

MOŻLIWOŚCI OPRACOWANIA FOTOGRAMETRYCZNEGO LOTNICZYCH ZDJĘĆ UKOŚNYCH

POSSIBILITIES OF PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING OF OBLIQUE AERIAL IMAGES

Wojciech Ostrowski

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

SŁOWA KLUCZOWE: lotnicze zdjęcia ukośne, orientacja, aerotriangulacja, dopasowanie obrazów, detekcja zmian, fasady

STRESZCZENIE: Lotnicze zdjęcia ukośne stają się coraz popularniejszym źródłem danych fotogrametrycznych, a liczba zamawiających je miast rośnie również w Polsce. Tego typu zobrazowania dostarczają znacznie więcej informacji niż typowe zdjęcia pionowe, ponadto wielu użytkowników postrzega je jako „bardziej naturalne”. Rosnące zainteresowanie takimi danymi widoczne jest również na poziomie urzędów centralnych odpowiedzialnych za tworzenie opracowań kartograficznych w wielu państwach europejskich.

Zdjęcia ukośne przez lata postrzegane były jako dane uzupełniające do lotniczego skaningu laserowego (ALS), uzupełnianie to ograniczało się w wielu wypadkach jedynie do wykorzystania zdjęć jako źródła tekstur dla modeli 3D powstających z danych ALS. Innym popularnym obszarem zastosowań było tworzenie przeglądarek zdjęć ukośnych, które w połączeniu z Numerycznym Modelem Terenu pozwalały na uproszczone pomiary wysokości obiektów na pojedynczym zdjęciu. Sytuacja ta zmienia się w ostatnich latach, gdy wraz z rozwojem technologii fotogrametrycznych możliwa stała się dokładna orientacja zdjęć ukośnych z wykorzystaniem automatycznej aerotriangulacji, a algorytmy służące do gęstego dopasowania obrazów przystosowane zostały do pracy z takimi danymi.

Niniejszy artykuł z zawiera przegląd opublikowanych w ostatnich latach wyników orientacji bloków zdjęć ukośnych, w szczególności porównano wyniki testów dotyczących metod orientacji zdjęć ukośnych przeprowadzonych przez EuroSDR i ISPRS z wynikami badań prowadzonymi na innych polach testowych. Przeprowadzone badania eksperymentalne skupione były na dwóch głównych aspektach, pierwszym była ocena dokładności odwzorowania geometrii fasad budynków z wykorzystaniem gęstego dopasowania obrazów w przypadku bloku zdjęć ukośnych, w którym ze względu na małe pokrycia fasada odfotografowana jest jedynie na pojedynczym modelu. Drugim z poruszonych tematów badań była próba wykorzystania zdjęć ukośnych do wykrywania zmian w obrębie fasad budynków co nie jest możliwe z wykorzystaniem innych danych pozyskiwanych z pułapu lotniczego.

1. WSTĘP

Zdjęcia ukośne (nachylone) są praktycznie równie starym źródłem informacji jak fotografia lotnicza – pierwsze takie zdjęcia wykonał w 1860 roku James W. Black dla miasta Boston w Stanach Zjednoczonych (Rupnik *et al.* 2014). Później (lata 1930-1940) wraz z rozwojem kamer wieloobiektywowych pozyskiwane zdjęcia nachylonych było popularne do

celów militarnych (wywiadowczych) zarówno specjalnie rozwijanymi w tym celu kamerami rozpoznawczymi jak i wychylonymi kamerami wielkoformatowymi (Petrie, 2009; Hobbie, 2010). Zdjęcia te nie były jednakże wykorzystywane do celów pomiarowych czy opracowywane fotogrametrycznie.

Zdjęcia ukośne powróciły, już w technologii cyfrowej, na początku XXI wieku, głównie za sprawą amerykańskiej firmy Pictometry, której partnerem na rynku europejskim była firma Blom, jednakże podobnie jak poprzednio zdjęcia te nie były stosowane bezpośrednio do celów pomiarowych. Pomimo realizacji projektów fotolotniczych na znaczną skalę (Karbo i Simmons, 2007) miały one jedynie służyć tworzeniu „widoków z lotu ptaka” w serwisach mapowych dla aglomeracji miejskich. Podkreślano, że zapewniają one bardziej naturalny – łatwiejszy do zrozumienia dla zwykłego człowieka – obraz miasta, a jednocześnie dzięki wykorzystaniu zdjęć wykonanych z wielu kierunków pozwalają lepiej (bardziej kompletnie) obejrzeć przestrzeń miasta niż klasyczne zdjęcia pionowe. Również na terenie Polski zdjęcia ukośne stają się coraz bardziej popularne, głównie za sprawą firmy MGGP Aero, która od 2011 wykonuje takie zdjęcia na potrzeby Polskich Miast.

Dopiero pod koniec pierwszej dekady XXI wieku pojawiły się pierwsze próby oceny jakie możliwości pomiarowe wiążą się ze zdjęciami ukośnymi (Lemmens, *et al.* 2007; Hohle, 2008), a otrzymane – metrowe dokładności znacznie ograniczały możliwości ich zastosowania. Głównym ograniczeniem były problemy ze skutecznym wykorzystaniem cyfrowych stacji fotogrametrycznych do aerotriangulacji (orientacji) zdjęć ukośnych (Jacobsen, 2008; Gerke i Nyaruhuma, 2009). W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki najnowszych badań dotyczących orientacji zdjęć ukośnych.

Rozdział 3 przedstawia wyniki wstępne dwóch eksperymentów dotyczących wykorzystania zdjęć ukośnych w przestrzeni miejskiej, pierwszym z nich jest ocena dokładności rekonstrukcji kształtu fasad z wykorzystaniem automatycznego dopasowania obrazów, uwzględniająca specyfikę (małe pokrycia pomiędzy zdjęciami) pozyskiwanych w Polsce zdjęć ukośnych. Drugi z eksperymentów dotyczy detekcji zmian w obrębie fasad. Ostatni rozdział zawiera dyskusję otrzymanych wyników w odniesieniu do innych badań oraz wnioski.

