

Ocena dokładności geodezyjnych pomiarów fotogrametrycznych w obszarze zurbanizowanym z wykorzystaniem bezzałogowych systemów latających (BSL)

Co pomierzy dron?



W ostatnich latach obserwujemy ogromne przemiany związane z rozwojem fotogrametrycznych metod opracowania danych. Ich przejawem są m.in. metody cyfrowe i wykorzystanie technologii BSL w sytuacyjnych i wysokościowych pomiarach szczegółów terenowych I, II i III grupy.

**Patryk Lewandowski,
Piotr Gołuch, Grzegorz Józków,
Ester Borsuk, Natalia Dymarska,
Damian Podhorecki,
Bartłomiej Siekanko, Witold Rohm**

Jeszcze na początku lat 80. XX wieku dominującą fotogrametryczną metodą opracowania była metoda analogowa, następnie analogowo-analityczna, analityczna i obecnie (preferowana nie tylko przez zleceniodawców, wykonawców i użytkowników, ale również wymagana przez najnowsze uwarunkowania prawne [Rozp. MSWiA, 2011a]) – metoda cyfrowa. Jednostki naukowo-badawcze oraz geodezyjne i fotogrametryczne przedsiębiorstwa komercyjne inwestują w nowoczesne fotogrametryczne i teledetekcyjne technologie pomiarowe, takie jak: naziemny lub lotniczy skaning laserowy, mobilne systemy mapowania czy bezzałogowe systemy latające (BSL).

• Możliwości BSL

Bezzałogowe systemy latające (Unmanned Aerial System, UAS) mają obecnie bardzo szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia. Mogą to być np. rozwiązania pozwalające na przeprowadzenie lotu na wysokim pułapie, głównie przeznaczone do użytku wojskowego – zasięg takiego statku przekracza 2000 km, wysokość lotu może do-

chodzić do 20 km, a maksymalny czas lotu wynosi nawet 48 godzin. BSL stosowane do celów cywilnych, w tym fotogrametrycznych i teledetekcyjnych, to z reguły statki latające należące do segmentu typu mikro-UAS lub mini-UAS, które charakteryzują się niewielką masą własną oraz niewielką maksymalną ładownością (mikro mniej niż 5 kg, mini mniej niż 30 kg). Wskutek miniaturyzacji, mając na uwadze ich udźwig, takie systemy nie są w stanie znajdować się w powietrzu dłużej niż 1-2 godziny, a ich zasięg wynosi do 10 km [Colomina i Molina, 2014]. Najczęściej wykorzystywane są BSL, których udźwig oscyluje w granicach 0,5-2,5 kg, a czas trwania lotu to kilkadziesiąt minut.

Każdy BSL musi się składać z kilku bazowych elementów [Sawicki, 2012], tj.: platformy nośnej statku (do której zamontowane są różnorakie sensory do pozyskiwania danych), systemu awioniki (do manualnego sterowania statkiem lub autonomicznego sterowania lotem), systemu transmisji danych pozyskanych sensorami (np. aparatem cyfrowym), naziemnej stacji kontrolnej (za pomocą której projektuje się trasę nalotu), systemu kontroli lotu (w skład którego mogą wchodzić urządzenia: GPS, INS, altimetr, barometr, odometr, magnetometr).

Spektrum zastosowań cywilnych systemów bezzałogowych jest bardzo szerokie. Aktualnie wykorzystywane są m.in. w: rejestracji i monitoringu środowiska naturalnego (obszary leśne, zbiorniki wodne, kopalnie odkrywkowe), rolnictwie (ocena stanu upraw czy usprawnie-

nie procesu nawożenia), ratownictwie medycznym (poszukiwanie zaginionych osób, dostarczenia pożywienia/lekarstw w trudno dostępne miejsca), reklamach i marketingu (fotografowanie i nagrywanie wideo przy sprzedaży nieruchomości), leśnictwie (ochrona przeciwpożarowa, tropienie kłusowników czy obserwacja i badanie życia dzikich zwierząt).

Ze względu na niski pułap lotu bezzałogowe statki mają możliwość fotografowania poniżej podstawy chmur. Do ich zalet zalicza się też stosunkowo niskie koszty zakupu i eksploatacji systemu, zazwyczaj brak wymogu użytkownika lotniska do startu i lądowania oraz wysoką rozdzielczość otrzymanych produktów, sięgającą pojedynczych centymetrów lub nawet milimetrów [Kędzierski i in., 2014]. BSL bardzo ważne zastosowanie znalazły również w geodezyjnych pomiarach fotogrametrycznych wykonywanych przede wszystkim dla obszarów zurbanizowanych, terenów o niedużej powierzchni (do kilku tysięcy hektarów) lub terenów o ograniczonej dostępności [Kędzierski i in., 2015]. Dzięki wykorzystaniu niemetrycznych kamer czy skanerów laserowych możliwa jest realizacja różnych prac wymagających zachowania centymetrowej dokładności. Produkty fotogrametryczne BSL mogą również znaleźć inne zastosowanie, takie jak: określenie stanu użytkowania i opracowania planistyczne [Nex i Remondino, 2014], gdzie wymagania dokładnościowe są mniej rygorystyczne.

