-



Rys. 2. Podgląd stereopary z system Pleiades dla obszaru Warszawy wzdłuż Wisły
(źródło: Airbus Defense and Space)

Fig. 2 View on stereo-pair of Pleiades system for Warsaw area along Vistula river
(source: Airbus Defense and Space)

W orientacji scen satelitarnych oraz kontroli tego procesu wykorzystano 8 fotopunktów pomierzonych techniką GNSS. Danymi referencyjnymi dla oceny produktów wysokościowych ze scen satelitarnych było lotnicze skanowanie laserowe (LIDAR), którego dane pochodzą z Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii, a pozyskane zostały w kwietniu 2012 roku. Dane te posłużyły również w ostatecznej części analiz do pozyskania punktów kontrolnych dla płaskich obszarów odkrytych. Dane LIDAR pozyskano w ramach programu Informatycznego Systemu Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (ISOK). Dane te reprezentowały standard II skanowania, co oznacza, że (Kurczyński i Bakula, 2013):

- przeprowadzone zostały dwa niezależne naloty, dzięki czemu niepotrzebne są dodatkowe szeregi poprzeczne,
- średnia gęstość chmury punktów dla pojedynczego pasa skanowania była utrzymana na poziomie wyższym lub równym 12 punktom na metr kwadratowy (dwa naloty z gęstością powyżej 6 pkt/m²),
- kąt poprzeczny skanowania był mniejszy niż 25°,
- błąd średni punktów skanowania laserowego po wyrównaniu był mniejszy bądź równy 10 cm,
- pokrycie poprzeczne między szeregami wynosił co najmniej 20%.

2.2. Metodyka eksperymentu

Pracę na zdjęciach satelitarnych zrealizowano w programie Trimble Inpho, do którego zaimportowano stereoparę zdjęć wraz ze współczynnikami RPC. Chmury punktów z dopasowania obrazów tworzone były w module moduł MATCH-T DSM. Kolejne analizy polegały na:

- 1) doborze współczynników gęstego dopasowania obrazów dla scen satelitarnych i weryfikacji ich wpływu na jakość ostatecznego produktu (rozdział 3.1),
- 2) wyborze liczby fotopunktów do orientacji scen satelitarnych oraz ich rozmieszczenia (rozdział 3.2),
- 3) wizualnej i analitycznej analizie wyników dopasowania obrazów wykorzystanych przy tworzeniu NMPT i jego wpływu na dokładność modelu wysokościowego względem NMPT powstałego z danych LIDAR (rozdział 3.3),
- 4) analizie numerycznej dokładności NMPT na płaskich powierzchniach eliminującej wpływ mniejszej szczegółowości NMPT względem danych LIDAR oraz martwych pól (rozdział 3.4).

3. REZULTATY

Wyniki analiz zestawiono w 4 podrozdziałach opisujących wykonane analizy przedstawione w rozdziale 2.2 wraz z ich rezultatem.

3.1. Analiza możliwości generowania chmur punktów z danych VHRS

W pierwszej analizie stworzono chmury punktów bez użycia fotopunktów. W nadaniu georeferencji wykorzystano jedynie współczynniki RPC dostarczone wraz ze scenami satelitarnymi. Stworzono osiem różnych wariantów („a”-„h”), które porównano i wybrano w kontekście najbardziej optymalnych parametrów do kolejnych analiz. Tabela 1 prezentuje

wybrane parametry do generowania chmur punktów w wariantach „a”-„h” oraz wyniki uzyskane względem fotopunktów mierzonych techniką GNSS. Wyniki podano z uwzględnieniem statystyk automatycznie liczonych w czasie wygenerowania chmur w postaci wartości średniej różnicy wysokości dla fotopunktów i miary rozrzutu odchyłek opisanej odchyleniem standardowym. Wszystkie warianty ukazały wartość średnią różnic wysokości na poziomie ok. 35-36 m, co związane jest z wysokościowym układem elipsoidalnym, do którego odnoszą się współczynniki RPC, w którym powstała chmura punktów bez jakiegokolwiek fotopunktu. Wielkości rozrzutu wartości odchyłek dały informację na temat wpływu poszczególnych parametrów tworzenia chmur punktów: wielkości interpolowanego oczka NMPT, parametru gęstości dopasowania obrazów wyrażonego w liczbie pikseli, co ile ma być generowany punkt, a także parametru wygładzania.