2. FOTOGRAMETRYCZNE OPRACOWANIE ZDJĘĆ UKOŚNYCH

Technologie fotogrametrii lotniczej przez lata były rozwijane i optymalizowane pod kątem wykorzystania do celów pomiarowych zdjęć pionowych (lub prawie pionowych), następstwem tej wąskiej specjalizacji było niedopasowanie tych metod do opracowania zdjęć ukośnych. Jednocześnie pierwsze, również wąskie sposoby wykorzystania zdjęć ukośnych ograniczały się do aspektów wizualnych i nie wywierały presji na tworzenie nowych metod.

2.1. Orientacja zdjęć ukośnych

Dokładność orientacji zdjęć ukośnych była jednym z kluczowych elementów ograniczających możliwość ich wykorzystania do celów pomiarowych (Hohle, 2008). Jak już wspomniano pierwsze próby przeprowadzenia orientacji bloków zdjęć ukośnych na fotogrametrycznych stacjach cyfrowych nie zakończyły się sukcesem (Jacobsen, 2008). Przyczyn tej sytuacji należy szukać w dwóch cechach bloków zdjęć ukośnych, pierwszą z nich jest nachylenie zdjęć czego następstwem jest, że odfotografowany obszar wygląda inaczej na każdym obrazie. Zmienne jest nie tylko GSD (ang. *Ground Sampling Distance* –

rozdzielczość terenowa zdjęcia) w obrębie zdjęcia ale również pojawiają się zniekształcenia obrazów o charakterze afinicznym, powoduje to, że klasyczne operatory służące przez lata do wyszukiwania punktów wiążących wykorzystywane w fotogrametrii stają się nieskuteczne. Drugim problemem jest znacznie większe zróżnicowanie elementów kątowych orientacji zewnętrznej co utrudnia proces obliczeniowy jak i znalezienie ich wartości przybliżonych, niezbędnych do wyrównania obserwacji metodą najmniejszych kwadratów.

W dalszej perspektywie doprowadziło to do powstania całego szeregu metod służących do orientacji zdjęć ukośnych, alternatywnych do jednoczesnego wyrównania wszystkich obserwacji poprzez aerotriangulację. Wiedemann i Moré (2012) wymieniając metody orientacji zdjęć ukośnych poza klasyczną aerotriangulacją wszystkich pozyskanych zobrażeń wymieniają następujące rozwiązania: łączenie zdjęć, aerotriangulacja wieloetapowa, orientacja względem ortofotomap i NMPT (Numeryczny Model Pokrycia Terenu). Na szczególną uwagę zasługuje aerotriangulacja wieloetapowa ponieważ to głównie to rozwiązanie było stosowane przez szereg lat w komercyjnych zastosowaniach.

Dopiero w ostatnich latach (Rupnik *et al.* 2013, Rupnik *at al.* 2014, Rupnik *at al.* 2015) możemy zaobserwować udane przykłady orientacji bloków zdjęć ukośnych w jednoetapowej aerotriangulacji, choć nadal, niektóre z proponowanych tam metod wiążą się z szeregiem ograniczeń, np. punkty wiążące były wyszukiwane tylko pomiędzy zdjęciami wykonanymi w tym samym kierunku i pionowymi, co zostało dokładniej przeanalizowane w pracy Rupnik *et al.* (2015).

Zwiększone zainteresowanie tą tematyką spowodowało, że EuroSDR i ISPRS ogłosiły otwartą analizę porównawczą (ang. *benchmark*) dotyczącą orientacji zdjęć ukośnych którego wyniki opublikowano w Gerke, *et al.* (2016). Dane, na których przeprowadzono te eksperymenty obejmowały blok zdjęć wykonanych kamerą IGI Pentacam, pokrycie pomiędzy kolejnymi zdjęciami i kolejnymi szeregami było symetryczne i wynosiło 80%. Rozdzielczość terenowa w centrum kadru zarówno zdjęć pionowych jak i ukośnych wynosiła 10 cm. Jednakże na potrzeby testów porównawczych udostępniono jedynie co drugie zdjęcie z co drugiego szeregu (pokrycia 60/60%) oraz obniżono dokładność pomiarów GPS/INS poprzez zaokrąglenie ich do wartości całkowitych. Celem testów porównawczych było zbadanie dokładności orientacji w zależności od konfiguracji bloku, osnowy oraz wykorzystanego oprogramowania, w tabeli 1 zestawiono wyniki dla różnych konfiguracji bloku oraz rozmieszczenia fotopunktów uzyskane w programie Pix4D.

Tabela 1. Zestawienie wyników uzyskanych w oprogramowaniu Pix4D podczas testów EuroSDR i ISPRS. Na podstawie: Gerke, *et al.* (2016).

Pokrycie [%]	Rozmieszczenie osnowy	GSD [cm]	RMSE dla punktów kontrolnych		
			X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
80/80	dobrze	10	7	4	10
80/80	złe	10	bd.	bd.	13
60/60	dobrze	10	bd.	bd.	16
60/60	złe	10	10	3	25

W tym samym roku opublikowano również szereg innych badań, towarzyszących (Jacobsen i Gerke, 2016) lub całkowicie niezależnych (Ostrowski i Bakuła, 2016; Moe, *et al.* 2016; Hu, *et al.* 2016; Xie, *et al.* 2016; Ostrowski, 2016) od testu EuroSDR i ISPRS, w których omawiano dokładność orientacji bloków zdjęć ukośnych. Dokładności uzyskane w ramach poszczególnych z tych publikacji zestawiono w tabeli 2. Autorzy większości z tych wyników korzystają z komercyjnego oprogramowania rozwijanych z myślą o fotogrametrii

bliskiego zasięgu czy opracowaniu danych z bezzałogowych statków powietrznych (ang. UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*). Wyjątkiem są publikacje Hu, *et al.* (2016), gdzie testowana jest alternatywna metoda wyszukiwania punktów wiążących, dostosowana do zdjęć ukośnych oraz Xie, *et al.* (2016), gdzie autorzy dodatkowo testują niesymetryczny model wagowania obserwacji na zdjęciach ukośnych, a testy te są prowadzone w autorskim oprogramowaniu. Istotną modyfikację wprowadzają również Jacobsen i Gerke, (2016), dodając parametry dodatkowe do procesu samokalibracji.

