

mgr Jakub ŚLEDZIOWSKI

Uniwersytet Szczeciński, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Badań Miast i Regionów
University of Szczecin, Faculty of Geosciences, Department of Cities and Regions Research

ZASTOSOWANIE NISKOBUDŻETOWYCH BEZZAŁOGOWYCH PLATFORM W ANALIZACH PRZESTRZENNYCH I W CYFROWEJ ARCHIWIZACJI ZABYTKÓW

Streszczenie

Wstęp i cele: W ostatnich latach obserwuje się niezwykle dynamiczny rozwój bezzałogowych statków powietrznych (BSP) oraz praktycznego ich zastosowania w wielu dziedzinach. Zaawansowana elektronika, urządzenia GPS, w powiązaniu z precyzyjną optyką cyfrowych aparatów zamontowanych na pokładzie bezzałogowców, w wielu przypadkach mogą zastąpić kosztowne, tradycyjne naloty fotogrametryczne samolotem. W artykule podjęto się próby zbadania, możliwości wykorzystania średniej klasy niskobudżetowego BSP do celów analiz przestrzennych, digitalizacji obiektów zabytkowych oraz tworzenia na podstawie zebranego materiału teksturovani modeli 3D.

Materiał i metody: W tym celu w oparciu o autonomiczne loty lub w wyniku ręcznego sterowania pojazdem pozyskano w okolicach Szczecina dane cyfrowe, które posłużyły do opracowania ortofotomap, numerycznych modeli pokrycia terenu oraz modeli 3D.

Wyniki: Wykonano opracowania danych zabytkowego wiatraka z XIX w, pomnika Adama Mickiewicza, stadionu sportowego im. Floriana Krygiera oraz 3 różnych krajobrazów przestrzeni w Szczecinie. Analiza wykonanych prac pozwala stwierdzić, że materiały pozyskane za pomocą omawianego typu pojazdu są dobrym źródłem danych do dalszych opracowań. Niskobudżetowe BSP są też dobrym narzędziem do cyfrowej archiwizacji zabytków architektury, czy audytu krajobrazu.

Wniosek: Automatyzacja procesów pozyskiwania danych oraz ich późniejszego cyfrowego przetwarzania powoduje, że coraz tańsze obecnie platformy BSP, w przyszłości powinny pojawić się w standardowym wyposażeniu każdego wydziału planowania przestrzennego, architektów, audytorów krajobrazu i wszystkich innych jednostek, zajmujących się badaniem przestrzeni.

Słowa kluczowe: Bezzałogowe platformy, zabytki, archiwizacja przestrzenna i cyfrowa.

(Otrzymano: 27.04.2017; Zrecenzowano: 05.05.2017; Zaakceptowano: 10.05.2017)

APPLICATION OF LOW-COST UNMANNED PLATFORMS IN SPATIAL ANALYSIS AND IN DIGITAL ARCHIVES OF MONUMENTS

Abstract

Introduction and aims: In recent years the dynamic development of unmanned aerial vehicles (BSPs) has been observed and practiced in a number of areas. Advanced electronics, GPS devices, coupled with the precision optics of digital cameras mounted on board unmanned vehicles, can in many cases replace costly traditional photogrammetric air strikes by plane. The article attempts to investigate the possibility of using the middle-class BSP low-budget for spatial analysis, digitization of historical objects and the creation of collected 3D textured material on the basis of collected material.

Material and methods: For this purpose, based on autonomous flights or as a result of manual control of the vehicle, digital data were collected around Szczecin for the development of orthophotomaps, numerical terrain models, and 3D models.

Results: The data of the historic windmill from the 19th century, Adam Mickiewicz memorial, sports stadium for them. Florian Krygiera and 3 different landscape landscapes in Szczecin. An analysis of the work carried out allows us to conclude that the materials obtained with this type of vehicle are a good source of data for further studies. Low-cost BSPs are also a good tool for digital archives of architectural monuments or landscape audits.