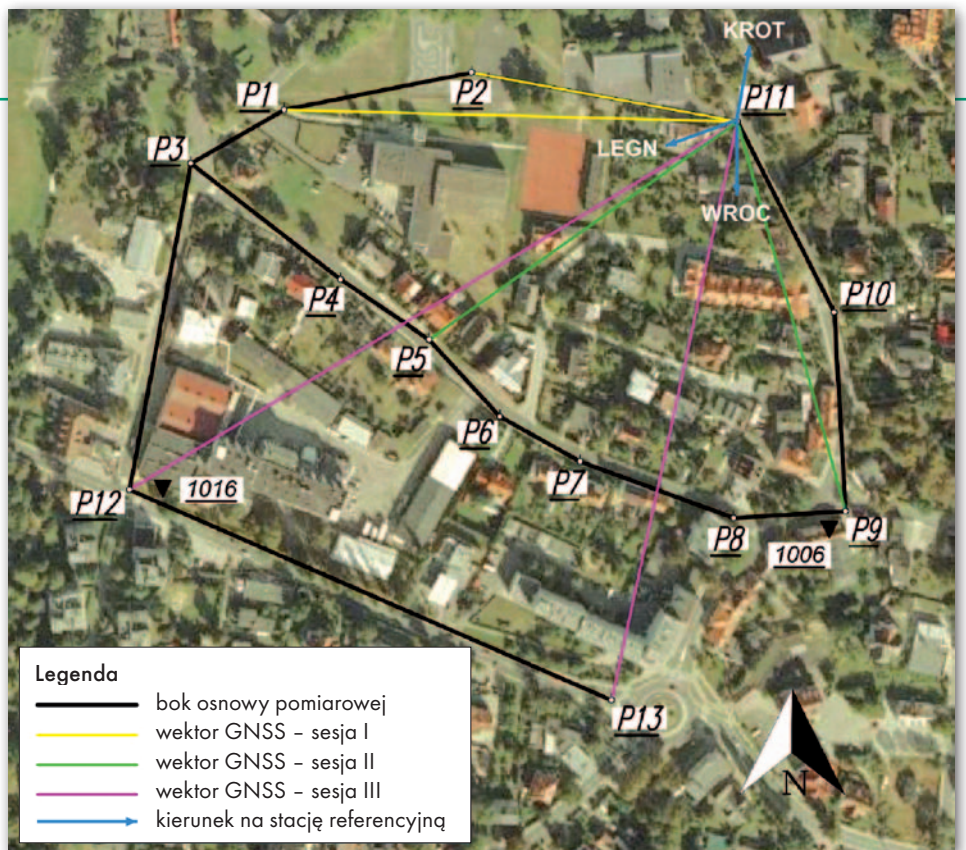
• Wymagania dokładnościowe w realizacji prac geodezyjnych

Zgodnie z zapisem art. 12c ust. 1 pkt 2 *Prawa geodezyjnego i kartograficznego* [Ustawa PgiK, 1989] prace geodezyjne mające na celu utworzenie m.in. ortofotomapy lub numerycznego modelu terenu nie podlegają zgłoszeniu, jeżeli nie są wykonywane na zamówienie podmiotów, o których mowa w art. 2 ust. 1 i 2 ustawy o informatyzacji działalności podmiotów realizujących zadania publiczne [Ustawa, 2005], tj. podmiotów publicznych.

Według obowiązujących przepisów [art. 15 Rozp. MSWiA, 2011b] pomiary sytuacyjne i wysokościowe można wykonywać innymi metodami, technologiami i technikami pomiarowymi niż te, które są określone w rozporządzeniu, jeżeli zapewnią one uzyskanie danych obserwacyjnych z wymaganą dokładnością, a jednocześnie wykonawca przedstawi opis tych metod, technologii i technik wraz z matematyczną analizą dokładności danych obserwacyjnych. W przypadku wykorzystania technologii BSL do pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych na etapie pozyskania i przetwarzania danych powinno się stosować przez analogię przepisy, które odnoszą się do geodezyjnych pomiarów fotogrametrycznych. Szczególną uwagę należy zwrócić na to, aby prawidłowo wykonane były prace związane z:

- projektem lotu;
- sygnalizacją punktów polowej osnowy fotogrametrycznej (fotopunktów i punktów kontrolnych) przed wykonaniem lotu, w tym również pomiar i obliczenie współrzędnych punktów osnowy;
- nalotem fotogrametrycznym;
- weryfikacją jakości fotograficznej i geometrycznej pozyskanych zdjęć;
- aerotriangulacją oraz weryfikacją jakości aerotriangulacji;
- budową NMPT/NMT oraz weryfikacją jakości pozyskanych danych wysokościowych;
- ortorektyfikacją, mozaikowaniem oraz weryfikacją jakości radiometrycznej i geometrycznej ortofotomapy (ortomozaiki) – w tym niezależnym pomiarem kontrolnym.

Szczegóły terenowe podlegające pomiarowi dzielimy na trzy grupy dokładnościowe. Dokładność pomiarów zależna jest od tego, do której grupy zaliczany jest obiekt oraz czy wyniki pomiaru mają służyć do aktualizacji baz danych opisanych w art. 4 ust. 1a i 1b *PgiK* (bazami tymi są m.in.: EGIB, GESUT, BDOT500), czy wyłącznie do aktualizacji bazy danych obiektów topograficznych, o której mowa w art. 4 ust. 1a pkt 8 *PgiK*, czyli bazy BDOT10k [Rozp. MSWiA, 2011b]. W tym



Rys. 1. Szkic osnowy pomiarowej zastosowanej do badań fotogrametrycznych

drugim przypadku wymagania dokładnościowe są dużo niższe. Rozporządzenie w sprawie baz danych dotyczących zobrażeń lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu [Rozp. MSWiA, 2011a] wprowadza jako kryterium podziału zbiorów danych dotyczących ortofotomapy wielkość piksela terenowego (w zakresie od 0,05 m do 5,00 m). Zbiory danych dotyczących NMT klasyfikowane są w zależności od dokładności wysokościowej określonej przez wartość błędu średniego wyznaczonej wysokości (w zakresie od 0,20 do 2,00 m) oraz interwału siatki punktów wysokościowych (w zakresie od 1,00 do 100,00 m).

• Cel opracowania

W niniejszym artykule przedstawione zostaną wyniki wspólnych badań prowadzonych przez pracowników Instytutu Geodezji i Geoinformatyki (IGiG) Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, studentów należących do Studenckiego Koła Naukowego Geoinformatyków (działającego przy IGiG) oraz Zespołu Fotogrametrii Przedsiębiorstwa Usług Geodezyjno-Kartograficznych GEOBIZ w Poznaniu. Celem prac była ocena możliwości wykonywania – z wykorzystaniem technologii BSL – sytuacyjnych i wysokościowych pomiarów fotogrametrycznych szczegółów terenowych I, II i III grupy dokładnościowej, będących obiektami przestrzennymi objętymi bazą danych BDOT500. Prace badawcze zrealizowano w terenie miejskim o zróżnicowanej rzeźbie terenu.

Ocenę jakości stworzonych produktów fotogrametrycznych (tj. ortomozaiki i NMPT) postanowiono określić empirycznie poprzez porównanie współrzędnych szczegółów terenowych pozyskanych z produktów fotogrametrycznych ze współrzędnymi referencyjnymi tych szczegółów, które zostały uzyskane na podstawie dokładnych pomiarów bezpośrednich.

