



Wykorzystanie danych fotogrametrycznych z pokładu UAV w inwentaryzacji obiektu zabytkowego

Naloty nad skansenem

Fotogrametria niskopułapowa pozwala na pozyskiwanie kompletnych informacji o terenie czy pojedynczych budowlach taniej i szybciej niż w przypadku standardowych metod geodezyjnych. Dlatego też od razu znalazła zastosowanie m.in. w inwentaryzacji zabytków.

Krzysztof Urbański

Celem mojej pracy inżynierskiej, na podstawie której powstał ten artykuł, było przedstawienie procesu opracowania danych z bezałogowego statku latającego (BSL) pozyskanych na potrzeby inwentaryzacji całego kompleksu zabytków – Muzeum Wsi Mazowieckiej w Sierpcu (MWM). Skansen ten został otwarty w 1971 r. Na obszarze 60,5 ha między rzekami Sierpienicą i Skrwą ulokowano tradycyjne budynki i zrekonstruowano układy przestrzenne charakterystyczne dla wsi północnego Mazowsza. Na skansen składa się wieś rządowa (9 zagród), zespół karczemny, zespół dworski, drewniany wiatrak – koźlak oraz kościół

z dzwonnica (na fot. powyżej). Na terenie MWM znajduje się ponadto kompleks muzealno-wystawienniczy oraz centrum hotelowo-konferencyjne. Ze względu na swój unikatowy charakter miejsce to wielokrotnie gościło ekipy filmowe. Nagrywano tu m.in. „Ogniem i mieczem”, „Pana Tadeusza” czy „Historię Roja”.

• Plan nalogu

W ramach pracy zaplanowałem wykonanie dwóch rodzajów nalogów dronem:

- ogólnych – przeznaczonych do wykonania ortofotomapy całego obszaru skansenu,
- częściowych – służących opracowaniu modeli 3D poszczególnych obiektów.

Zanim przystąpiłem do projektowania trajektorii lotu, zdobyłem informacje

o przybliżonych wymiarach muzeum, jego cechach charakterystycznych oraz miejscach wymagających specjalnego podejścia. Zwróciłem uwagę m.in. na odpowiednie miejsce startu i lądowania, rzeźbę terenu, a także położenie drzew, sieci wysokiego napięcia, wysokich obiektów czy źródeł promieniowania elektromagnetycznego. Taka analiza jest konieczna, aby zapewnić kompletność i poprawność misji, zoptymalizować czas nalogów i późniejszego przetworzenia pozyskanych w jego wyniku materiałów, a co za tym idzie – móc ograniczyć koszty.

Ostatecznie w oprogramowaniu Pix4D Capture – aplikacji mobilnej przeznaczonej do planowania, projektowania oraz wykonywania misji fotogrametrycznych – zaprojektowałem 7 nalogów:

- 3 ogólne; wysokość lotu – 110 m, kąt nachylenia kamery – 90° (w nadirze), pokrycie poprzeczne – 80%, planowana wielkość piksela terenowego GSD – 4 cm;

- 2 naloty częściowe metodą „double grid” (w jego wyniku otrzymujemy dwa bloki zdjęć prostokątnych do siebie); wysokość lotu – 70 m, kąt nachylenia kamery – 60°, pokrycie poprzeczne – 80%, planowane GSD – 2 cm;

- 2 naloty częściowe metodą „circular mission” (wokół badanego obiektu); wysokość lotu 50 m, kąt, co jaki będzie wykonywane zdjęcie – 10°, planowane GSD – 1 cm.

W eksperymencie zaplanowałem wykorzystanie półprofesjonalnego czterowirnikowca DJI Phantom 3 Standard. Cała konstrukcja waży 1,216 kg. Czas lotu na jednej w pełni naładowanej baterii wynosi około 25 minut, a maksymalny zasięg kontrolera to 1000 m (dobre warunki, otwarta przestrzeń). Dron ten wyposażony jest w moduł GNSS do wyznaczania pozycji w przestrzeni (dokładność sytuacyjna – 0,5 m, wysokościowa – 1,5 m) oraz kamerę kompaktową (obiektyw FOV 94° 20 mm) zamontowaną na 3-osiowym gimbalu (stabilizatorze).