Conclusion: Automation of data acquisition processes and their subsequent digital processing will result in more and more affordable BSP platforms, in the future, in the standard equipment of each spatial planning department, architects, landscape auditors and all other space exploration units.

Keywords: Unmanned platforms, monuments, spatial and digital archives.

(Received: 27.04.2017; Revised: 05.05.2017; Accepted: 10.05.2017)

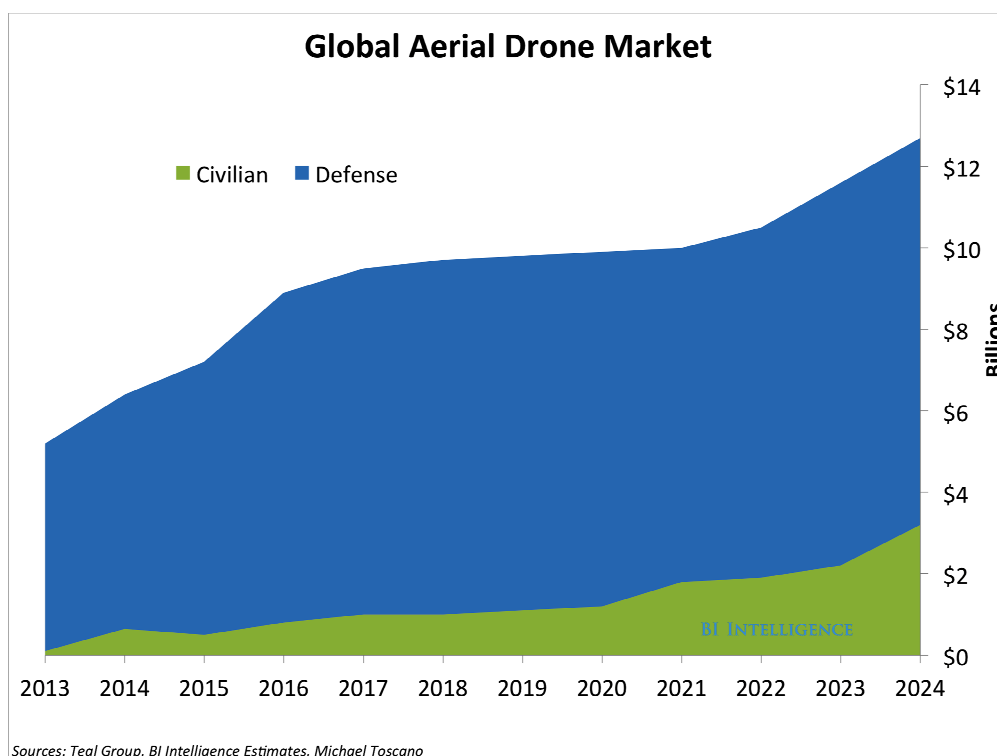
1. Wstęp

W 2011 roku w ZÜRICHU odbyła się konferencja naukowa pt. „Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics” (*Bezzałogowe Statki Powietrzne w Geomatyce*), w trakcie której wskazano wiele nowych obszarów badawczych, związanych z Bezzałogowymi Statkami Powietrznymi [6]. Także podczas XXII kongresu Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji (*ang. ISPRS*), który odbył się w 2012 roku w Melbourne, jednym z najważniejszych tematów, jakie były wówczas poruszane był wzrost wykorzystania Bezzałogowych Statków Powietrznych (BSP) do pozyskiwania obrazów fotogrametrycznych i teledetekcyjnych różnych rejonów z małych wysokości oraz stosowanie ich z powodzeniem dla wielu typów projektów i sytuacji kryzysowych [2].

Aktualna problematyka badawcza skupia się głównie na rozwoju systemów BSP, analizie ich wykorzystania, nowych konstrukcji, czy automatyzacji procesów związanych z przetwarzaniem pozyskiwanych danych [3].