Tabela 2. Zestawienie charakterystyk dokładnościowych dla (wybranych) opublikowanych wyników orientacji zdjęć ukośnych.

Publikacja	Miasto	Pokrycie [%]	GSD [cm]	RMSE dla punktów kontrolnych		
				X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
Jacobsen i Gerke, 2016	Dortmund	60/60	10.5	16	19	36
	Zeche Zollern	80/80	10	6	6	81
Ostrowski i Bakula, 2016	Katowice	65/35	9	6	9	9
Moe, <i>et al.</i> 2016	Imst	75/60	6	3	3	6
Hu, <i>et al.</i> 2016	Jinyang	60/40	8	8	8	14
Xie, <i>et al.</i> 2016	Jinyang	60/40	8	6	6	9
	Zurich	70/50	6	8	14	16
Ostrowski, 2016	Katowice	65/35	9	5	4	4
	Katowice	60/40	10	4	4	5

3. EKSPERYMENT

Zdjęcia ukośne w odróżnieniu od zwykłych zdjęć lotniczych pozwalają na odwzorowanie fasad budynków, dlatego też oba eksperymenty, których wstępne wyniki zostaną zaprezentowane w tym rozdziale dotyczą fasad. Pierwszy z nich koncentruje się na dokładności geometrycznej chmury punktów utworzonych z wykorzystaniem automatycznego dopasowania obrazów – zdjęć ukośnych dla fasad budynków. Drugi przedstawia możliwości wykrywania zmian na fasadach z wykorzystaniem wieloczasowych zdjęć ukośnych, jako przykład obiektów zmieniających się na fasadach wykorzystano reklamy wielkopowierzchniowe.

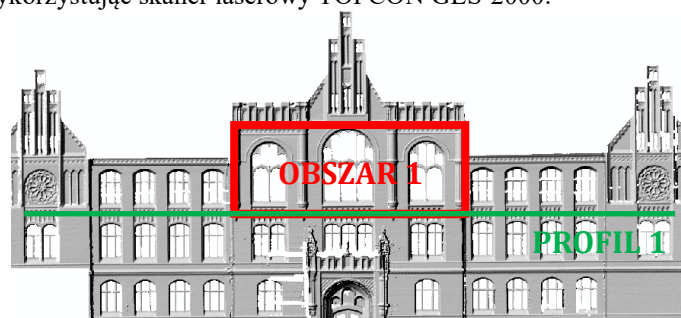
3.1. Rekonstrukcja kształtu fasad

Kwestia odwzorowania kształtu fasad jest szczególnie ważna w przypadku modelowania miast na wysokich poziomach szczegółowości (LOD3), gdzie zwykle dane fotogrametrii lotniczej (zdjęcia pionowe i lotniczy skaning laserowy) nie stanowią wystarczającego źródła danych. Jednym ze źródeł danych, które mogą być wykorzystane w tym celu są chmury punktów utworzone z automatycznego dopasowania zdjęć ukośnych. Tematyka ta wzbudziła już zainwestowanie społeczności międzynarodowej czego efektem było opracowanie przez Cavegn, *et al.* (2014) metodyki do testów porównawczych dotyczących dokładności jakie zdjęcia ukośne pozwalają uzyskać w zakresie odwzorowania fasad, jak również poświęcenie warsztatu EuroSDR/ISPRS w październiku 2015 roku w Southampton na prezentację wstępnych wyników.

Badania prowadzone przez EuroSDR/ISPRS, koncentrują się na wykorzystaniu bloków o symetrycznym pokryciu wynoszącym 60% lub 80% zarówno pomiędzy kolejnym zdjęciami w szeregu jak i pomiędzy zdjęciami z dwóch kolejnych szeregów. Takie pokrycia

gwarantują, że każdy fragment miasta będzie odfotografowany na więcej niż trzech zdjęciach. Ten rodzaj konfiguracji bloku sprzyja wykorzystaniu do pomiarów fotogrametrycznych metod automatycznego dopasowania obrazów, wykorzystujących więcej niż jeden stereogram takich jak zaimplementowany w Pix4D algorytm MVS (ang. *Multi-view stereo*) (Tola, *et al.* 2012). Jednakże w Polsce zdjęcia ukośne pozyskuje się ze znacznie mniejszymi pokryciami, wynoszącymi na ogół 60% pomiędzy kolejnymi zdjęciami w szeregu i od 30 do 40% pomiędzy kolejnymi szeregami. Taka konfiguracja bloku powoduje, że na odfotografowanym obszarze będą znajdować się obiekty widoczne tylko na dwóch zdjęciach. Co może negatywnie wpłynąć na wyniki automatycznego dopasowania obrazów.

Eksperymenty przeprowadzono wykorzystując pojedynczy stereogram, składający się z dwóch kolejnych zdjęć z kamery patrzącej w bok (pokrycie pomiędzy takimi zdjęciami wynosi w tym wypadku ok. 65%). Wykorzystany blok zdjęć obejmował centrum miasta Katowice, zdjęcia zostały wykonane w 2014 roku, a jako obiekt testowy wykorzystano fasadę Akademii Muzycznej im. Karola Szymanowskiego (rys. 1). Terenowa rozdzielczość w obszarze zdjęcia, na którym odfotografowano fasadę testową wynosiło ok. 6 cm. Dane referencyjne pozyskano z rozdzielnością mniejszą niż 1 cm (odległość pomiędzy kolejnymi punktami) wykorzystując skaner laserowy TOPCON GLS-2000.



Rys. 1. Fasada Akademii Muzycznej im. Karola Szymanowskiego w Katowicach, która została wykorzystana jako obiekt testowy. Model cieniowany utworzony na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego. Kolorem czerwonym oznaczono powierzchnie wykorzystaną do obliczeń charakterystyk dokładnościowy (Tab. 3), kolorem zielonym linię profilu przez fasadę (Rys. 3)

Orientację zdjęć wykonano w oprogramowaniu Pix4D zgodnie z metodyką opisaną w Ostrowski i Bakula (2016), uzyskane dokładności orientacji (oceniane na równomiernie rozmieszczonych punktach kontrolnych) wyniosły odpowiednio 5 cm, 4 cm i 4 cm w kierunkach wschodnim (X), północnym (Y) i wysokościowe (Z). Na potrzeby wykonania dopasowania obrazów w programie SURE z aplikacji Pix4D wyeksportowano zarówno elementy orientacji zewnętrznej jak i zdjęcia z usuniętym wpływem dystorsji radialnej i tangencjalnej.