Ze względów technicznych pomiary przeprowadzono w Obornikach Śląskich (rys. 1), powiat trzebnicki, województwo dolnośląskie. Czynniki decydującymi o wyborze miejsca były: zmienne ukształtowanie i zagospodarowanie terenu oraz bliskość Wrocławia. Wynikowa ortofotomapa została bezpłatnie przekazana władzom miasta Oborniki Śląskie.

• Metodyka pracy

- osnowa i pomiary referencyjne

Weryfikację jakości procesu aerotriangulacji przeprowadza się na niezależnych punktach kontrolnych [pkt 22 załącznika nr 2 do Rozp. MSWiA 2011a], których współrzędne należy pomierzyć w terenie tak, aby łączny średni błąd identyfikacji i pomiaru nie przekraczał (w przypadku rejestracji zdjęć cyfrowych) rozdzielczości terenowej jednego piksela (w tym opracowaniu zdjęcia mają rozdzielczość terenową 2,5 cm). Natomiast pamiętając, że dokładność pomiaru szczegółów terenowych I grupy wynosi sytuacyjnie $\pm 0,10$ m oraz wysokościowo $\pm 0,02$ m (jest to najwyższa dokładność i odnosi się do przewodów i urządzeń kanalizacyjnych),



Rys. 2. Lokalizacja pomierzonych punktów terenowych wykorzystanych do analiz – podział ze względu na wybrane kategorie przedstawiono w postaci okręgów o różnych kolorach

w celu zapewnienia referencyjności dla pomiarów fotogrametrycznych w naszym opracowaniu zdecydowaliśmy, że dokładność wyznaczenia położenia punktów osnowy pomiarowej powinna być o jeden rząd lepsza, to jest $\pm 0,01$ m sytuacji oraz $\pm 0,002$ m wysokościowo.

Aby osiągnąć takie dokładności, wybraliśmy rozwiązanie oparte na zintegrowanej sieci kątowno-liniowej wzmocnionej pomiarami krótkich wektorów GNSS oraz niwelacji geometrycznej o podwyższonej dokładności. Zastosowane rozwiązanie jest wyrównaniem pseudoswobodnym bazującym na jednym punkcie (wyznaczonym z wektorów pomiędzy stacjami ASG-EUPOS a punktem osnowy badawczej) i jednym wektorze przyjętym za bezbłędny (o najmniejszych wartościach odchylenia standardowego z rozwiązania podwójnych różnic obserwacji fazowych). Takie rozwiązanie, choć niezgodne w pełni ze standardem technicznym [Rozp. MSWiA, 2011b], zapewnia maksymalną wewnętrzną spójność sieci, a jednocześnie pozwala na dowiązanie układu lokalnego opracowania do państwowego systemu odniesień przestrzennych [Rozp. RM, 2012].

Do badań wybrano obszar zurbanizowany. Znajdowały się na nim liczne szczegóły terenowe należące głównie do pierwszej oraz drugiej grupy dokładnościowej. Spośród nich wytypowano punkty, które podlegałyby pomiarowi podczas standardowej aktualizacji mapy zasadniczej: przekroje drogowe, krawężniki, naziemne elementy infrastruktury

technicznej, trwale ogrodzenia, chodniki, skwery, boisko sportowe, skarpy i trawniki. Wyselekcjonowane elementy zagospodarowania terenu zamarkowano sygnałami z białej taśmy budowlanej w kształcie litery L, jednoznacznie wskazując punkt podlegający pomiarowi. Do prac terenowych wykorzystano przygotowaną wcześniej osnowę sytuacyjno-wysokościową, a do pomiaru – tachimetry elektroniczne Trimble S3 i Leica TC407.

• Metodyka pracy – opracowanie fotogrametryczne danych

Koncepcja fotogrametrycznego opracowania zdjęć pozyskanych przez BSL w niczym nie różni się od tej, którą znamy i wykorzystujemy w tradycyjnej cyfrowej fotogrametrii lotniczej [Preuss, 2014]. W obu przypadkach wykonywana jest aerotriangulacja bloku zdjęć z wykorzystaniem fotopunktów i punktów wiążących. Na podstawie zorientowanych zdjęć tworzone są następnie modele terenu (NMPT i/lub NMT) oraz przeprowadzana jest ortorektifikacja w celu uzyskania ostatecznego produktu – ortomozaiki. Podobne są również inne rozwiązania algorytmiczne, np. samokalibracja kamery, która w pewnym zakresie eliminuje konieczność kalibracji laboratoryjnej.

W niniejszej pracy do opracowania fotogrametrycznego zdecydowano się wykorzystać program Agisoft PhotoScan, który powszechnie jest stosowany dla zobrazowań BSL [Gini i in., 2013] ze

względu na wydajne algorytmy, wysoką automatyzację opracowania i prostotę obsługi. Wiele programów przeznaczonych do opracowań danych BSL wykorzystuje najnowsze rozwiązania algorytmiczne cyfrowego przetwarzania obrazu z zakresu maszynowego widzenia (*computer vision*). Przykładowo są to algorytmy *matchingu* obrazów oparte na deskryptorach punktów, np. Scale Invariant Feature Transform, SIFT [Lowe, 2004], wykorzystywane do automatycznego pozyskiwania punktów wiążących oraz algorytmy gęstego *matchingu*, np. Semiglobal Matching, SGM [Hirschmüller, 2008], stosowane zwykle dla większej liczby zdjęć niż 2 (tzw. Multi-View Stereo). Dzięki gęstemu *matchingowi* możliwe jest generowanie chmur punktów o większej gęstości niż w przypadku zastosowania lotniczego skaningu laserowego. W konsekwencji powoduje to podniesienie szczegółowości modeli terenu i jakości ortomozaiki. Pisząc o ortofotomapie, należy zaznaczyć, że w wielu przypadkach (również w tym opracowaniu) produkt tego typu (uzyskany z danych BSL) jest tzw. prawdziwą ortofotomapą, gdyż ortorektifikacja przeprowadzana jest z wykorzystaniem NMPT, a nie NMT.