Wśród wielu wskazanych w ZÜRICHU obszarów badawczych, zwrócono też uwagę na możliwości zastosowania niskobudżetowych bezzałogowców w profesjonalnych usługach cywilnych. Jest to o tyle istotne, ponieważ analizując rozwój bezzałogowców, należałoby na wstępie wspomnieć o ich pierwotnym przeznaczeniu, czyli zastosowaniu w warunkach bojowych i operacjach wojskowych. Szerzej ten temat podejmuje Becmer i Romanek [1], gdzie przytaczają historię powstania pierwszych BSP oraz szczegółowy podział w zależności od funkcji pojazdów. Wskazują też trend „związany z dążeniem do konstruowania małych, tanich, efektywnych i o optymalnych charakterystykach technicznych bezzałogowych systemów latających, które swoimi możliwościami zaczynają dorównywać dużym statkom”.

Udział zarówno wojskowych jak i cywilnych bezzałogowców w światowym rynku wzrastać będzie bardzo intensywnie przez następne kilka lat, o czym informuje Business Insider w „The Drones Report” (2016) (Rys. 1).



Rys. 1. Prognoza rozwoju światowego rynku BSP w latach 2013-2024
 Fig. 1. Prognosis of the development of the global BSP market in 2013-2024

Źródło/Source: Teal Group, BI Intelligence Estimates, Michael Toscano, 2016

Obecnie możliwości małych cywilnych bezzałogowców są na tyle duże, że znajdują zastosowanie w wielu branżach, począwszy od rolnictwa, poprzez geodezję, górnictwo, przemysł, ratownictwo, film, reklamę, itp. Pozostaje jednak pytanie, czy średniej klasy platforma BSP może być równie przydatna do pozyskiwania szczegółowych danych przestrzennych? Czy niskobudżetowe pojazdy, poza możliwością robienia zdjęć i filmów z powietrza nadają się też do analiz przestrzennych?

Czy w końcu patrząc przez pryzmat aktualnego projektu rozporządzenia¹ do ustawy z dnia 27 marca 2003 r. w sprawie sporządzania audytów krajobrazowych, taka platforma może posłużyć jako narzędzie do inwentaryzacji krajobrazu na podstawie cyfrowych ortofotomap z obrazów pozyskanych z niskiego pułapu oraz pogładowych modeli 3D krajobrazu lub cyfrowej archiwizacji obiektów przestrzennych, np. zabytków architektury?

Aby móc odpowiedzieć na powyższe pytania, przeprowadzono w 2016 r. badania terenowe z wykorzystaniem średniej klasy niskobudżetowego BSP, a następnie wykonano próbę przetworzenia tych danych w postaci cyfrowej, w celu weryfikacji możliwości zastosowania tego typu statków powietrznych do szybkiego tworzenia cyfrowych modeli 3D zabytków architektury oraz modeli krajobrazów.

2. Metody badań

Badania podzielone zostały na dwa etapy: pozyskiwania danych przestrzennych oraz cyfrowego przetwarzania uzyskanego materiału do postaci modeli 3D. Najpierw wykonano niskopułapowe naloty fotogrametryczne przy użyciu bezzałogowego statku powietrznego, następnie uzyskane dane poddawano obróbce cyfrowej.

2.1. Badania terenowe

W pierwszym etapie, do pozyskania zdjęć lotniczych wykorzystano średniej klasy wielowirnikowiec Inspire 1 firmy DJI (Rys. 3). Jest to wiodący producent na rynku bezzałogowców, który w 2015 r. w USA obejmował 75% sprzedaży tych produktów (*Bard College, FAA data, 2015*) - (Rys. 2). Głównym przeznaczeniem tego pojazdu jest filmowanie z powietrza i zdjęcia lotnicze (jako standardowe wyposażenie może posiadać dwa kontrolery, jeden do obsługi pojazdu a drugi do obsługi kamery).