Ekstrakcję chmury punktów wykonano w dwóch programach Pix4Dmapper i nFrames SURE. Pix4D (Strecha, *et al.* 2003; Tola, *et al.* 2012) wykorzystuje algorytm dopasowania obrazów MVS (ang. *Multi-view stereo*) wykorzystujący dopasowanie *Area Based* wzdłuż linii epipolarnych w obszarach o wymiarze 9×9 pikseli. Dopasowanie obrazów przeprowadzono w dwóch wariantach domyślnym gdzie dopasowanie jest przeprowadzone dla co 8 piksela oryginalnego zdjęcia (dalej oznaczany jako Pix4D II) i gęstego, które

powinno pozwolić na uzyskanie 16 razy większej liczby punktów, gdzie dopasowanie przeprowadzane jest dla każdego piksela oryginalnego obrazu (dalej oznaczany jako Pix4D I). Program SURE (Rothermel, *et al.* 2012), firmy nFrames, posiada zaimplementowany algorytm dopasowania obrazów wykorzystujący *Semi Global Matching*, w wersji umożliwiającej przetwarzanie zdjęć ukośnych, pozwalający na utworzenie chmury punktów o gęstości zbliżonej do GSD wejściowych zdjęć. Są to dwie powszechnie dziś wykorzystywane w fotogrametrii metody automatycznego gęstego dopasowania obrazów. Pozwalają one na utworzenie chmur punktów oraz modeli 3D i przeciwieństwie do metod wykorzystywanych w niektórych z innych programów (np. Trimble Inpho Match-T DSM) nie są ograniczone do tworzenia produktów 2.5D.

Porównania przeprowadzono analogicznie do metodyki zaproponowanej przez Cavegn, *et al.* (2014), tj. porównaniu podlegały tylko chmury punktów, jednakże po przekształceniu na modele rastrowe (2.5D). Dla każdej chmury punktów (SURE, Pix4D I, Pix4D II i referencyjny TLS) utworzono rastrowy model NMPT w płaszczyźnie fasady o rozdzielności odpowiadającej GSD (6 cm). Następnie utworzono rastrowe modele różnicowe pomiędzy NMPT z poszczególnych chmur punktów ze zdjęć ukośnych a modelem z naziemnego skaningu laserowego.

Modele różnicowe pomiędzy modelami utworzonymi na podstawie chmur punktów z dopasowania obrazów a modelem referencyjnym utworzonym z danych naziemnego skaningu laserowego przedstawiono na Rys. 2. Na jego podstawie można zauważyć że płaszczyzny poszczególnych elementów fasady wyznaczone są bez błędów systematycznych, a te widoczne są głównie na liniach załamania fasady (przy ryzalitach). W miejscach tych model z dopasowania obrazów jest bardziej wygładzony co potwierdzają również przekroje (rys. 3), inną istotną cechą mogą mieć wpływ na błędne odwzorowanie tych fragmentów może mieć rozkład martwych pól na zdjęciach z których utworzono chmury punktów.

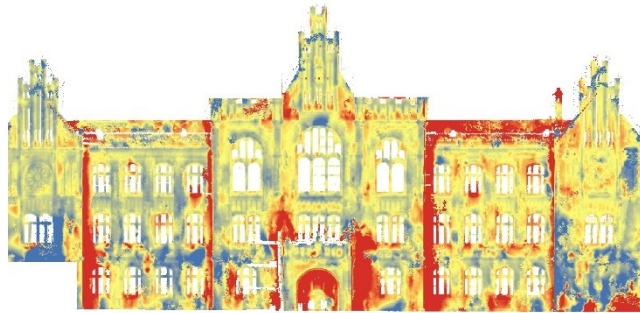
Dla wyznaczonego obszaru testowego (Rys. 1), na obszarze którego nie stwierdzono występowania błędów systematycznych, obliczono charakterystyki modeli różnicowych (Tab. 3), powierzchnia tego obszaru wynosiła 152 m². Analiza otrzymanych wartości pozwala stwierdzić, że zgodnie z wykorzystanymi technologiami dopasowania obrazów, chmura punktów z oprogramowania

Tabela 3. Charakterystyki dokładnościowe modeli różnicowych w obszarze 1.

	Średnia odległość między punktami	Średnia	Odchylenie standardowe
Pix4D I	0.10 m	-0.10 m	0.15 m
Pix4D II	0.38 m	-0.12 m	0.14 m
SURE	0.07 m	-0.19 m	0.15 m

SURE, wykorzystującego *Semi Global Matching* charakteryzuje się największą gęstością niż te z Pix4D, a średnia odległość pomiędzy kolejnymi punktami równa jest wartości GSD. Podobnie w przypadku obu wariantów Pix4D różnica pomiędzy gęstością punktów zbliżona jest do zakładanej (teoretycznej) szesnastokrotności. Jednocześnie wszystkie trzy chmury charakteryzują się podobnym szumem, na poziomie 2 GSD. Zauważalne jest również systematyczne przesunięcie chmury punktów z SURE, średnia

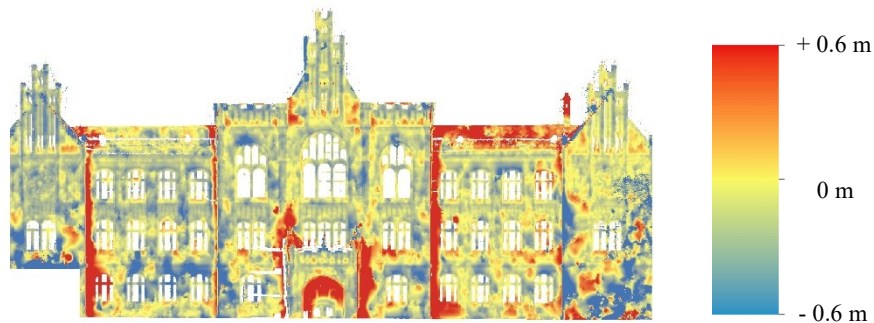
odległość pomiędzy modelem z SURE a danymi referencyjnymi przekracza ponad dwukrotnie wartości GSD i dokładności uzyskane podczas orientacji.