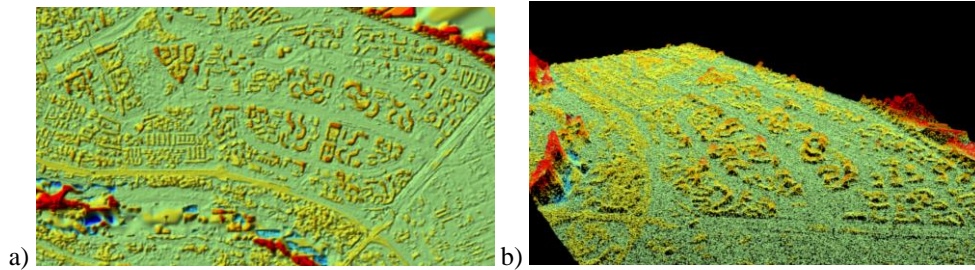
Tabela 1. Warianty wygenerowanych chmur punktów przy orientacji z użyciem RPC oraz uzyskane wyniki względem fotopunktów kontrolnych

Table 1. Variants of generated point clouds with using RPC coefficients and results obtained with reference to check points

	Oczko siatki GRID	Parametr gęstości	Wygładzanie	Wartość średnia różnicy wysokości [m]	Odchylenie standardowe [m]
Wariant a	3.6 m	3 piksele	Low	35.64	6.26
Wariant b	1 m	1 piksel	Low	35.37	5.73
Wariant c	1 m	2 piksele	High	35.70	5.83
Wariant d	1 m	2 piksele	Medium	35.44	5.45
Wariant e	0.5 m	2 piksele	Medium	35.55	5.23
Wariant f	1 m	1 piksel	Medium	35.54	5.56
Wariant g	0.5 m	2 piksele	High	35.70	5.71
Wariant h	1 m	1 piksel	High	35.37	5.52

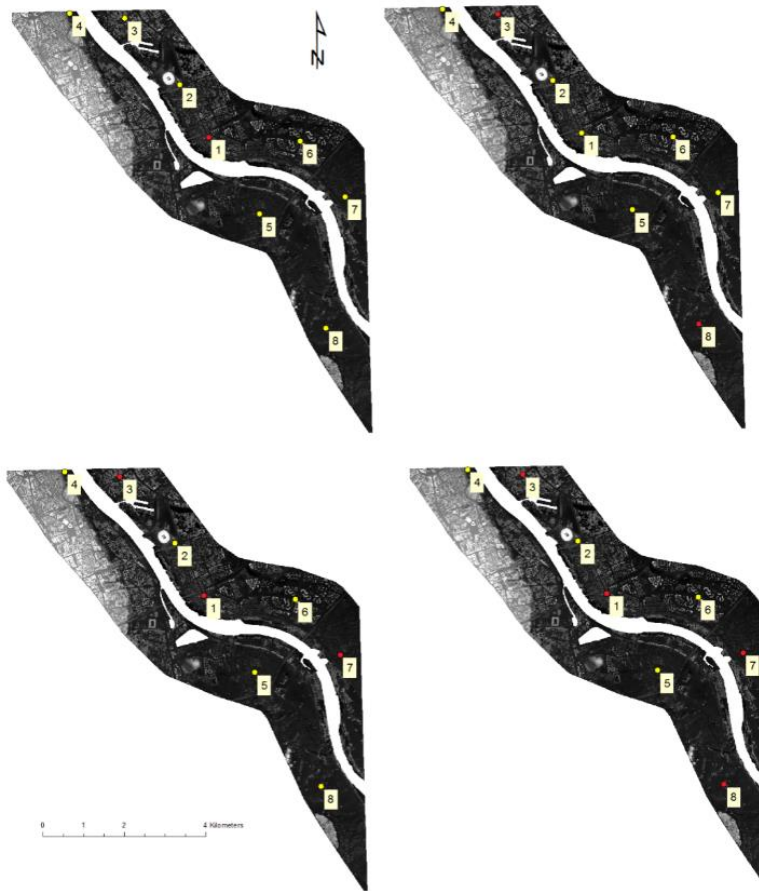
Pierwszy wariant „a” został wykonany przy domyślnych ustawieniach oprogramowania. Kolejne ustawiano tak, aby porównując je można było ustalić, które parametry i na jakim poziomie są wystarczające. Wyniki wariantu „a” pokazują, że domyślne parametry rozdzielczości wynikowego NMPT wcale nie są najlepsze, na co wskazuje duża wartość odchylenia standardowego ukazująca większe odchyłki dla fotopunktów kontrolnych. Lepsze wyniki uzyskano dla NMPT o rozdzielczości bardziej zbliżonej do gęstości uzyskiwanej chmury punktów („b”-„h”). Porównanie wariantu „b”, „f”, „h” wykazało, że parametr wygładzania NMPT przy danych o takiej rozdzielczości nie ma większego wpływu na końcowy wynik orientacji na fotopunktach (obszary płaskie). Również parametr gęstości dopasowania przy wyborze od 1 do 2 pikseli wykazał niewielki wpływ wartości tego parametru na rozrzut wartości statystyk dla chmur punktów. Najlepsze rezultaty uzyskano dla wariantu „e”, który związany był dużą rozdzielczością wynikowego NMPT.

W analizie wizualnej dostrzeżono również typowe dla dopasowania obrazów błędy chmury punktów na brzegach opracowania oraz powierzchniach wody (Rys. 3.).