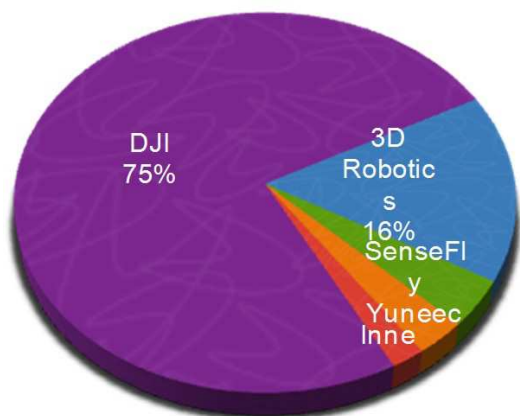
Pojazd waży 2,9 kg i ma następujące wymiary: 438×451×301 mm. Na pokładzie tego bezzałogowca zainstalowana została niemetryczna kamera FC350 o maksymalnej liczbie aktywnych pikseli 12,4 M, co pozwala na wykonywanie zdjęć w maksymalnej rozdzielczości 4000×3000 pikseli przy zakresie ISO 100-1600. Kamera posiadała wbudowany obiektyw o parametrach f/2.8 20 mm z soczewką asferyczną, bez możliwości wymiany.

Optyka stabilizowana była wbudowanym gimbałem Zenmuse X3 z zakresem kątowym drgań ±0.03°. Pojazd sterowany był za pomocą dedykowanego nadajnika DJI oraz z wykorzystaniem telefonu iPhone marki Apple.

W roku 2016 w okresie od stycznia do maja wykonanych zostało sześć lotów badawczych w rejonie Szczecina. Każdy lot zrealizowany był w innym obszarze i przedstawiał różne obiekty lub krajobrazy.

Cześć opracowań było zrealizowanych za pomocą lotów autonomicznych. Oznacza to, że pojazd został wcześniej zaprogramowany, tj. ustalona została trasa lotu, jego kierunek, wysokość, prędkość, pokrycie poprzeczne i podłużne, punkt w którym mają być wykonane zdjęcia, ilość wykonanych zdjęć, parametry kamery (czas i ISO), czas lotu, miejsce startu i lądowania.

¹ <https://legislacja.rcl.gov.pl/projekt/12290958>



Rys. 2. Najpopularniejsze marki BSP w komercyjnych zastosowaniach na świecie w 2015
 Fig. 2. Most popular BSP brands in commercial applications around the world in 2015