• Osnowa fotogrametryczna

Kolejnym zadaniem było zaprojektowanie i założenie osnowy fotogrametrycznej. Zasadniczo fotopunkty powinny znaleźć się na brzegach bloków zdjęć i właśnie w taki sposób starałem się je rozmieścić. Ostatecznie pomierzyłem ich 24 na obszarze Muzeum Wsi Mazowieckiej i w jego bliskim sąsiedztwie. Regularne rozmieszczenie fotopunktów okazało się niemożliwe ze względu na pokrycie mierzonego terenu – lasy, wody, budynki itp. Wykorzystałem 10 płacht fotogrametrycznych w białą-czarną szachownicę o wymiarach 0,5 m x 0,5 m, które rozlokowałem w miejscach, gdzie trudno było o fotopunkty niesygnalizowane (naturalne) – na polach, łąkach czy w okolicach lasu. Pozostałe 14 fotopunktów to m.in. narożniki budynków oraz punkty załamania krawędzi.

Pomiar metodą RTK z poprawkami NAWGEO z ASG-EUPOS wykonałem odbiornikiem GNSS Leica GS15 z kontro-



Pomiar osnowy fotogrametrycznej

lerem CS15. Otrzymałem współrzędne fotopunktów w układzie współrzędnych płaskich 2000 oraz wysokościowym PL-KRON86-NH.

• Wykonanie nalotu

Praca w terenie zajęła mi dwa dni (13 i 14 października 2017 r.). Warunki atmosferyczne w tym czasie nie były sprzyjające (porywisty wiatr do nawet 20 m/s, zmienne zachmurzenie, niewielkie opady), jednak ze względu na wcześniejsze uzgodnienia z władzami muzeum oraz dostępność sprzętu pomiary nie mogły zostać przesunięte. Pierwszy dzień upłynął mi na założeniu i pomiarze osnowy oraz wykonaniu nalotu na potrzeby wygenerowania ortofotomapy, drugi poświęciłem na naloty do modeli 3D.

Będąc posiadaczem świadectwa UAVO VLOS, naloty półautonomiczne w zasięgu wzroku mogłem wykonać sam. Przed każdą misją sprawdzałem stan technicz-

ny BSL oraz kamery; w trakcie pomiarów działały bez zastrzeżeń. Ostatecznie wcześniej wypracowana koncepcja zmieniła się w niewielkim stopniu. Wykonałem 10 nalotów o następujących parametrach:

- 4 ogólne (GSD 4-5 cm) – 1 na wysokości 110 m, 3 na wysokości 120 m;

- 4 metodą „double grid” (GSD około 3 cm) – po jednym: na wysokości 70 m i dla kąta nachylenia kamery 60°, na wysokości 50 m i dla kąta nachylenia kamery 45°, na wysokości 60 m i dla kąta nachylenia kamery 50°, na wysokości 70 m i dla kąta nachylenia kamery 55° (nalotami tymi objęto wieś rzędowną oraz zespół karczemny i dworski);

- 2 metodą „circular mission” (GSD około 2 cm) – 1 na wysokości 40 m, zdjęcia co 7°, 1 na wysokości 25 m, zdjęcia co 10° (nalotami tymi objęto kościół i wiatrak).

Następnym etapem pracy była ocena i selekcja zbioru obserwacyjnego pole-

Wyniki aerotriangulacji

Projekt	Liczba zdjęć (w tym zorientowanych)	Osnowa fotogrametryczna	RMS dla fotopunktów [cm]			RMS dla punktów kontrolnych [cm]		
			X	Y	Z	X	Y	Z
Agisoft wszystkie zdjęcia	908 (908)	24 fotopunkty	13,78	15,62	18,26	-	-	-
Pix4D zdjęcia z nalotów ogólnych	595 (594)	19 fotopunktów, 5 punktów kontrolnych	8,26	7,93	4,05	13,77	7,1	10,06
Pix4D wszystkie zdjęcia	908 (876)	24 fotopunkty	13,17	9,74	17,18	-	-	-



Modele 3D mesh wiatraka koźlaka oraz wsi rzędowej

gająca na wybraniu materiałów do przetworzenia oraz odrzuceniu zdjęć niemających wartości w inwentaryzacji. W jej wyniku zostało 908 zdjęć.

• Przetwarzanie zdjęć

Do opracowania fotografii wykorzystałem dwa programy: Pix4D Mapper oraz Agisoft Photoscan Pro. Założyłem trzy projekty, w których przetworzeniu poddałem wszystkie zdjęcia (zarówno w aplikacji Pix4D, jak i Agisoft) oraz tylko z nalołów ogólnych (Pix4D). Po wczytaniu zdjęć i parametrów kamery aplikacje wykonały orientację zdjęć na podstawie danych z odbiornika GNSS drona oraz wyszukanych automatycznie punktów wiążących. Na tak zorientowanych zdjęciach wykonałem pomiar fotopunktów (osnowy fotogrametrycznej pomierzonej w terenie) oraz manualnie wprowadzonych punktów wiążących (dodanych w celu lepszego dopasowania zdjęć). Następnie przeprowadziłem proces aerotriangulacji (wyniki w tabeli na poprzedniej stronie).