Rys. 3. Przykładowe chmury punktów w różnych widokach: widok ortogonalny (a) i izometryczny (b) (obszar Pragi Południe)

Fig. 3 Example point clouds in different view: orthogonal (a) and isometric (b) (Praga Południe district)



Rys. 4. Wybór liczby i rozmieszczenie fotopunktów w wariantach analizy ich wpływu z 1, 2, 3, 4 fotopunktami oznaczonymi kolorem czerwonym; pozostałe fotopunkty kontrolne w kolorze żółtym
Fig. 4 Selection of number and location of control points in variants of analysis of their influence with using 1, 2, 3, 4 control points marked in red; rest of check points marked in yellow

Tabela 2. Porównanie dokładności orientacji w analizie wpływu liczby fotopunktów
Table 2. Comparison of orientation accuracy in analysis of control points number influence

wariant	Fotopunkty (liczba)	Punkt Z (nr) [m]	Punkt z NMPT [m]	dZ [m]	RMS fotopunkty/punkty kontrolne [m]	Oszacowana dokładność wewnętrzna [m]
1	Fotopunkty 1	83.304 (1)	83.117	0.187	0.187	0.189
	Kontrolne 7	86.388 (3)	85.579	0.809	0.485	
		83.947 (7)	83.463	0.484		
		84.310 (8)	83.660	0.650		
		85.255 (2)	85.239	0.016		
		84.705 (4)	84.235	0.470		
		84.234 (5)	84.073	0.161		
83.303 (6)	82.768	0.535				
2	Fotopunkty 2	86.388 (3)	85.759	0.629	0.506	0.182
	Kontrolne 6	84.310 (8)	84.181	0.129	0.210	
		83.304 (1)	83.304	-0.167		
		83.947 (7)	83.947	-0.327		
		85.255 (2)	85.255	0.033		
		84.705 (4)	84.705	-0.145		
		84.234 (5)	84.234	0.166		
83.303 (6)	83.303	-0.285				
3	Fotopunkty 3	83.304 (1)	83.554	-0.250	0.018	0.191
	Kontrolne 5	83.947 (7)	86.388	0.236	0.282	
		86.388 (3)	83.947	-0.024		
		85.255 (2)	85.255	0.499		
		84.705 (4)	84.705	-0.013		
		84.234 (5)	84.234	0.361		
83.303 (6)	83.303	-0.064				
84.310 (8)	84.310	-0.129				
4	Fotopunkty 4	83.304 (1)	83.529	-0.224	0.215	0.183
	Kontrolne 4	86.388 (3)	86.281	0.106	0.255	
		83.947 (7)	84.056	-0.109		
		84.310 (8)	84.494	-0.184		
		85.255 (2)	85.805	-0.550		
		84.705 (4)	84.731	-0.026		
		84.234 (5)	84.564	-0.330		
83.303 (6)	83.343	-0.040				

3.2. Analiza wpływu doboru liczby fotopunktów na orientację sceny satelitarnej

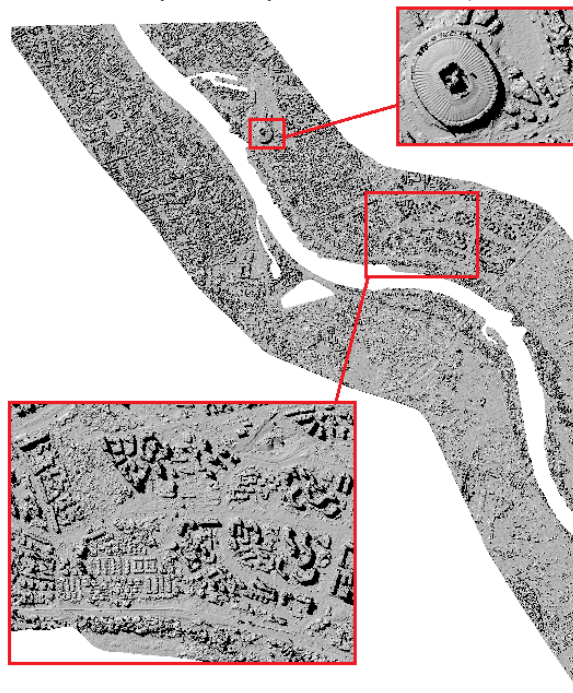
W dalszej analizie wybrany wariant podlegał różnemu doborowi wykorzystanych do orientacji fotopunktów. Stworzono 4 kolejne warianty (1-4) z użyciem jednego, dwóch, trzech oraz czterech fotopunktów. W pierwszym wariantcie pomierzono fotopunkt w środku sceny zaznaczony na czerwono na rysunku 4a. Punkty żółte natomiast stanowiły punkty kontrolne modelu. W momencie dodania punktu w projekcie, należało wykonać pomiar tego punktu na obu zdjęciach w aplikacji. Rysunek 4 przedstawia rozmieszczenie fotopunktu w 4 wariantach z różnym doбором liczby i rozmieszczenia fotopunktów. W wariantcie 2 zadano,

aby dwa fotopunkty były rozmieszczone w dwóch krańcach scen satelitarnych. Analogicznie postąpiono w wariancie 3 i 4.