Źródło/Source: Bard College, FAA data, WSJ.com

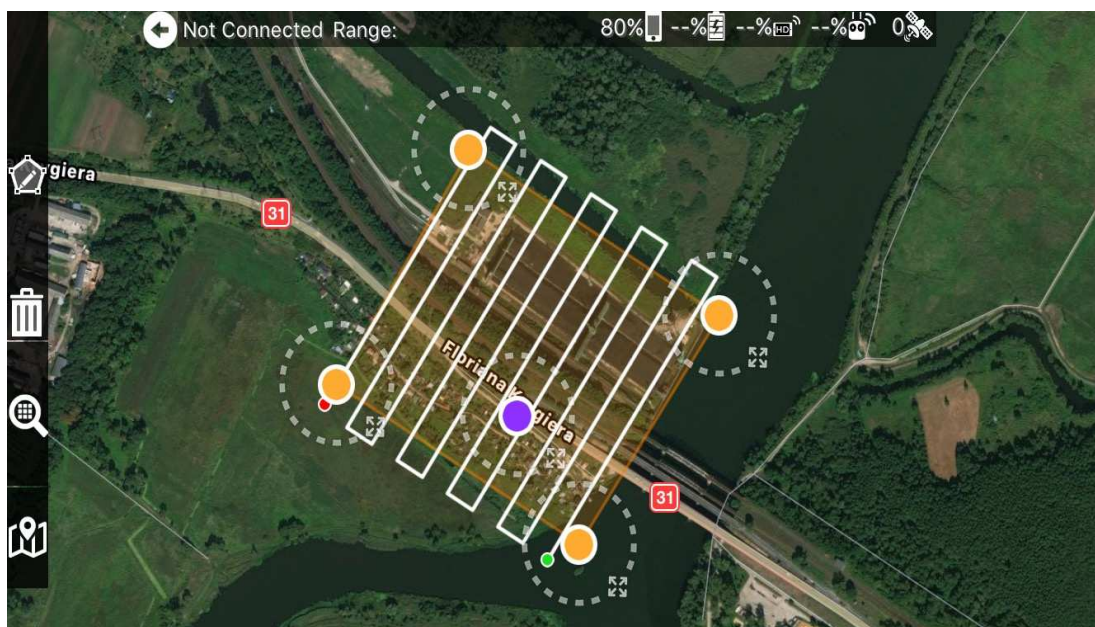


Rys. 3. Wielowirnikowiec Inspire 1 firmy DJI
 Fig. 3. Multi-rotor Inspire 1 of the firm DJI

Źródło/Source: DJI.com

Domyślne oprogramowanie firmy DJI do sterowania pojazdem nie pozwala na wykonanie takich operacji, dlatego konieczne było skorzystanie z dodatkowych aplikacji innych producentów. W tym celu przetestowane zostały 4 różne programy dedykowane do pojazdów marki DJI: *Pix4DCapture*, *DroneDeploy*, *Altizure* i *Map Pilot*. Na podstawie testów oprogramowania w terenie zdecydowano się ostatecznie na wybór oprogramowania *Map Pilot*. Przy planowaniu lotów za pomocą misji autonomicznych wybrane zostały następujące obszary:

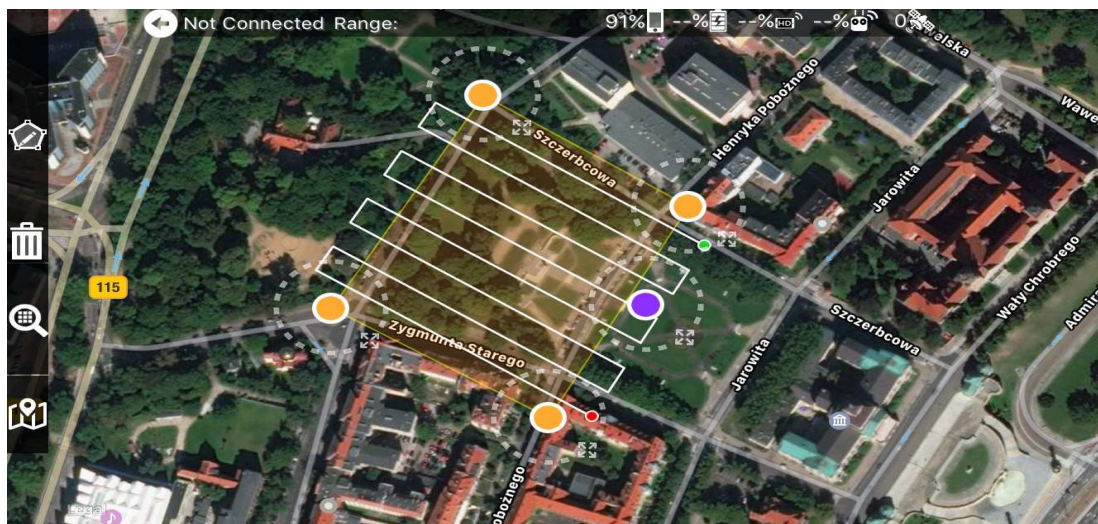
- Fragment ulicy Krygiera w Szczecinie z nasypem kolejowym i widocznym zróżnicowaniem ukształtowania terenu - nalot zrealizowany w styczniu 2016 r. Pozyskano 110 zdjęć w formacie JPG, wysokość lotu 115 m AGL (*ang. above ground level*), czas misji 8 minut, obszar 18,15 ha (Rys. 4).