• Metodyka pracy – testy statystyczne i dobór grup punktów do porównań

W wyniku porównania współrzędnych punktów odczytanych z NMPT i ortomozaiki oraz pozyskanych metodą tachimetryczną obliczono różnice współrzędnych (odchyłki), na podstawie których można empirycznie określić dokładność opracowań fotogrametrycznych. W celu przedstawienia jakości wynikowego opracowania zaplanowano przeprowadzenie analiz statystycznych polegających na znalezieniu w badanej próbie maksymalnych odchyłek oraz obliczenia wartości średniej i błędu średniego RMSE (Root Mean Square Error).

Analiza jakości danych została zaplanowana z podziałem na wydzielone kategorie mierzonych szczegółów, m.in.: budynki, naziemne elementy uzbrojenia terenu, skarpy, jezdnia i krawężniki. Ocena jakości dotyczy wymaganej dokładności wyznaczenia współrzędnych według 3 grup dokładnościowych [Rozp. MSWiA, 2011b], co pozwoli sprawdzić przydatność otrzymanego produktu do celów geodezyjnych.

● Kampania pomiarowa – osnowa i pomiary referencyjne

Pomiar osnowy (rys. 1) przeprowadzono z wykorzystaniem technik klasycznych (tachimetria i niwelacja geometryczna) oraz techniki satelitarnej (metoda statyczna). Państwowy system odniesień przestrzennych przeniesiono na obszar opracowania [Rozp. RM, 2012], stosując pomiary GNSS z trzech stacji systemu ASG-EUPOS oraz pomiary niwelacyjne, odniesione do dwóch punktów państwowej szczegółowej osnowy wysokościowej.

Wyrównanie osnowy pomiarowej wykonano poprzez integrację pomiarów klasycznych z pomiarami GNSS. Obserwacje satelitarne zostały opracowane w oprogramowaniu Leica Geo Office. W pierwszej kolejności obliczono wektory pomiędzy punktami osnowy w układzie odniesienia PL-ETRF2000 oraz zestawiono je w sieć. Następnie wykonano wyrównanie ściśle jednego punktu sieci lokalnej (P11) w nawiązaniu do stacji referencyjnych: KROT, LEGN oraz WROC. W kolejnym kroku, wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów z minimalną liczbą warunków, przeprowadzono wyrównanie pseudoswobodne, zakładając stałość punktu P11 osnowy pomiarowej. W wyniku wyrównania stwierdzono, że najgorzej wyznaczonym wektorem jest P9-P11 o błędzie RMSE równym 0,0053 m.

Obliczone wektory zostały wyeksportowane do programu C-Geo oraz wyrównane wspólnie z obserwacjami klasycznymi (odległości, kierunki, przewyższenia) jako sieć przestrzenna. W ten sposób wyznaczono współrzędne punktów osnowy pomiarowej. Średniokwadratowy błąd położenia punktu w płaszczyźnie poziomej wyniósł $\pm 0,0044$ m, a wysokości $\pm 0,0003$ m. Najgorzej sytuacyjnie został wyznaczony punkt P13 ($\pm 0,0074$ m). Pod względem wysokościowym największy błąd średni ma punkt P6 ($\pm 0,0004$ m). Dalsze analizy prowadzono w układzie współrzędnych płaskich PL-2000 oraz w układzie wysokościowym PL-KRON86-NH.

W wyniku pomiaru tachimetrycznego, w którym wykorzystano założoną osnowę sytuacyjno-wysokościową, wyznaczono współrzędne przestrzenne 436 punktów. Każdy szczegół został pomierzony trzykrotnie przez 3 zespoły pomiarowe, a wyniki uśredniono. Rozkład pomierzonych punktów z podziałem według wydzielonych kategorii szczegółów terenowych został przedstawiony na rysunku 2.

W trakcie pomiaru tachimetrycznego zanożowano pewne uwagi istotne z punktu widzenia interpretacji wyników opracowań fotogrametrycznych: ● narożniki budynków zostały pomierzone bezlusterowo, jednak często nie pokrywały się z rzutem dachu, który wystawał

poza kontur budynku; ● skarpy były porośnięte trawą o wysokości około 3 cm; ● słupy oraz maszty zostały pomierzone ekscentrycznie; ● niektóre punkty wskaźujące granice chodnika przy Ośrodku Sportu i Rekreacji (rys. 2, północna część zobrazowania) zlokalizowane były bezpośrednio przy rosnącym obok zakrzewieniu.

● Kampania pomiarowa – nalot fotogrametryczny

Do wykonania opracowania wybrano bezzałogową platformę Trimble UX5 – stałopłat typu skrzydło o masie startowej 2,5 kg, która pozwala na lot do 50 minut. Użyty do przeprowadzenia nalotu statek wyposażony został w aparat cyfrowy Sony NEX-5T (16,1 Mpx) z obiektywem szerokokątnym o stałej ogniskowej ($f = 15$ mm). Taki zestaw zapewnia według producenta osiągnięcie maksymalnej rozdzielczości piksela terenowego o wymiarze 2,4 cm dla wysokości lotu równej 75 m.

Przed przystąpieniem do nalotów, zgodnie z obowiązującymi przepisami ruchu lotniczego w Polsce, uzyskano pozwolenie służby kontroli lotniska Aeroklubu Wrocławskiego na przeprowadzenie planowanych prac w rejonie strefy ruchu lotniskowego Szymanów. Jako miejsce startu i lądowania wybrano tereny rolne położone kilka kilometrów na południe od miejsca opracowania, co spowodowało konieczność umiejscowienia dodatkowego obserwatora na ul. Ofiar Katyńskich, pozostającego w ciągłej łączności z operatorem samolotu bezzałogowego.

W dniu, w którym wykonano nalot fotogrametryczny BSL, warunki atmosferyczne były sprzyjające – słoneczna pogoda, umiarkowany wiatr. Zdjęcia zostały dobrze doświetlone, ale pewnym zauważalnym mankamentem było to, że przy wysokich obiektach powstały liczne cienie.