Tabela 2 dotyczy dokładności orientacji zewnętrznej zdjęć satelitarnych. Wartość błędu RMS dla punktów kontrolnych przy wykorzystaniu odpowiednio jednego, dwóch, trzech i czterech fotopunktów wynosiła odpowiednio: 0.485, 0.210, 0.282 i 0.255 m. Uznać można, że już rozwiązanie z 2 fotopunktami dało maksymalny poziom dokładności orientacji scen, lecz uwagę jeszcze zwraca duża wartość pojedynczej odchyłki na jednym z nich, co utwierdza, że przynajmniej trzeci punkt powinien być jednak zastosowany. Przy większej liczbie fotopunktów błędy orientowania rozkładają się na wszystkie fotopunkty. Odchyłki orientacji na punktach są dużo większe niż w przypadku wariantu z jednym fotopunktem. Jest to naturalne, ale pamiętać należy, że GSD sceny satelitarnej wynosi 0.5 m (0.7 m), więc rezultaty na tym poziomie we wszystkich wariantach dają już dokładność na poziomie jednego piksela, co typowe w fotogrametrii.

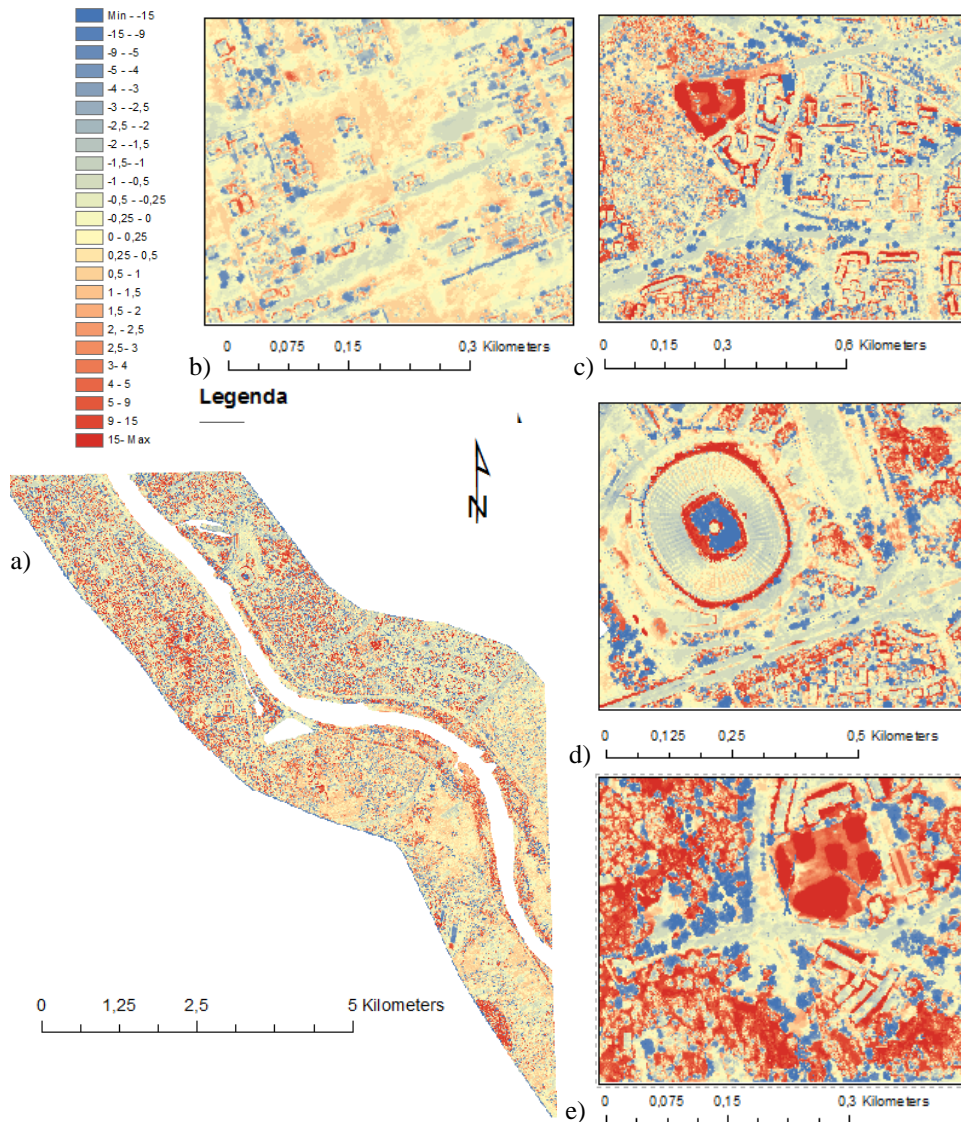
3.3. Analiza NMPT z dopasowania obrazów satelitarnych względem danych LIDAR

Na rysunku 5 pokazano wynikowy model w postaci cieniowanej dla obszaru opracowania. Jak widać dużo elementów topografii zostało wyraźnie zwizualizowanych za pomocą modelu wysokościowego. Dobrze zostały ukazane wysokie budynki, można dostrzec też niższą zabudowę jednorodzinną czy obszary pokryte przez roślinność. Widoczne wcześniej błędy na powierzchniach wodnych zostały manualnie usunięte.