Model różnicowy: Pix4D I (maksymalna gęstość) i skaning naziemny



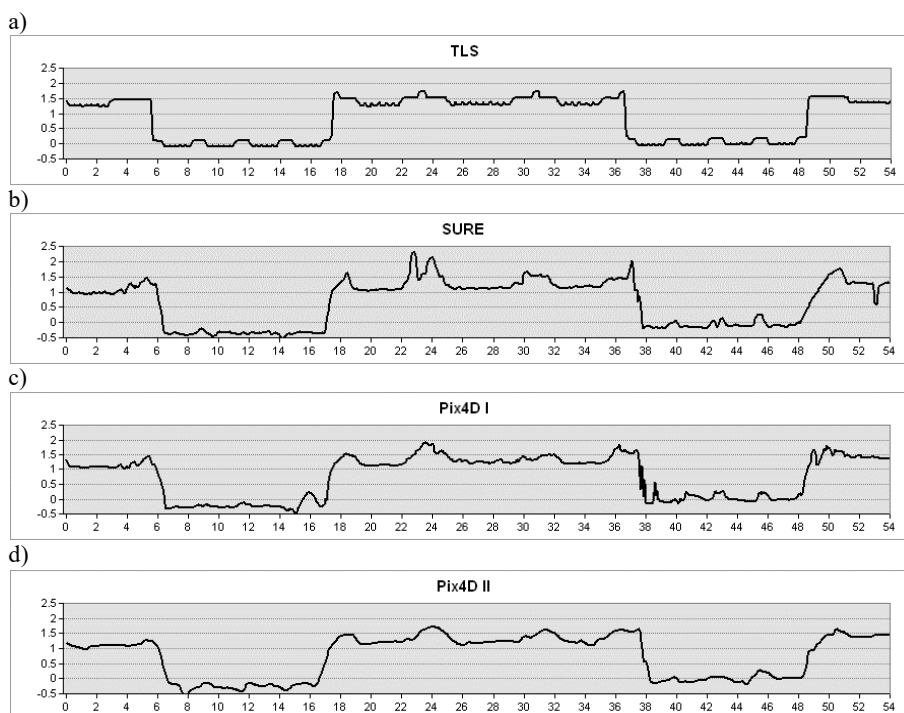
Model różnicowy: Pix4D II (domyślna gęstość) i skaning naziemny



Model różnicowy: SURE i skaning naziemny

Rys. 2. Modele różnicowe pomiędzy modelem fasady utworzonym z naziemnego skaningu laserowego a modelami utworzonymi na podstawie chmur punktów z dopasowania obrazów.

Ponadto porównanie profili (Rys. 3) pozwala stwierdzić iż w przypadku SURE mniejsze są błędy grube (pojedyncze punkty wystające przed fasadę), które mogły wpłynąć na wartość średniej różnicy odległości w przypadku modelu różnicowego Pix4D.



Rys. 3. Profile (lokalizacja patrz Rys. 1) przez model fasady utworzony z chmury punktów będącej wynikiem dopasowania obrazów w SURE (b) i dwóch wariantach ustawień w Pix4D (c, d) oraz profil referencyjny utworzony na podstawie modelu z naziemnego skaningu laserowego.

3.2. Detekcja zmian na fasadach

Zdjęcia ukośne pozwalają na rejestrację fasad, a dysponując zobrazowaniami z więcej niż z jednego okresu można podjąć próbę wykrywania zmian w szybko zmieniającej się przestrzeni miejskiej. Badania zaprezentowane w tym rozdziale są próbą wykorzystania automatycznych metod wykrywania zmian na fasadach budynków, ze względu na wstępny charakter przedstawianych wyników ograniczono się do stosunkowo prostych w detekcji obiektów tj. reklam wielkopowierzchniowych umieszczonych na fasadach budynków. Jednocześnie w związku z tzn. Ustawą Krajobrazową, która weszła w życie 11 września 2015 roku detekcją i monitoringiem tego typu obiektów mogą być zainteresowane samorządy miejskie, będące jednocześnie jednym z głównych zamawiających zdjęcia ukośne w Polsce.

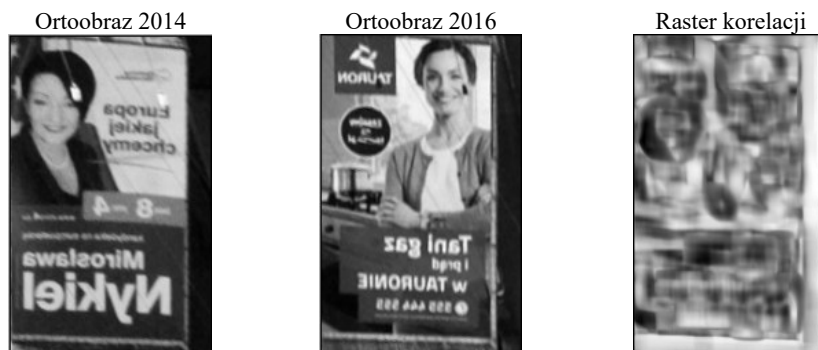
Wykrywanie zmian na zdjęciach ukośnych jest tematem nowym, doczasowo w literaturze można spotkać przykłady takich zastosowań w sytuacjach kryzysowych – Vetrivel, *et al.* (2016) proponują wykrywanie zmian na fasadach w celu określania zniszczeń po trzęsieniach ziemi.

Zaproponowana metodyka podobnie jak ta zaprezentowana przez Vetrivel, *et al.* (2016) opiera się na liczeniu korelacji pomiędzy wieloczasowymi ortoobrazami dla fasad. Ortoobrazy powstają poprzez rzutowanie na płaszczyznę fasady (eksperymenty prowadzono przy założeniu że fasada jest płaszczyzną) odpowiedniego fragmentu zdjęcia ukośnego.