Lot zaplanowano ze średnią wysokością fotografowania równą 85 m oraz z zadeklarowanym pokryciem podłużnym $P_x = 80\%$ i poprzecznym $P_y = 80\%$. Łącznie pozyskano 404 zdjęcia, rejestrując każdorazowo pozycję wyzwolenia migawki z dokładnością rozwiązania nawigacyjnego GNSS oraz kąty orientacji kamery. Na rysunku 3 przedstawiono 19 projektowanych osi lotu oraz rzeczywiste położenie 404 środków rzutów kamery, położenie 15 fotopunktów wykorzystanych do

Rys. 3. Lokalizacja projektowanych osi lotu, rzeczywistych środków rzutów, fotopunktów i obszaru podlegającego analizie



Tab. 1. Wyniki wyrównania bloków zdjęć z różną wartością pokrycia wzajemnego obrazów

Wyniki wyrównania bloku zdjęć	Wartość pokrycia wzajemnego zdjęć	RMSE (na podst. odchyłek wysok.) [m]	RMSE (na podst. odchyłek syt.) [m]	RMSE (na podst. wszystkich odchyłek) [m]	RMSE [pix]	Liczba fotopunktów
Na fotopunktach	80% na 80%	0,008	0,025	0,027	0,330	15
	80% na 60%	0,003	0,016	0,016	0,103	
	60% na 80%	0,004	0,016	0,017	0,106	
	60% na 60%	0,002	0,012	0,013	0,053	
Na punktach kontrolnych	80% na 80%	0,008	0,012	0,015	0,353	6
	80% na 60%	0,010	0,021	0,024	0,149	
	60% na 80%	0,011	0,020	0,023	0,164	
	60% na 60%	0,015	0,025	0,030	0,088	

wyrównania bloku zdjęć, a także obszar podlegający analizie.

Dodatkowo w celu zbadania jakości wynikowych produktów z grupy zdjęć wyodrębniono kolejne bloki fotografii w taki sposób, aby uzyskać teoretyczną mniejszą wartość pokrycia wzajemnego obrazów: pokrycie 80% na 60% (powstało wskutek wyboru co drugiego szeregu zdjęć), pokrycie 60% na 80% (wydzielenie z całości co drugiego zdjęcia) oraz pokrycie 60% na 60% (co drugie zdjęcie z co drugiego szeregu). Prowadząc analizy na tym samym zbiorze obrazów, w opracowaniu uwzględniane są te same indywidualne cechy nalotu, do których należą: jednakowe warunki atmosferyczne fotografowania, te same kąty obrotu kamery, wysokość nalotu oraz trajektoria lotu statku.

• Opracowanie fotogrametryczne danych BSL

Pierwszy etap opracowania danych został przeprowadzony w programie Agisoft PhotoScan, gdzie wyrównano bloki zdjęć (przyjęto błąd *a priori* położenia fotopunktów 3D na poziomie 5 mm). Wyniki wyrównania bloków zdjęć zamieszczone zostały w tabeli 1.

Wartości błędu średniego RMSE obliczone na podstawie odchyłek wpasowania na fotopunktach maleją wraz ze zmniejszaniem wartości pokrycia zdjęć, ponieważ blok zbudowany z mniejszej liczby zdjęć łatwiej wpasować w sieć fotopunktów (pierwsze cztery wiersze w tab. 1). Natomiast właściwą ocenę wyrównania bloku (aerotriangulacji) otrzymujemy z odchyłek na punktach kontrolnych równomiernie rozmieszczonych na obszarze opracowania (ostatnie cztery wiersze w tab. 1). Z tego wynika prawidłowość, że zmniejszenie pokrycia wzajemnego zdjęć wpływa na stopniowe zmniejszenie dokładności wyrównania bloku zdjęć. Bardzo podobne wyniki zaobserwowano dla wariantów pokrycia 80% na 60% i 60% na 80%.

W wyniku procesu obliczeniowego wygenerowano numeryczne modele pokrycia terenu (NMPT) o boku siatki około 5 cm oraz ortomozaiki z rozdzielczością zbliżoną do wielkości piksela terenowego (w nadirze) dla wykonanych zdjęć, tj. około 2,5 cm.

W kolejnym etapie z uzyskanych produktów fotogrametrycznych (ortomozaiki i NMPT) odczytano odpowiednio współrzędne płaskie oraz wysokości szczegółów terenowych. W tym celu

wykorzystano program Trimble Business Center. Pomiarowi podlegały szczególnie terenowe pomierzone bezpośrednio w terenie (rys. 2). Należy podkreślić, że pomiar na ortomozaice i NMPT nie jest w pełni obiektywny, gdyż identyfikacja szczegółów może nieznacznie różnić się w zależności od interpretacji operatora i osoby wykonującej pomiar terenowy. Jednakże wspomniane wcześniej znaki sygnalizacyjne służące do markowania szczegółów w terenie były widoczne również na ortomozaice, dzięki czemu błędy interpretacyjne i identyfikacyjne zostały w znaczny sposób zminimalizowane. Uzyskane w ten sposób współrzędne posłużyły do analizy jakościowej opracowań fotogrametrycznych.

• Błędy w opracowaniu ortomozaik i NMPT

Po opracowaniu bloków zdjęć o mniejszych pokryciach zauważono błędy w ortomozaice oraz NMPT. Wynikają one ze specyfiki rozwiązań algorytmicznych zastosowanych w wykorzystanym oprogramowaniu. Przykładowo, z powodu mniejszego pokrycia dany obszar terenu zobrazowany jest na mniejszej liczbie zdjęć. W konsekwencji powoduje to trudności w gęstym matchingu, a nawet brak punktów dla takich obszarów. To z kolei skutkuje niepożądanymi i często błędnymi interpolacjami modeli terenu i następnie niepoprawnie wykonaną ortorektyfikacją. Dla pewnych fragmentów wystąpić mogą nawet przerwy fotograficzne w ortomozaice (rys. 4, czarny obszar), wynikające z braku pokrycia zdjęciami lub błędnie wygenerowanego modelu terenu.

Inne błędy ortomozaiki, jakie możemy otrzymać z powodu niewystarczającego wzajemnego pokrycia zdjęć, zilustrowane zostały po prawej stronie rysunku 5. W przypadku opracowania zdjęć z wzajemnym pokryciem 80% na 80% (lewa strona rysunku 5) obiekty na ortomozaice zachowały prawidłową geometrię: dachy mają proste krawędzie, obrazy dachów, kominów i drzew są rzutowane ortogonalnie, dachy pokrywają przyziemie budynków oraz brak jest rozmazań jednolitych powierzchni. W przypadku najmniejszego pokrycia (60% na 60%) widać znaczne pogorszenie geometrii obiektów. Krawędzie i kalenice dachów zostały mocno zdeformowane, odsłaniając tym samym fragmenty ścian. Pokrycie dachu zostało rozmazane, korony drzew niekształcane – na tych obrazach ortorektyfikacja została przeprowadzona niepoprawnie.