Rys. 5. Model cieniowany stworzony na podstawie NMPT ze scen satelitarnych Pleiades
Fig. 5. Hillshade DSM generated from Pleiades satellite scenes

Wykonane ze scen satelitarnych NMPT porównano z modelem z lotniczego skanowania laserowego również za pomocą przestrzennej wizualizacji różnic wysokości (Rys. 6).



Rys. 6. Porównanie NMPT z obrazowania Pleiades z NMPT z danych LIDAR
Fig. 6. Comparison of DSM based on Pleiades satellites scenes and LIDAR-based DSM

Jak widać z powyższej ilustracji zastosowanie już jednego fotopunktu pozwoliło na zniwelowanie błędu odległości geoidy od elipsoidy. Różnica na większości obszaru modelu terenu mieści się w przedziale ± 1 m. Największe różnice zarejestrowano w miejscach gęstych zadrzewień i zakrzewień, oraz przy konturach budynków (Rys. 6c). Jest to spowodowane

z pewnością dużo większą szczegółowością (gęstością) danych z lotniczego skanowania laserowego, a również jego penetracją w głąb roślinności. Spora liczba punktów przechodzi między koronami drzew zaś algorytm generujący chmurę na podstawie zdjęć bierze pod uwagę mocno uproszczony (zgeneralizowany) i wygładzony ich kształt. Znaczenie może mieć także różnica z racji terminu pozyskania danych. Stereopara satelitarna pozyskana została ponad rok później, co mogło mieć wpływ na zasięg roślinności. Różnica czasowa wpłynęła także na zmiany dla zabudowań. Powstały nowe budynki, które fizycznie nie mogły istnieć na modelu z wcześniejszych danych (Rys. 6c, 6e). Poza dokładnością danych wejściowych na błędy przy konturach bloków mieszkalnych miały wpływ martwe pola. Satelita Pleiades 1B wykonał obydwa zdjęcia znajdując się na południe od Warszawy, przez co proces dopasowania obrazów nie dostarczył informacji do stworzenia punktów od strony północnej budynków. Jest to w szczególności widoczne przy wyższych zabudowaniach. Martwe pola pojawiają się też na Śródmieściu, gdzie zabudowa jest gęstsza i odległości między budynkami są dużo mniejsze niż w innych dzielnicach. Można by ich uniknąć używając danych w postaci tri-stereo (triplet scen). Wtedy miejsca niewidoczne z dwóch położenia satelity mogłyby być uzupełnione przez trzecie zobrazowanie, które tworzyłoby dopasowanie z jedną z pozostałych scen. Pewne błędy powstały też z przypadkowych przyczyn, co dobrze obrazuje ilustracja na rysunku 6d. Podczas nalotu LIDAR dach Stadionu Narodowego był bowiem zamknięty, zaś przy wykonywaniu zdjęć VHRS był otwarty. Z tego powodu różnica w tym miejscu wyniosła aż ok. 40 m. W całym modelu zauważalny też jest wpływ dokładności sytuacyjnej modelu - niewielkie błędy sytuacyjne przy wysokich budynkach widoczne są w zarejestrowaniu różnic wysokości o przeciwnych znakach po obu stronach budynku.