Rys. 4. Widok zaplanowanej misji Nr 1 w programie Map Pilot
 Źródło: Opracowanie własne

Fig. 4. View of scheduled Mission No. 1 in Map Pilot program
 Source: Elaboration of the Author

- Pomnik Adama Mickiewicza w Parku Żeromskiego w Szczecinie - nalot zrealizowany w styczniu 2016 roku. W tej lokalizacji wykonano dwa loty o różnej charakterystyce: pierwszy autonomiczny na wysokości 45 m AGL, w trakcie którego pozyskano 96 zdjęć z obszaru 2,4 ha, czas misji wyniósł 7 minut. Ze względu na pierwotne założenie opracowania modelu 3D samego pomnika, zdecydowano także o drugim locie zrealizowanym za pomocą ręcznego sterowania pojazdem wokół samego pomnika. W trakcie tego lotu wykonano szereg nieregularnych zdjęć ukośnych i poziomych, w różnych odstępach od pomnika. Pozyskano wówczas 148 zdjęć w formacie JPG, na różnych wysokościach, a łączny czas misji wyniósł 15,5 minuty (Rys. 5).



Rys. 5. Widok zaplanowanej misji Nr 2 w programie Map Pilot

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 5. View of scheduled Mission No. 2 in Map Pilot program

Source: Elaboration of the Author

- Stadion im. Floriana Krygiera przy ul. Karłowicza w Szczecinie - nalot zrealizowany w marcu 2016 roku. Pozyskano 106 zdjęć w formacie JPG, wysokość lotu 65 m AGL, czas misji 7 minut, obszar 4,75 ha (Rys. 6).



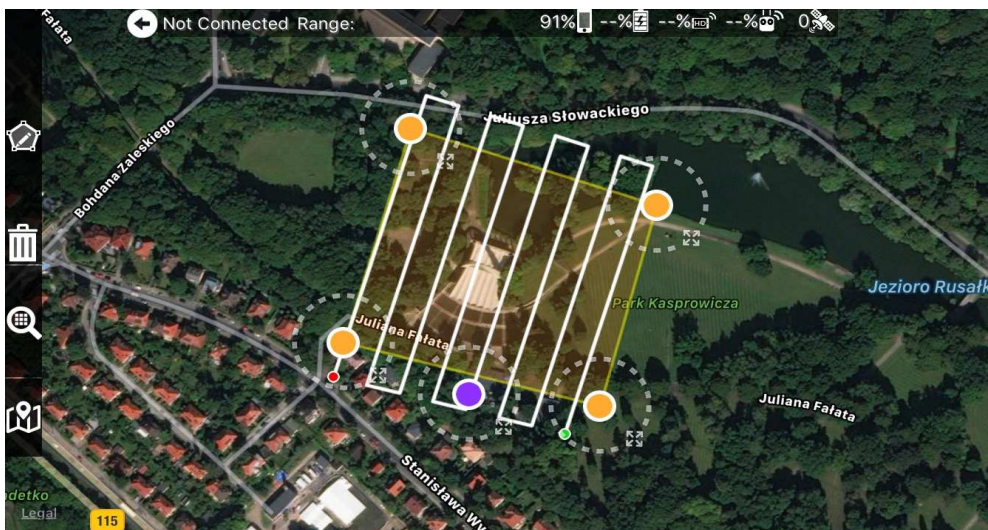
Rys. 6. Widok zaplanowanej misji Nr 3 w programie Map Pilot

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 6. View of scheduled Mission No. 3 in Map Pilot program