Jednakże w przeciwieństwie do zaproponowanej przez Vetrivel, *et al.* (2016) metodyki wykorzystującej chmury punktów utworzone ze zdjęć ukośnych do określenia położenia płaszczyzn dla fragmentów fasady w prezentowanych badaniach współrzędne poziome dla danej fasady określano na podstawie Ewidencji Gruntów i Budynków a wysokość fasady była interpolowana z NMPT (utworzonego również ze zdjęć ukośnych), w ten sposób dla każdej fasady wyznaczane były współrzędne (X, Y, Z) czterech narożników. Takie podejście pozwala docelowo uprościć cały proces oraz pominąć czasochłonny etap rekonstrukcji 3D ze zdjęć ukośnych, ponieważ wykorzystany w eksperymencie NMPT ze zdjęć ukośnych może być łatwo zastąpiony danymi ALS, czy też za zbiór danych referencyjnych może posłużyć model miasta na poziomie szczegółowości LOD1 lub LOD2. Ponadto w przypadku pozyskiwanych w Polsce bloków zdjęć ukośnych (o stosunkowo małym pokryciu), wykorzystanie innych danych jako źródła informacji o położeniu płaszczyzn fasad, pozwala zminimalizować wpływ martwych pól – wystarczy, że porównywana fasada będzie widoczna przynajmniej na jednym zdjęciu.

Kolejnym etapem była identyfikacja zdjęć na których dana fasada powinna być w całości widoczna oraz wyznaczano współrzędne pikselowe jej narożników na poszczególnych zdjęciach. Ostatecznie wykonywano transformację afiniczną dla danego fragmentu zdjęcia tak by utworzyć z niego ortoobraz o zadanej rozdzielczości, na potrzeby tych eksperymentów rozdzielczość wszystkich ortoobrazów wynosiła 6.6 cm. Proces ten jest ideowo bliski tekstuowaniu modeli na poziomie LOD1.

Następnie pomiędzy ortoobrazami dla danej fasady liczonego współczynnik korelacji, proces ten był przeprowadzany w masce (oknie) o wymiarach 15×15 pikseli (1×1 m). Wartość współczynnika korelacji dla każdej z pozycji maski zapisywano w rastrze korelacji (Rys. 4) pozwalającym na zbadanie jego przestrzennego rozkładu w obrębie danej fasady.



Rys. 4. Przykład reklamy wielkopowierzchniowej na fasadzie budynku która uległa zmianie pomiędzy rokiem 2014-2016. Ortoobrazy utworzone z dwóch terminów, wraz z obrazem ilustrującym rozkład przestrzenny współczynnika korelacji, obszary ciemne odpowiadają małej wartości współczynnika korelacji, obszary jasne dużej.

Eksperyment przeprowadzono dla 13 fasad, dla których utworzono ortoobrazy z 59 zdjęć ukośnych. Współczynnik korelacji dla fasad (średnia z rastra korelacji) na których nie zarejestrowano zmian wynosił od 0.56 do 0.88, dla fasad na których stwierdzono zmiany (tj. zmianę treści reklamy, instalację nowej lub zdjęcie istniejącej) wynosił on od 0.15 do 0.42. Analiza otrzymanych wyników wykazała jednak szereg problemów, które sugerują że tak

uproszczona metoda detekcji zmian nie sprawdzi się w przypadku przestrzeni miejskiej, nawet w odniesieniu do reklam wielkopowierzchniowych.



Rys. 5. Przykład ilustrujący problemy z wykorzystaniem uproszczonego algorytmu wykorzystującego przyziemia budynków z EGiB. Ortoobrazy ze zdjęć z tego samego szeregu (terminu), wraz z obrazem ilustrującym rozkład przestrzenny współczynnika korelacji.

Eksperyment przeprowadzono dla 13 fasad, dla których utworzono ortoobrazy z 59 zdjęć ukośnych. Współczynnik korelacji dla fasad (średnia z rastra korelacji) na których nie zarejestrowano zmian wynosił od 0.56 do 0.88, dla fasad na których stwierdzono zmiany (tj. zmianę treści reklamy, instalację nowej lub zdjęcie istniejącej) wynosił on od 0.15 do 0.42. Analiza otrzymanych wyników wykazała jednak szereg problemów, które sugerują że tak uproszczona metoda detekcji zmian nie sprawdzi się w przypadku przestrzeni miejskiej, nawet w odniesieniu do reklam wielkopowierzchniowych.

Pierwszy z nich dotyczy wykorzystania przyziemi budynku z EGiB, które nie zawsze odpowiadają przebiegowi fasady na wyższych piętrach. Występują sytuacje jak w przypadku budynku na rys. 5, w których znaczna część fasady przebiega inaczej niż przyziemie (np. jest wysunięta do przodu), powoduje to systematyczne przesunięcia ortoobrazu dla fasady, których rozkład zmienia się w zależności od miejsca wykonania zdjęcia.

Wpływ ten można zminimalizować wybierając do porównania zdjęcia o najbardziej zbliżonym kącie rejestracji danej fasady. Możliwe jest również obejście tego problemu poprzez dodanie do procesu liczenia korelacji elementów dopasowywania obrazów.



Rys. 6. Przykład reklamy wielkopowierzchniowej, która nie zajmuje całej fasady budynku. Ortoobrazy utworzone przez rzutowanie zdjęć ukośnych z dwóch terminów na tą samą fasadę, wraz z obrazem ilustrującym rozkład przestrzenny współczynnika korelacji.

Drugim problemem dotyczący reklam (zmian), które nie obejmują całej fasady a jedynie jej część (rys. 6), w takim wypadku średni współczynnik korelacji dla całej fasady jest zawyżany ze względu na wstępowanie obszarów gdzie nie nastąpiła zmiana co w przypadku małych reklam może zaburzyć wyniki detekcji zmian. Implementacja tego

rozwiązania w odniesieniu do mniejszych obiektów nie może opierać się o średni współczynnik korelacji, musi dodatkowo uwzględniać lokalne zmiany w obrębie fasady. Rozwiązaniem tego problemu może wykonanie segmentacji obrazów a następnie wykrywanie zmian metodami klasyfikacji obiektowej.