Innym przykładem pojawiających się błędów na ortomozaikach powstałych



Rys. 4. Typowe błędy ortomozaiki wykonanej w sposób automatyczny z bloków zdjęć o małym pokryciu (60% na 60%)

z bloków zdjęć o mniejszym pokryciu są pewnego rodzaju „uskoki” (rys. 4). Błędy te są skutkiem zastosowania automatycznego mozaikowania, gdzie ustalone przez algorytm szwy rozdzielające poszczególne zdjęcia użyte do stworzenia mozaiki przebiegają w poprzek obiektów (np. dachów budynków).

Wspomniane wyżej problemy mogą być zminimalizowane poprzez manualny pomiar punktów terenu oraz manualną edycję modelu i ustalenie szwów przed mozaikowaniem zdjęć. Niestety, użyte oprogramowanie nie daje takich możliwości, dlatego do analiz wykorzystano tylko produkty uzyskane ze zdjęć o największym pokryciu, gdzie podczas wizualnej analizy nie stwierdzono wad ortomozaiki i NMPT.

• Opracowanie chmury punktów

Wygenerowana ze zdjęć BSL przez program gęsta chmura punktów jest jednym z ważniejszych produktów uzyskanych w wyniku procesu obliczeniowego. Chmura szczegółowo prezentuje pokrycie terenu, jest produktem na podstawie którego tworzony jest numeryczny model pokrycia terenu, a z kolei NMPT stanowi bazę w procesie generowania ortomozaiki. Przykład kolorowej chmury punktów przedstawiono na rysunku 6. Zauważyć można, że cały obszar jest pokryty bardzo dużą liczbą punktów. Gęstość jest większa od chmury pozyskanej ze skaningu lotniczego. Jakość i gęstość chmury wygenerowanej ze zdjęć BSL jest na porównywalnym poziomie z chmurą pozyskaną z mobilnego i naziemnego skaningu laserowego.

Mimo że projekt lotu zakładał wykonanie zdjęć pionowych, odpowiednio duże pokrycie w połączeniu z wykorzystaniem obiektywu szerokokątnego pozwoliły na wykonanie gęstego *matchingu* również dla obiektów pionowych, takich jak ściany budynków (rys. 7). Różnicą w porównaniu z chmurą pozyskaną metodą skaningu lotniczego jest również brak punktów pod koronami drzew (czarne pola na rys. 7).

• Wyniki przeprowadzonych testów

Ocenę dokładności produktów w postaci NMPT i ortomozaiki przeprowadzono tylko dla największego pokrycia wzajemnego zdjęć (80% na 80%). Według wymogów aktualizacji baz danych dotyczących ortofotomapy [Rozp. MSWiA, 2011a] błąd sytuacyjny dobrze identyfikowalnego punktu nie powinien przekraczać podwójnej wartości wymiaru piksela terenowego. W wyniku opracowania danych uzyskano ortomozaikę o wymiarze piksela terenowego równym



Rys. 5. Fragmenty ortomozaik stworzonych w oprogramowaniu Agisoft PhotoScan dla 2 bloków zdjęć z różnym pokryciem wzajemnym: 80% na 80% (ortomozaiki z lewej strony – prawidłowe) oraz 60% na 60% (ortomozaiki z prawej strony – z widocznymi błędami)



Rys. 6. Rzut izometryczny gęstej chmury punktów, widok szczegółowy



Rys. 7. Rzut izometryczny gęstej chmury punktów, widok ogólny

2,5 cm, zatem dopuszczalny błąd położenia punktów wynosi ± 5 cm.

Wymogi, które znajdziemy w rozporządzeniu [Rozp. MSWiA, 2011a], odnoszą się do produktów pozyskanych metryczną kamerą pomiarową, a nie aparatem cyfrowym, jaki jest wykorzystywany w przypadku BSL. Ponadto najmniejszy wymiar piksela terenowego ortofotomapy uwzględniony w tym samym rozporządzeniu wynosi 5 cm. Mimo to podczas analizy uzyskanych wyników autorzy postanowili zaadaptować wymogi rozporządzenia tak, jak gdyby dotyczyły również ortofotomapy uzyskanej ze zdjęć niemetrycznych i dla odpowiednio mniejszej wielkości piksela terenowego.

Z kolei rozporządzenie w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wy-

sokościowych [Rozp. MSWiA, 2011b] kategoryzuje dopuszczalne błędy pomiaru w zależności od typu obiektu (szczegółu terenowego): 10, 30, 50 cm dla położenia sytuacyjnego oraz 2, 5, 10 cm dla pomiaru wysokości.

• Dokładność sytuacyjna

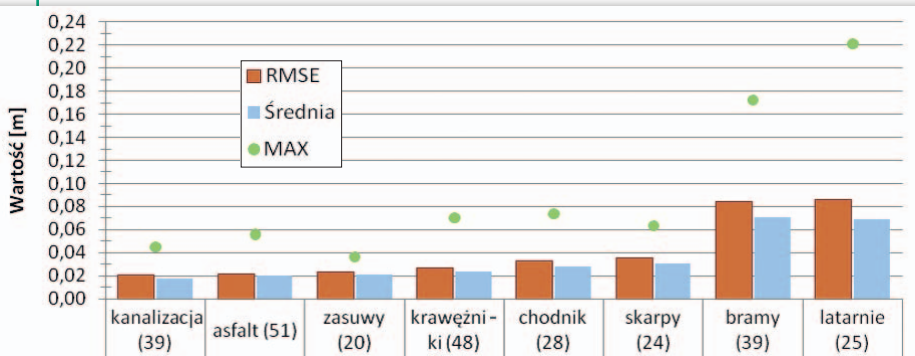
Rysunek 8 prezentuje wyniki analiz statystycznych pomiaru położenia sytuacyjnego punktów z podziałem na 8 wydzielonych kategorii, tj.: elementy sieci kanalizacyjnej w postaci włazów i kratek ściekowych (kanalizacja); punkty jezdni (asfalt); zasuwy; krawężniki; chodnik; punkty skarpy; bramy i ogrodzenia (bramy); słupy, maszty i latarnie (latarnie). Dodatkowo w nawiasach zamieszczono liczebność każdego ze zbiorów. Z analizy wynika, że punkty znajdujące się

w miejscach odsłoniętych cechują się niewielką odchyłką wyznaczenia ich współrzędnych w odniesieniu do pomiaru tachimetrycznego. Żaden z punktów nie różni się od położenia wyjściowego więcej niż 7,4 cm. Obserwując wartości błędów średnich RMSE, zauważyć można, że nie przekraczają one wartości 3,5 cm, co spełnia wymogi obu ww. rozporządzeń.