Jak widać, dokładność aerotriangulacji dla zdjęć z nalołów ogólnych (GSD około 4,3 cm) mieści się w zwyczajowo przyjmowanej dopuszczalnej wartości 1,5-2 pikseli. Nieco gorzej jest, jeże-

li chodzi o wszystkie zdjęcia (GSD około 4,1 cm), gdyż tam przekracza 2 piksele. W celu sprawdzenia dokładności ortofotomapy wygenerowanej przez program Pix4D oprócz fotopunktów wprowadziłem także 5 pkt kontrolnych rozrzuconych po całym obszarze objętym projektem.

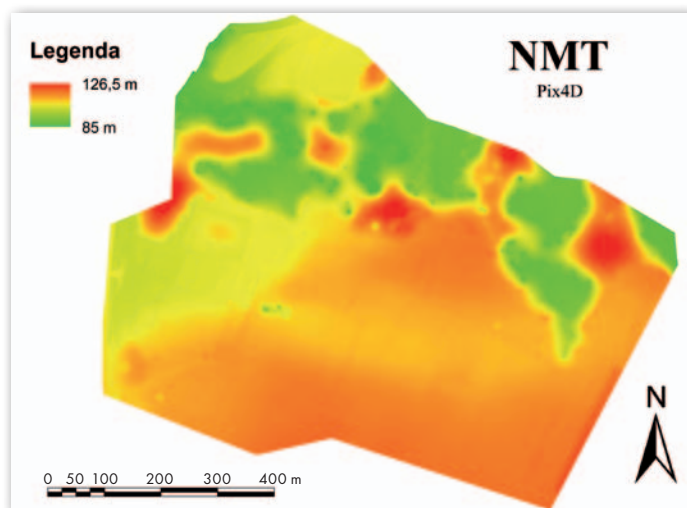
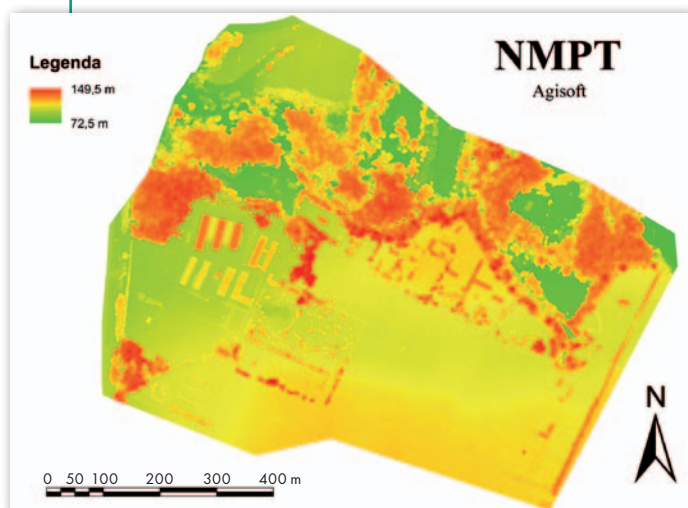
Efektom tej części opracowania była orientacja wewnętrzna i zewnętrzna zdjęć oraz zorientowana w przyjętym układzie współrzędnych rzadka chmura punktów, którą następnie zagęściłem w celu otrzymania produktów końcowych. Chmura na podstawie fotografii z nalołów ogólnych liczyła ostatecznie 39 mln pkt (Pix4D), a chmury ze wszystkich zdjęć – 58 mln pkt (Pix4D) oraz 55 mln pkt (Agisoft).

• Modele i ortofotomapy

Na podstawie chmur punktów stworzyłem oteksturowaną siatkę trójkątów *mesh*. Kościół i wiatrak koźlak (objęte nalołem metodą „circular mission”) udało się odwzorować na poziomie LoD 3, a więc pokazane zostały wszystkie elementy o wymiarach większych niż 0,5 m. Pozostałe obiekty charakteryzują się szczegółowością do 2 m, czyli mieszczą się w standardzie LoD 2.