4. DYSKUSJA I WNIOSKI

Zaprezentowane w tym artykule wyniki jak i przytoczone pozycje z literatury pozwalają na sformułowanie wniosku, że współcześnie wykorzystywane metody fotogrametryczne pozwalają na znacznie szersze wykorzystanie lotniczych zdjęć ukośnych, nie ograniczające się tylko do celów wizualizacji. Jest to możliwe głównie dzięki wykorzystaniu metod orientacji zdjęć, rozwijanych z myślą o fotogrametrii bliskiego zasięgu czy opracowaniu danych z bezzałogowych statków powietrznych (UAV). Jednocześnie należy podkreślić, iż bezpośrednia adaptacja tych metod jest dziś jednym z największych ograniczeń w opracowywaniu bloków lotniczych zdjęć ukośnych. Problemem w pierwszej kolejności jest liczba zdjęć w pojedynczym bloku zdjęć ukośnych, sięgająca na ogół dziesiątek tysięcy zdjęć, co powoduje, że praktycznie niemożliwe jest wykonanie aerotriangulacji bez podziału na podbloki na co uwagę zwracają Remondino *et al.* (2016), a jak pokazują badania Ostrowski i Bakuła (2016) podział taki może być zasady już w przypadku bloku liczącego 3000 zdjęć.

Szczególnego komentarza wymagają wyniki orientacji przedstawione w rozdziale 2. Widoczną różnicę pomiędzy dokładnościami orientacji uzyskanymi w ramach testów EuroSDR i ISPRS, gdzie dokładności na poziomie pojedynczego GSD udało się uzyskać tylko w przypadku wariantu z pokryciem 80/80% i przy dobrym rozmieszczeniu osnowy (Tab. 1), a innymi badaniami (Tab. 2), gdzie dokładności na poziomie pojedynczego GSD uzyskiwane są również przy znacznie mniejszych pokryciach, można to uzasadniać paroma czynnikami.

Autorzy testu porównawczego chcieli go uczynić jak najtrudniejszym, dlatego też nie tylko usunęli co drugi szereg i co drugie zdjęcie z bloku ale również obniżyli dokładność obserwacji GPS/INS. Dodatkowo dane udostępnione uczestnikom testu posiadały słabą konfigurację osnowy, fotopunkty rozmieszczone były w zewnętrznych częściach bloku a większość z nich była widoczna tylko na zdjęciach z pojedynczego kierunku. Ponadto w badaniach tych korzystano z naturalnych (nie stabilizowanych) fotopunktów. Wszystkie te czynniki powodują, że zestaw danych udostępnionych w teście EuroSDR i ISPRS daleki jest od klasycznych konfiguracji tego typu bloków. Ponadto wyniki uzyskane przez Jacobsen i Gerke (2016) pokazują, iż istotnym problemem przy takiej konfiguracji bloku jest proces samokalibracji – dodanie do aerotriangulacji parametrów dodatkowych nie tylko nie poprawiało uzyskanych wyników, a nawet znacznie je pogorszyło (spadek dokładności wysokościowej).

Wysoka, w porównaniu do wcześniej uzyskiwanych dokładność orientacji pozwala na wykorzystanie zdjęć ukośnych do odtwarzania geometrii fasad czy wykrywania zmian w ich obrębie. Dokładność rekonstrukcji geometrii fasad z wykorzystaniem chmur punktów będących rezultatem automatycznego dopasowania obrazów pozwalają stwierdzić że zarówno metody zaimplementowane w zwykłym oprogramowaniu komercyjnym (Pix4D i Agisoft PhotoScan) dedykowanym do fotogrametrii bliskiego zasięgu czy pracy ze zdjęciami z bezzałogowych statków powietrznych jak i wysoce specjalistycznym oprogramowaniu

SURE z zaimplementowaną metodą SGM pozwalają na uzyskanie podobnych wyników z lotniczych zdjęć ukośnych. Dokładności uzyskane z pojedynczego stereogramu są na poziomie 2-3 GSD, i są one gorsze o jedną wartość GSD od tych uzyskanych w przypadku wykorzystania większej liczby modeli przez (Cavegn, *et al.* 2014).

Jednocześnie należy podkreślić, że są to dokładności znacznie niższe niż te uzyskiwane z tych metod w przypadku zdjęć pionowych (Haala, 2013), co można tłumaczyć dwoma aspektami. Pierwszą przyczyną może być jakość kamery wykorzystanej do pozyskania zdjęć ukośnych, zdjęcia takie pozyskuje się kamerami średnioformatowymi o niższej jakości obrazu niż ma to miejsce w przypadku wielkoformatowych kamer fotogrametrycznych co też negatywnie odbija się na jakości chmury punktów otrzymanej z automatycznego dopasowania obrazów (Dominik, 2014). Nie bez znaczenia jest również skomplikowany charakter obiektu jakim jest fasada (Cavegn, *et al.* 2014), na którym występują różnicowania o rozmiarach pojedynczych pikseli, kiedy do weryfikacji dokładności automatycznego dopasowania obrazów pionowych wykorzystuje się na ogół duże płaskie obiekty jak np. dachy.

Wyniki uzyskane w odniesieniu do detekcji zmian w obrębie fasad pokazują, że dokładność orientacji zdjęć ukośnych pozwala na porównywanie tego typu danych wieloczasowych lotniczych zdjęć ukośnych na poziomie pojedynczych pikseli. Jednakże uzyskane wstępne wyniki pokazują, iż potrzebne są dalsze badania nad dopracowaniem metod porównywania tego typu obrazów.

PODZIĘKOWANIA

Autor pragnie podziękować Wydziałowi Geodezji Urzędu Miasta Katowice za udostępnienie danych niezbędnych do przeprowadzenia eksperymentów. Firmie MGGP Aero za dotychczasową współpracę w zakresie zdjęć ukośnych. Firmie TPI za udostępnienie skanera laserowego TOPCON GLS-2000 wykorzystanego do pomiarów referencyjnych dla fasad.

LITERATURA

Cavegn S., Haala N., Nebiker S., Rothermel M., Tutzauer, P. 2014. Benchmarking High Density Image Matching for Oblique Airborne Imagery. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3*, 45–52.