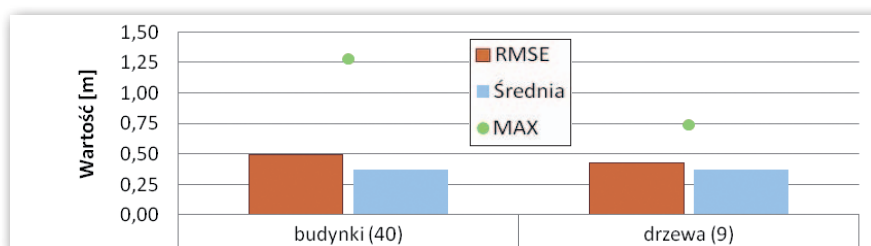
Natomiast pomiar obiektów wyniesionych ponad poziom terenu (bramy, ogrodzenia, słupy, maszty, latarnie) cechuje się większymi wartościami statystyk od pomiaru pozostałych szczegółów terenowych. Wzrost błędów może być efektem problemów identyfikacji obiektów na ortomozaice. Trudniej zlokalizować os przyziemia obiektu charakteryzującego się zadanym kształtem (okrągłe lub kwadratowe słupy), niż wskazać prawidłową lokalizację charakterystycznych szczegółów terenowych (np. włazy studzienek kanalizacyjnych, zasuwy), które nie są wyniesione ponad teren. Jednakże przeprowadzona analiza wykazała, że błąd pomiaru sytuacyjnego nie przekroczył 10 cm, stąd też pomiar sytuacyjny tego typu obiektów na podstawie tak wygenerowanej ortomozaiki może posłużyć do aktualizacji bazy BDOT500.

Analizując wyniki zamieszczone na rysunku 9, można jednoznacznie stwierdzić, że pomiary BSL nie powinny być wykorzystywane do określenia położenia sytuacyjnego budynków. Uzyskane wartości kilkukrotnie przewyższają dopuszczalny błąd pomiaru. Jest to spowodowane tym, że najczęściej krawędzie dachów budynków nie pokrywają się z krawędziami ich ścian. Z powodu ortogonalności obiektów na „prawdziwej” ortofotomapie, która jest produktem BSL, nie jest możliwe wskazanie narożników budynków. Mimo przekroczenia dopuszczalnego błędu pomiar budynków na podstawie ortofotomozaiki może służyć do kontroli ich usytuowania w stosunku do danych pochodzących z EGIB oraz wytypowania obiektów, które zmieniły kształt lub są znacznie przemieszczone i wymagają nowego pomiaru. W terenie geodeta nie jest w stanie stwierdzić, czy dany budynek jest przesunięty na mapie, nie wykonując czasochłonných pomiarów tachimetrycznych.

Natomiast analiza pomiaru drzew na podstawie ortomozaiki sugeruje zachowanie półmetrowej dokładności. Jednak pień drzewa niekoniecznie musi znajdować się w środku rzutu jego korony. Os drzewa zostaje określona w sposób bardzo przybliżony, dlatego taki pomiar nie powinien być wykorzystywany do pomiaru sytuacyjnego drzew, tym bardziej że przedstawione wyniki otrzyma-



Rys. 8. Analiza dokładności pomiaru sytuacyjnego szczegółów terenowych według wydzielonych kategorii



Rys. 9. Analiza dokładności pomiaru sytuacyjnego budynków i drzew

no na podstawie nielicznej próby pomiarowych obiektów.

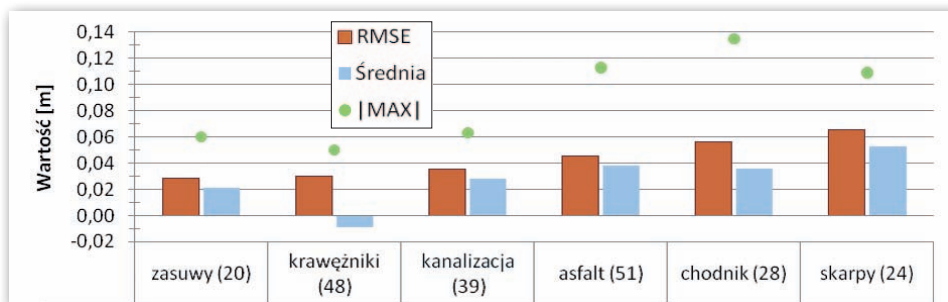
• Dokładność wysokościowa

Analizując wyniki pomiaru wysokościowego punktów (rys. 10), stwierdzono, że zasuwy, krawężniki, jezdnie oraz skarpy można pomierzyć na podstawie NMPT wygenerowanego w wyniku opracowania danych pozyskanych przez BSL. Błędy średnie pomiaru punktów nie przekraczają wartości dopuszczalnych, tj. 5 cm i 10 cm (skarpy). Wyjątek stanowią punkty należące do chodnika. Zwiększenie wartości ich błędu wystąpiło w wyniku bliskiego sąsiedztwa wysokiego zakrzewienia. Z kolei pomiar elementów sieci kanalizacyjnej (w postaci włązów kanalizacyjnych i kratki ściekowych) nie spełnia wymogu zachowania dopuszczalnego błędu pomiaru równego 2 cm [Rozp. MSWiA, 2011b]. W tym przypadku niezbędny jest uzupełniający pomiar niwelacyjny. W przypadku pomiaru krawężników ujemna średnia wartość odchyłki wynika z tendencji wygładzenia NMPT generowanego na podstawie utworzonej chmury punktów.