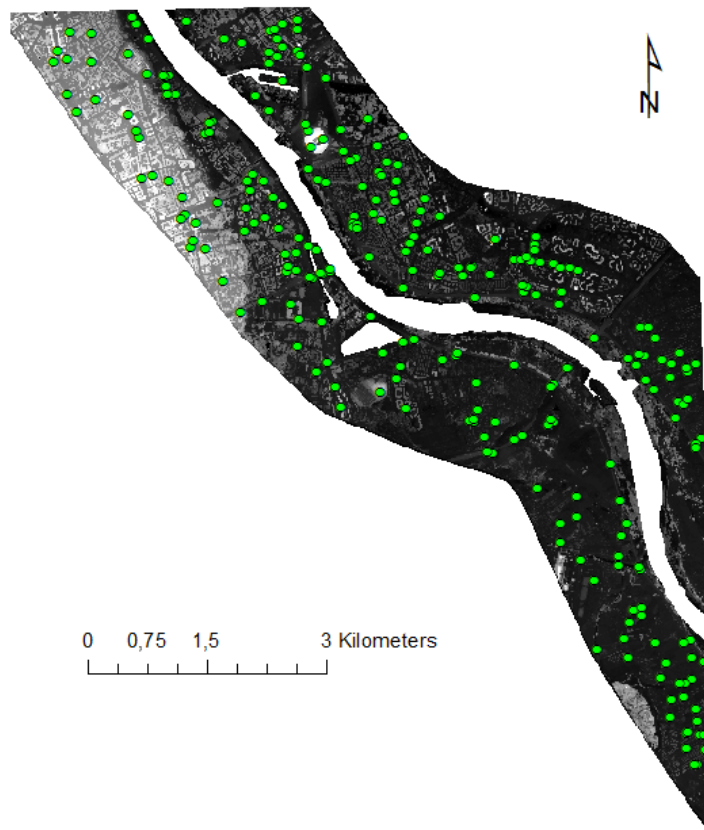
W tabeli 3 zawarto informacje statystyczne z porównania modeli wysokościowych. Wartość średnia różnic wysokości w zależności od wariantu liczby fotopunktów wynosiła od 0.20 do 0.83 m. Wartości te między kolejnymi opcjami modelu ze scen a NMPT z danych LIDAR systematycznie rosły, lecz nadal były na poziomie około jednego GSD. Wartości odchylenia standardowego utrzymywały się natomiast na stałym poziomie 5.54-5.62 m, co oznacza, że geometria samej chmury nie zmieniała się pomimo dodawania fotopunktów. Statystyki te oczywiście zawiązują błędy modelu ze scen satelitarnych ze względu na wspomniane już błędy pojawiające się przy zabudowie (martwe pola, dokładność pozioma) i roślinności (szczegółowość danych referencyjnych i aktywna technologia pozyskania danych referencyjnych - LIDAR). Podjęto zatem decyzje o wykonaniu ostatecznej kontroli na dużej liczbie punktów kontrolnych znajdujących się na obszarach płaskich w odkrytym terenie, dla których wspomniane błędy miałyby marginalny wpływ. Pozwoliłoby to wskazać maksymalne możliwości dokładnościowe dla danych VHRS, którymi dysponowano przy tworzeniu NMPT.

Tabela 3. Parametry statystyczne porównania DSM z danych satelitarnych i LIDAR
Table 3. Statistical parameters in comparison of DSM from satellite scenes and LIDAR data

	Wartość średnia różnic wysokości modeli NMPT [m]	Odchylenie standardowe różnic wysokości [m]
1 fotopunkt	0.20	5.54
2 fotopunkty	0.37	5.59
3 fotopunkty	0.77	5.62
4 fotopunkty	0.83	5.54

3.4. Analiza numeryczna dokładności NMPT na płaskich powierzchniach

Różnice między modelami wysokościowymi z LIDAR i ze zdjęć VHRS, jak ukazano w poprzednim podrozdziale, miejscami są bardzo znaczące. Przy każdym wariancie analizy wpływu fotopunktów, odchylenie standardowe różnic wysokości liczone dla całego obszaru modelu wynosiło ok. 5-6 m, mimo że średnia różnica wysokości wynosiła między 0.20 a 0.83 m. Postanowiono więc przeprowadzić punktową analizę dokładności. Wyznaczono 214 punktów równomiernie rozłożonych na całym terenie. Były to pikiety umieszczane na płaskim terenie, na gruncie jak i na płaskich dachach budynków. Dzięki właśnie tak rozmieszczonych punktom można było otrzymać informację na temat dokładności modelu w miejscach, dla których teoretycznie wygenerowane punkty w dopasowaniu obrazów mają najlepszą dokładność. Rozmieszczenie punktów ukazano na rysunku 7.



Rys. 7. Referencyjne punkty kontrolne do analizy dokładności NMPT w obszarach odkrytych
Fig. 7 Reference check points for analysis of DSM accuracy in uncovered areas

Wysokość z NMPT stworzonego z danych VHRS porównano z wysokością z NMPT z danych LIDAR. Wyniki statystyczne tego porównania zestawiono w tabeli 4. Zauważyć można, że systematyczny wzrost wartości średniej różnicy wysokości widoczny w wariantach z użyciem coraz większej liczby fotopunktów jest zaobserwowany również i w tej analizie. Jest on jednak na poziomie poniżej wielkości terenowej piksela zobrazowania i raczej świadczy o przypadkowym błędzie orientacji przy odpowiednio dobranej konfiguracji fotopunktów do orientacji. Warty zwrócenia uwagi są natomiast odchylenia standardowe różnic wysokości, które są w tej analizie na poziomie od 0.44 do 0.53 m oraz błędy średnie wysokościowe RMS wynoszące w zależności od wariantu od 0.48 do 0.63 m. Uznać można zatem, że dokładność modelu wysokościowego NMPT powstałego z danych VHRS jest możliwa do uzyskania na poziomie 0.5 m przy zastosowaniu przynajmniej 2-3 fotopunktów w orientacji scen.