Dominik, W. 2014. Porównanie właściwości chmury punktów wygenerowanej metodą dopasowania obrazów zdjęć lotniczych z danymi z lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, 53–66.

Gerke M., Nyaruhuma A. P. 2009. Incorporating scene constraints into the triangulation of airborne oblique images. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(part 1-4-7/W5)

Gerke M., Nex F., Remondino F., Jacobsen K., Kremer J., Karel W., Hu H., Ostrowski W. 2016. Orientation of Oblique Airborne Image Sets - Experiences from the ISPRS/EUROSDR Benchmark on Multi-Platform Photogrammetry. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI (B1)*, 185–91.

Haala N. 2013. The Landscape of Dense Image Matching Algorithms EuroSDR Benchmark on Image Matching for DSM Computation. In *Photogrammetric Week '13*, edited by Dieter Fritsch, 271–84. Belin & Offenbach: Wichmann/VDE Verlag.

Hobbie D. 2010. *The development of photogrammetric instruments and methods at Carl Zeiss in Oberkochen*. München, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

- Höhle J. 2008. Photogrammetric measurements in oblique aerial images. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 1 (1), 7–14.
- Hu H., Ding Y., Zhu Q., Wu B., Xie L., Chen M. 2016. Stable Least-Squares Matching for Oblique Images Using Bound Constrained Optimization and a Robust Loss Function. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 118, 53–67.
- Jacobsen K. 2008. Geometry of vertical and oblique image combinations. In *Remote Sensing for a Changing Europe: Proceedings of the 28th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories*, Istanbul, Turkey.
- Jacobsen K., Gerke M. 2016. Sub-Camera Calibration of a Penta-Camera. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W4*, 10–12.
- Karbo N., Simmons G. 2007. Aerial imagery from different angles. *Professional Surveyor Magazine* 27, May 2007, 8–11.
- Lemmens M., Lemmen C., Wubbe M. 2007. Pictometry: Potentials for Land Administration. In *FIG Proceedings: 6th FIG Regional Conference 2007*, 1–13.
- Moe K, Toschi I., Poli D., Lago F., Schreiner C., Legat K., Remondino F. 2016. Changing The Production Pipeline – Use Of Oblique Aerial Cameras For Mapping Purposes. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI (B4)*, 631–37.
- Ostrowski W. 2016. Accuracy of Measurements in Oblique Aerial Images for Urban Environment. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W2 (October)*. Copernicus GmbH, 79–85.
- Petrie G. 2009. Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(2), 102–107.
- Remondino F., Toschi I., Gerke M., Nex F., Holland D., McGill A., Lopez J. T., Magarinos, A. 2016. Oblique aerial imagery for NMA – Some Best Practices. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI (B4)*, 639–45.
- Rothermel M., Wenzel. K. 2012. *SURE - Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery*. Proceedings LC3D Workshop, 1–21.
- Rupnik E., Nex F., Remondino F. 2013. Automatic Orientation of Large Blocks of Oblique Images. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL*, 21–24.
- Rupnik E., Nex F., Remondino F. 2014. Oblique multi-camera systems orientation and dense matching issues. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W1, 107–114.
- Rupnik E., Nex F., Toschi I., Remondino F. 2015. Aerial Multi-Camera Systems: Accuracy and Block Triangulation Issues. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 101 (60), 233–46.
- Strecha C., Tuytelaars T., Van Gool L. 2003. *Dense Matching of Multiple Wide-Baseline Views*. Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision, vol.2., 1194–1201
- Tola, E, C. Strecha, and P. Fua. 2012. *Efficient Large-Scale Multi-View Stereo for Ultra High-Resolution Image Sets*. Machine Vision and Applications, 23, 903–920.
- Ostrowski W., Bakula K. 2016. Towards Efficiency of Oblique Images Orientation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL, 10–12.
- Vetrivel A., Duarte D., Nex, F., Gerke M., Kerle N., Vosselman G. 2016. Potential of Multi-Temporal Oblique Airborne Imagery for Structural Damage Assessment. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* III, 12–19.
- Wiedemann A., Moré J. 2012. Orientation Strategies for Aerial Oblique Images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1, 185–189.
- Xie L., Hu H., Wang J., Zhu Q., Chen M. 2016. An Asymmetric Re-Weighting Method for the Precision Combined Bundle Adjustment of Aerial Oblique Images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 117, 92–107

POSSIBILITIES OF PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING OF OBLIQUE AERIAL IMAGES

KEY WORDS: oblique aerial images, orientation, aerotriangulation, image matching, change detection, façades

Summary

Oblique aerial images are becoming an increasingly popular source of photogrammetric data, and they are being acquired by more and more municipalities in Poland also. This type of imagery can provide much more information than typical vertical photographs, and many users actually see them as "more natural." The growing interest in such data is becoming apparent even at the level of national mapping agencies responsible for the development of cartographic materials in many European countries.

For years, oblique photographs were perceived as supplementary data for aerial laser scanning (ALS). Often, their supplementary role was limited to providing a source of textures for 3D models developed from ALS data. They were also commonly applied in dedicated oblique images viewers, which in conjunction with a Digital Terrain Model enabled simplified height measurements of features on a single photograph. With the advancement of photogrammetric technologies in recent years, the situation has been changing, and it has become possible to accurately orientate oblique images using automatic aerotriangulation and to apply adapted dense image matching (DIM) algorithms to work with this kind of data.

This paper overviews the results of orientation of blocks of oblique photographs that have been published in recent years, focusing in particular on benchmarking results obtained by EuroSDR and ISPRS for methods of orientating oblique images. The purpose of the performed experimental tests was to determine the capacity for mapping the geometry of building façades using dense image matching and for detecting changes in urban space using oblique photographs with respect to façades. The research was focused on two main issues, the first one concerning the assessment of accuracy and the second an attempt to apply oblique photographs to the detection of changes in building façades, which is not possible using any other aerial photogrammetric data.

Dane autora / Author's details:

mgr. inż. Wojciech Ostrowski
e-mail: wojciech.ostrowski@pw.edu.pl
telefon: +48 22 234 7694

Przesłano / Submitted 30.11.2016
Zaakceptowano / Accepted 30.12.2016