Chmury punktów posłużyły też do wygenerowania numerycznego modelu terenu (GSD 25 cm) oraz numerycznego modelu pokrycia terenu (GSD 5 cm). Algorytmy programów tworzące NMT automatycznie wykrywały potencjalne obiekty niebędące terenem i dokonywały interpolacji pod nimi. Sprawdzenie dokładności NMT i NMPT okazało się kłopotliwe, ponieważ nie mierzyłem punktów wysokościowych i profili w terenie. Zgrubną „naoczną” ocenę można przeprowadzić, odwiedzając muzeum. Na podstawie wizyty w terenie mogę stwierdzić, że w dość dobry sposób oddają one charakter terenu i jego wysokości, oczywiście z wyjątkami. NMT jest zdecydowanie mniej pewny ze względu na wykorzystanie interpolacji. Błędy można dostrzec szczególnie w nadrzecznych lasach, gdzie wysokość terenu jest wyraźnie zawyżona.

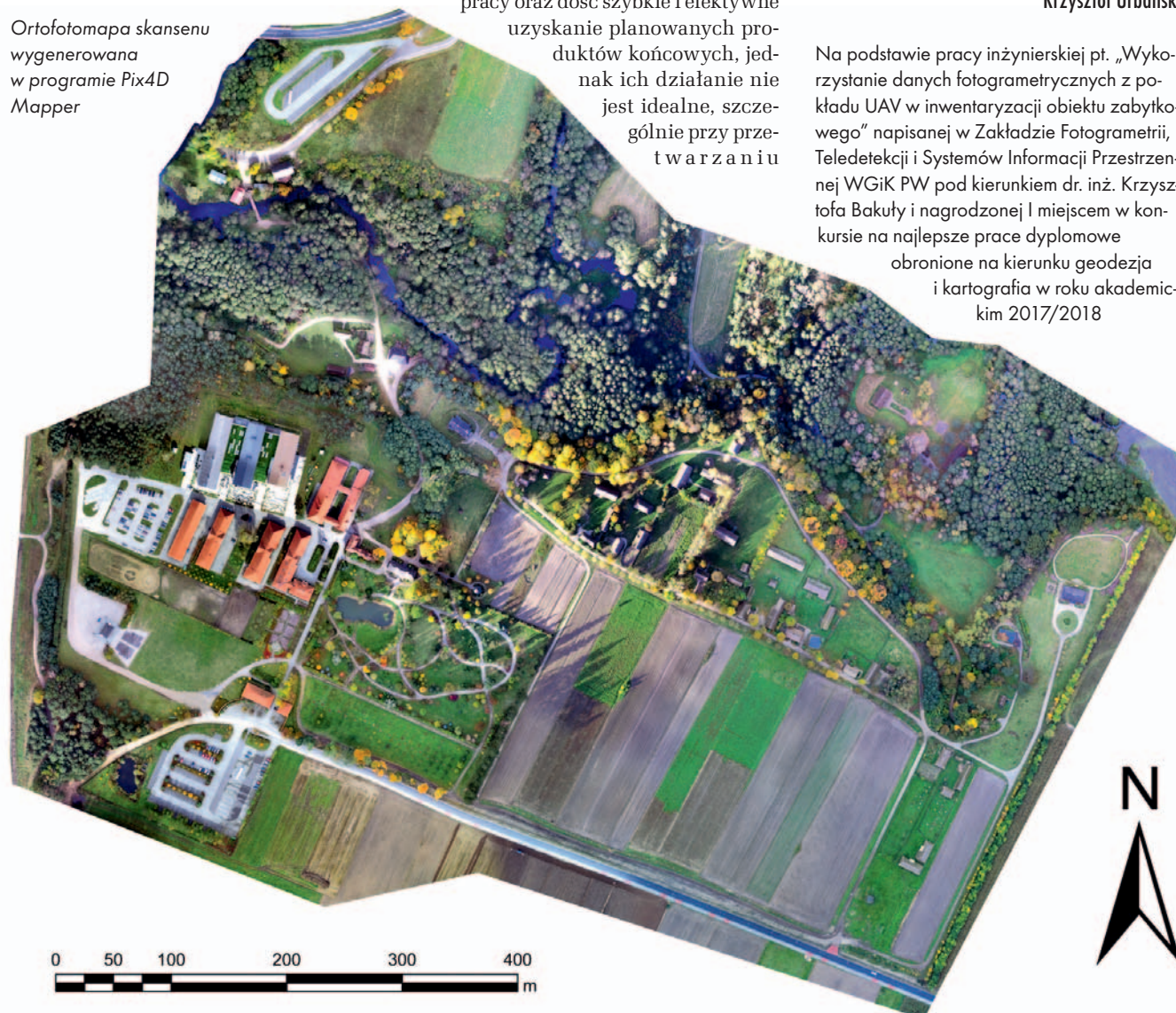
Ortofotomapę (GSD 5 cm) – wygenerowaną na podstawie NMT i zdjęć – opracowałem zarówno w programie Agisoft Photoscan Pro (wszystkie zdjęcia), jak i Pix4D Mapper (zdjęcia tylko z nalołu ogólnego). Aby sprawdzić jej jakość geometryczną, wyznaczyłem wektory między punktami pomierzonymi na or-