Tabela 4. Parametry statystyczne analizy dokładności NMPT w obszarach odkrytych
Table 4. Statistical parameters of analysis of DSM accuracy in uncovered areas

	1 Fotopunkt	2 Fotopunkty	3 Fotopunkty	4 Fotopunkty
Liczba wykorzystanych punktów	214	214	214	214
Średnia wartość błędu[m]	-0.353	-0.084	0.247	0.201
Odchylenie standardowe [m]	0.526	0.471	0.439	0.460
RMS [m]	0.632	0.477	0.503	0.501

4. DYSKUSJA I WNIOSKI

W przedstawionym eksperymencie stworzono numeryczny model pokrycia terenu na podstawie satelitarnych zdjęć stereoskopowych bardzo wysokiej rozdzielczości z systemu Pleiades. Wykonane modele wysokościowe wygenerowano korzystając z różnych ustawień i parametrów dostępnych w oprogramowaniu Trimble Inpho, aby sprawdzić, jaki jest ich wpływ na proces i wybrać najodpowiedniejsze.

Modele wysokościowe wykonano także przy różnej georeferencji z użyciem różnej liczby fotopunktów (bez fotopunktów oraz z jednym, dwoma, trzema i czterema, fotopunktami), aby sprawdzić wpływ osnowy terenowej na jakość georeferencji. Rezultaty porównano z modelami wysokościowymi stworzonymi na podstawie lotniczego skanowania laserowego. Po wykonaniu analiz można stwierdzić, iż przy tworzeniu NMPT ze zdjęć satelitarnych trzeba wykorzystać dwa-trzy fotopunkty do prawidłowego nadania georeferencji obrazom satelitarnym. Podczas pierwszej orientacji zdjęć z wykorzystaniem współczynników RPC, modele wysokościowe posiadały wysokości w układzie wysokości elipsoidalnych, co przy braku znajomości odstępu geoidy od elipsoidy może powodować problemy. Jeden fotopunkt nie wystarczył także na orientację i utworzenie chmury punktów dobrze pokrywającej się z chmurą ze skanowania laserowego. Wnioski te potwierdzają się z tymi zawartymi w rozprawie doktorskiej Różyckiego (2014).

Celem dodatkowym pracy było sprawdzenie, czy stereoskopowe zobrazowania satelitarne mogą konkurować z danymi lotniczymi przy generowaniu modeli

wysokościowych. Różnice pomiędzy numerycznymi modelami pokrycia terenu stworzonymi ze stereopary zdjęć satelitarnych i z lotniczego skanowania laserowego są znaczące, co głównie związane z różną rozdzielczością przestrzenną obydwu zestawów danych. Zastosowanie mniejszego oczka NMPT przy generowaniu modelu z danych satelitarnych nie daje jednak lepszego rezultatu z uwagi na terenową wielkość piksela scen VHRS. Gęste dopasowanie obrazów może jedynie dostarczyć chmurę punktów, w której jeden punkt odpowiada jednemu pikselowi. Najmniejsze dokładności NMPT obserwować można na obszarach bujnej roślinności i w okolicy budynków. Ostatecznie udało się stworzyć NMPT, który w większości obszarów nie odbiega dla terenów odkrytych od modelu ze skanowania laserowego więcej niż 1 m. W analizie dokładnościowej na obszarach odkrytych uzyskano dokładność wysokościową modelu na poziomie 0.5 m, co można uznać za wartość graniczną dokładności wysokościowej NMPT (porównywalną z wielkością GSD). Współczesne prace, w których pracowano na danych VHRS z najnowszymi systemami satelitarnymi o najwyższej rozdzielczości przestrzennej zobrazowań ukazują zbliżone wyniki dokładnościowe. Rupnik *et al.* (2018) działając na danych z Pleiades i WorldView 3 w różnych konfiguracjach (4 triplety z jednej orbity, 5 tripletów z dwóch orbit, 9 tripletów, 13 tripletów) uzyskała względem danych LIDAR (po odrzuceniu obserwacji odstających wynoszących ok. 8-10%) średnią wartość różnic wysokości na poziomie 0.08 – 0.14 m z odchyleniem standardowym 0.89-1.00 m. Alganci *et al.* (2018) tworząc NMPT z tripletów scen SPOT 6 i Pleiades uzyskał błąd średni wysokości RMS dla NMPT na poziomie 1.57 m dla Pleiades i 2.26 m dla SPOT 6. Nie stosował on jednak usuwania błędów odstających jak w pracy Rupnik *et al.* (2018). Ghuffar (2018) dla NMPT z PlanetScope o rozdzielczości przestrzennej 3-4 m otrzymał dla ekstremalnie różnorodnych (często górzystych) obszarów wartości od 4 do 8 metrów.