Przeprowadzone badania dokładności pomiaru wysokościowego wykazały, że punkty wygenerowanego NMPT (o interwale siatki wynoszącym 5 cm) można zaliczyć (z uwagi na bardzo dużą gęstość punktów) do grupy asortymentowej NMT-01 zbioru danych pomiarowych dotyczącego numerycznego modelu terenu o najwyższej dokładności wysokościowej, czyli nie mniejszej niż 0,20 m [Rozp. MSWiA, 2011a].

• BLS metodą na pomiar szczegółów

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wykorzystując BSL oraz właściwie wykonując proces opracowania danych pozyskanych z niskiego pułapu, można zachować wymaganą dokładność pomiaru szczegółów terenowych zgodnie z rozporządzeniami [Rozp. MSWiA, 2011a; Rozp. MSWiA, 2011b]. W wyniku tych pomiarów udowodniono skuteczność określenia położenia sytuacyjnego punktów w miejscach odsłoniętych na przykładzie elementów, takich jak: zasuwy, krawężniki, punkty jezdni, włązy i kratki ściekowe, chodnik i skarpy. Błędy średnie pomiaru tych elementów nie przekroczyły $\pm 3,5$ cm. Również wynik pomiaru słupów, masztów, latarni oraz bram i ogrodzeń wskazał na zachowanie dopuszczalnego błędu pomiaru wynoszącego 10 cm. Precyzja prawidłowego wskazania osi tych obiektów wymaga doświadczenia oraz w niektórych przypadkach pomiarów kontrolnych. Dla obiektów, takich jak:



Rys. 10. Analiza dokładności pomiaru wysokościowego szczegółów terenowych według wydzielonych kategorii

przyziemia budynków i drzewa, pomiary na podstawie opracowań fotogrametrycznych nie gwarantują zachowania wymaganej dokładności. Uzupełnienie pomiarów o tego typu obiekty należy wykonać innymi metodami zapewniającymi wyznaczenie ich położenia z dopuszczalnym błędem (np. pomiar tachimetryczny).

Trudniej jest natomiast uzyskać wyznaczenie rzędnych punktów z pomiaru wysokościowego z błędem nieprzekraczającym 2 cm w odniesieniu do elementów sieci kanalizacyjnej (ww. włązy i kratki). Z kolei możliwe jest zachowanie dokładności pomiaru wysokościowego dla obiektów i urządzeń budowlanych (5 cm) oraz skarp (10 cm). Należy jednak mieć na uwadze, że na pomiar rzędnej terenu ma wpływ odległość do wysokich obiektów. Według rozporządzenia [Rozp. MSWiA, 2011a] dane pozyskane z BSL mogłyby stanowić również podstawę do wygenerowania numerycznego modelu pokrycia terenu, ponieważ uzyskać można produkt o dokładności 20 cm.

Podsumowując, pomiary na podstawie uzyskanych z danych BSL produktów fotogrametrycznych, takich jak ortomozajki i modele terenu, mogą być wykorzystane do uzupełnienia treści mapy do celów projektowych. Stanowią również bardzo dobry podkład referencyjny do opracowań planistycznych oraz do weryfikacji położenia obiektów w terenie. Należy jednak mieć na uwadze, że nie każdy produkt tego typu będzie spełniał narzucone wymogi dokładnościowe. Otrzymana dokładność pomiaru zależy przede wszystkim od wykonanych zdjęć (m.in. rozdzielczości terenowej, pokrycia), charakteru terenu oraz procesu opracowania fotogrametrycznego, a także od doświadczenia osoby pozyskującej dane z produktów fotogrametrycznych.

Patryk Lewandowski, dr Piotr Gołuch, dr Grzegorz Józków, Estera Borsuk, Natalia Dymarska, dr hab. Witold Rohm
Instytut Geodezji i Geoinformatyki,
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Damian Podhorecki, Bartłomiej Siekanko
Przedsiębiorstwo Usług Geodezyjno-Kartograficznych GEOBIZ, Poznań

Literatura

- Colomina I., Molina P., 2014: Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, „ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing” 92: 79-97;
- Gini R., Pagliari D., Passoni D., Pinto L., Sona G., Dosso P., Grenzdörffer G. and Bill R., 2013: UAV photogrammetry: Block triangulation comparisons. Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci;
- Hirschmüller, H., 2008: Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on 30, no. 2: 328-341;
- Kędzierski M., Fryśkowska A., Wierzbicki D., 2014: Opracowania fotogrametryczne z niskiego pułapu. WAT, Warszawa;
- Kędzierski M., Wierzbicki D., Fryśkowska A., Wojtkowska M., Deliś P., 2015: Opracowanie ortofotomapy terenów wiejskich na podstawie wysokorozdzielczych zdjęć, pozyskanych z niskiego pułapu, „Przegląd Geodezyjny” nr 4;
- Lowe, D.G., 2004: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. „International Journal of Computer Vision” 60, no. 2: 91-110;
- Nex F. and Remondino F., 2014: UAV for 3D mapping applications: a review, „Applied Geomatics” 6, no. 1: 1-15;
- Preuss R., 2014: Automatyzacja procesu przetwarzania danych obrazowych, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”, vol. 26: 119-127;
- Rozp. MSWiA, 2011a: rozporządzenie ministra spraw wewnętrznych i administracji z 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu (DzU 2011 nr 263, poz. 1571);
- Rozp. MSWiA, 2011b: rozporządzenie ministra spraw wewnętrznych i administracji z 9 listopada 2011 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (DzU 2011 nr 263, poz. 1572);
- Rozp. RM, 2012: rozporządzenie Rady Ministrów z 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (DzU 2012, poz. 1247);
- Sawicki, P., 2012: Bezzałogowe aparaty latające UAV w fotogrametrii i teledetekcji – stan obecny i kierunki rozwoju, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”, vol. 23: 365-376;
- Ustawa PgiK, 1989: ustawa z 17 maja 1989 r. Prawo geodezyjne i kartograficzne;
- Obwieszczenie Marszałka Sejmu RP z 18 marca 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy PgiK (DzU 2015, poz. 520);
- Ustawa, 2005: ustawa z 17 lutego 2005 r. o informatyzacji działalności podmiotów realizujących zadania publiczne (DzU z 2005 r. nr 64, poz. 565).