Numeryczne modele obszaru muzeum: pokrycia terenu (GSD 5 cm) i terenu (GSD 25 cm)

tofotomapach i porównałem je z danymi z pomiaru terenowego. Błąd średni kwadratowy sytuacyjny dla ortofotomapy w przypadku oprogramowania Pix4D wyniósł 17 cm, a w Agisoft – 32 cm, tj. około sześciokrotność piksela terenowego. W klasycznej fotogrametrii lotniczej dokładność ortofotomapy powinna wynosić 2-3 piksele, lecz w przypadku zobrazowań z niskiego pułapu spełnienie tego kryterium nie zawsze jest możliwe. Błąd takiej ortofotomapy może być szacowany na poziomie 3-4 pikseli terenowych. Wynika to przede wszystkim z bardzo dużej rozdzielczości (piksel jest mniejszy niż dokładność danych referencyjnych). Uzyskany błąd sytuacyjny ortofotomapy z programu Pix4D należy uznać zatem za spełniający wymagane dokładności z racji jakości materiału pomiarowego, właściwej sygnalizacji (minimalizuje błąd identyfikacji fotopunktów) oraz pomiaru fotopunktów i punktów kontrolnych, a także odpowiedniego przetworzenia zdjęć.

Ortofotomapa skansenu
wygenerowana
w programie Pix4D
Mapper



• Od zdjęć z drona do geoportalu?

Niewątpliwie opracowania z bezzałogowych statków latających to temat ciekawy i rozwojowy. Patrząc na obecne trendy, należy spodziewać się coraz częstszego wykorzystania dronów w zagadnieniach inżynierskich. Dzięki zaawansowanemu oprogramowaniu fotogrametrycznemu możliwe stało się zastosowanie zdjęć z BSL do generowania modeli 3D i ortofotomap np. do inwentaryzacji zabytków. Opisywana przeze mnie tematyka jest stosunkowo nowa, tym bardziej na taką skalę.

Wykorzystanie drona Phantom 3 Standard okazało się trafionym pomysłem, choć nie jest to konstrukcja przeznaczona typowo do fotogrametrii. Pozwolił on na szybki pomiar obiektów, które są zwykle niedostępne dla tradycyjnych metod.

Przed rozpoczęciem projektu należy nakreślić cel, jaki ma być osiągnięty i do niego dobrać odpowiednie postępowanie oraz oprogramowanie. Agisoft Photoscan Pro oraz Pix4DMapper pozwalają na pewną automatyzację kolejnych etapów pracy oraz dość szybkie i efektywne

uzyskanie planowanych produktów końcowych, jednak ich działanie nie jest idealne, szczególnie przy przetwarzaniu

dużej liczby zdjęć. Program Pix4D Mapper nie miał problemu z orientacją zdjęć ortogonalnych, jednak przy skośnych pojawiły się trudności. Jego zaletą jest również zdecydowanie szybsze i wymagające mniejszej ilości pamięci oraz mocy obliczeniowej działanie. Agisoft natomiast posiada bardzo dobre algorytmy do orientacji zdjęć (lepsze niż w przypadku Pix4D), ale potrzebuje bardzo dużo czasu i mocnego komputera.

Ogólnie rzecz biorąc, wyniki są zadowalające, a zaplanowane produkty zostały wykonane. Ortofotomapa spełnia założoną wielkość piksela terenowego ($GSD \leq 5 \text{ cm}$), podobnie NMPT, modele 3D mają natomiast dokładność na poziomie co najmniej zbliżonym do LoD 2.

W przyszłości możliwe jest udostępnienie tych danych szerokiemu gronu odbiorców. Wiązałoby się to jednak ze stworzeniem geoportalu, a także podpisaniem porozumienia z Muzeum Wsi Mazowieckiej o przekazaniu efektów pracy w użytkowanie. Byłoby to na pewno właściwe zwieńczenie tego eksperymentu.

Krzysztof Urbański

Na podstawie pracy inżynierskiej pt. „Wykorzystanie danych fotogrametrycznych z pokładu UAV w inwentaryzacji obiektu zabytkowego” napisanej w Zakładzie Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej WGiK PW pod kierunkiem dr. inż. Krzysztofa Bakuty i nagrodzonej I miejscem w konkursie na najlepsze prace dyplomowe obronione na kierunku geodezja i kartografia w roku akademickim 2017/2018