Wyniki te zatem odpowiadają dokładności wysokościowej opracowań fotogrametrycznych na poziomie 1-2 wielkości terenowej piksela zobrazowania. Możliwe jest zatem uzyskanie takiej dokładności NMPT ze scen satelitarnych VHRS, co potwierdza eksperyment wykonany w ramach niniejszej pracy, jak i literatura w ostatnio publikowanych pracach z zakresu dopasowania obrazów scen VHRS. Wynikowy model wysokościowy nie spełnia jednak warunków dokładnościowych stawianych modelowi z danych LIDAR (kilkanaście centymetrów). Dla wielu zastosowań o mniejszych wymaganiach dokładnościowych (modelowanie 3D na niższych poziomach szczegółowości, analizy przestrzenne np. analizy przewietrzenia, akustyczne) lub w terenie nieskomplikowanym będzie to jednak dokładność wystarczająca. Szczegółowość modeli wysokościowych z danych VHRS oraz błędy związane z martwymi polami w przypadku niewielkiej liczby scen satelitarnych wziętych do dopasowania obrazów utrudnić mogą także zastosowanie tego rodzaju danych w terenach zurbanizowanych.

LITERATURA

Alganci U., Besol B., Sertel E., 2018. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models, ISPRS Journal of Geo-information, 7, 114.

Bakuła K., Stępnik M., Kurczyński Z., 2016. Influence of Elevation Data Source on 2D Hydraulic Modelling. *Acta Geophysica* 64, 1176-1192.

- Biegała T., Preuss R., 2009. Ocena jakości NMPT tworzonego metodą dopasowania cyfrowych zdjęć lotniczych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 25-34.
- Dąbrowski R., Fedorowicz-Jackowski W., Kędzierski M., Różycki S., Walczykowski P., Wolniewicz W., Zych, J., 2006. Ocena dokładności generowania NMP z wykorzystaniem Cartosat-1. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 16.
- Dominik W., 2014. Porównanie właściwości chmury punktów wygenerowanej metodą dopasowania obrazów zdjęć lotniczych z danymi z lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, 53-66.
- Ghuffar, S., 2018. DEM Generation from Multi Satellite PlanetScope Imagery. *Remote Sensing*, 10, 1462.
- Hejmanowska B., Borowiec N., Badurska M., 2008. Przetwarzanie lotniczych danych lidarowych dla potrzeb generowania NMT i NMPT. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 151-161.
- Koza P., 2006. Orientacja obrazów stereo Ikonos oraz automatyczny pomiar modeli wysokościowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 16, 351-359.
- Kubalska J. L., Preuss R. 2013. Dokładność NMPT tworzonego metodą automatycznego dopasowania cyfrowych zdjęć lotniczych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, wydanie specjalne: Monografia „Geodezyjne Technologie Pomiarowe”, 47-58.
- Kurczyński Z., 2013. Lotnicze i Satelitarne obrazowanie Ziemi. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Kurczyński Z, Bakula K., 2013. Generowanie referencyjnego numerycznego terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, wydanie specjalne: Monografia „Geodezyjne Technologie Pomiarowe”, 59-68.
- Lewiński S., Ewiak I., 2004. Wstępna ocena przydatności zdjęć satelitarnych ASTER w teledetekcji i fotogrametrii. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 14.
- Różycki S., 2014. Badanie wpływu danych początkowych na dokładność georeferencji bloku obrazów satelitarnych o dużej rozdzielczości przestrzennej. Rozprawa Doktorska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Rupnik E., Pierrot-Deseilligny M., Delorme A, 2018. 3D reconstruction from multi-view VHR-satellite images in MicMac. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139, 201–211.
- Wyczałek I., Królewicz S., Wyczałek E., 2010. Ocena i wstępna analiza 8-kanalowego obrazu bardzo wysokiej rozdzielczości z satelity WorldView-2. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 21, 471-480.

POSSIBILITIES OF GENERATING DIGITAL SURFACE MODEL FROM STEREOPAIRS OF VHRS SATELLITE IMAGES

KEY WORDS: DSM, stereo-pair, satellite imagery, image matching

Summary

The aim of this work was to show the possibility of generating digital surface models on the basis of satellite stereo-pair. Test area of experiment was the central part of Warsaw. The results were compared with a DSM based on the airborne laser scanning (LIDAR). The stereo-pair was collected with very high resolution satellite system Pleiades and LIDAR data was acquired within the ISOK project. In the experiment: the influence of dense image matching the parameters was analysed, impact of control points on the correctness of scenes georeferencing pre-orientated with RPC coefficients was verified, the accuracy of DSM was assessed including outliers resulted in lower spatial resolution of satellite imagery and occluded areas. The experiment was processed in the Trimble Inpho software. The results confirmed the possibility of applying only 2-3 control points in order to obtain satisfactory results of scenes orientation and consequently DSM accuracy. In the analysis of elevation models their accuracy at the level of a single ground sample distance was achieved. For uncovered areas in case of 214 LIDAR-based control points vertical RMS was 50 cm.

Dane autorów / Authors details

dr inż. Krzysztof Bakula
e-mail: krzysztof.bakula@pw.edu.pl
telefon: 22 234 7694

inż. Wojciech Woźniak
e-mail: wozniak.wjtk@gmail.com

Przesłano / Submitted	21.12.2018
Zaakceptowano / Accepted	31.12.2018