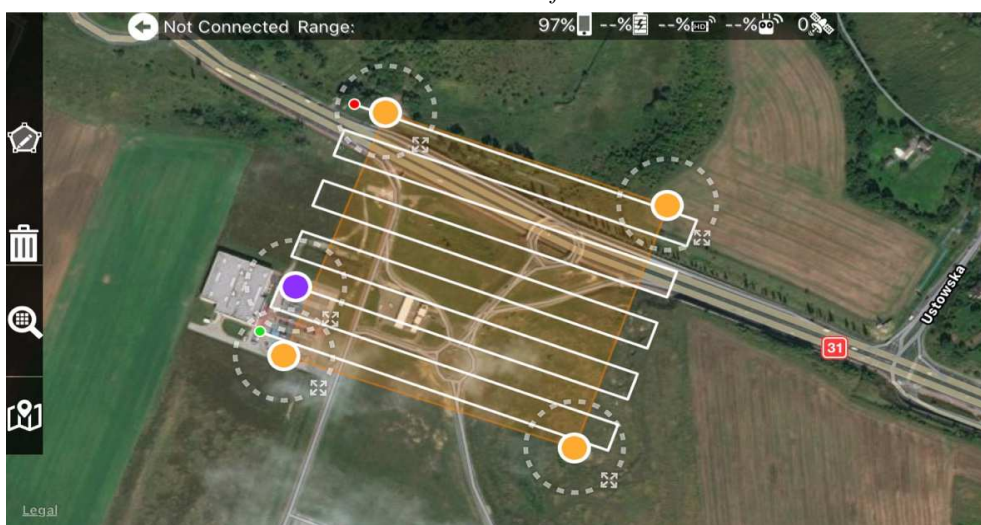
Source: Elaboration of the Author

- Zabytkowy wiatrak holenderski z końca XIX w. na ul. Mieszka I w Szczecinie. Nalot ten zrealizowany został w marcu 2016 roku. Aby ukazać szczegóły architektury obiektu, zrezygnowano w tym przypadku z misji autonomicznej na stałej wysokości, jak przy poprzednich obiektach. Materiał pozyskano wyłącznie ze zdjęć pionowych i zdjęć ukośnych wykonując loty okrężne wokół wiatraka na różnych wysokościach, za pomocą ręcznego sterowania pojazdem. Czas misji wyniósł 39 minut, pozyskano łącznie 297 zdjęć w formacie DNG.
- Teatr Letni im. Heleny Majdaniec w Parku Kasprowicza w Szczecinie. Nalot autonomiczny zrealizowany w marcu 2016 roku. Pozyskano 81 zdjęć w formacie JPG, czas misji wyniósł 5 minut, wysokość lotu 60 m AGL, obszar 3,45 ha (Rys. 7).
- Fragment ulicy Krygiera w Szczecinie, z wiszącym rondem, przy wjeździe do centrum handlowego - nalot zrealizowany w maju 2016 roku. Pozyskano 153 zdjęcia, wysokość lotu 70 m AGL, czas misji 12 minut, obszar 8,8 ha (Rys. 8).



Rys. 7. Widok zaplanowanej misji Nr 5 w programie Map Pilot
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 7. View of scheduled Mission No. 5 in Map Pilot program
Source: Elaboration of the Author



Rys. 8. Widok zaplanowanej misji Nr 6 w programie Map Pilot
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 8. View of scheduled Mission No. 6 in Map Pilot program
Source: Elaboration of the Author

2.2. Cyfrowe przetwarzanie danych

Do dalszego opracowania danych z pozyskanych zdjęć wykorzystano program *PhotoScan* firmy Agisoft. Aby zweryfikować przydatność średniej klasy BSP do analizy danych przestrzennych przyjęto założenie, że z każdego nalotu o ile będzie to możliwe, wygenerowana zostanie chmura punktów i teksturowany model 3D. Dodatkowo z lotów autonomicznych powinny powstać: „Numeryczny Model Pokrycia Terenu (*NMPT*, ang. *DSM - Digital Surface Model*), który przedstawia teren wraz z pokryciem (drzewa, zabudowa) oraz cyfrowa ortofotomapa lotnicza” [3] w postaci true-ortho, która jest „rzutem ortogonalnym wszystkich obiektów zarejestrowanych na zdjęciu, zarówno na powierzchni topologicznej terenu, jak i obiektów wystających ponad tę powierzchnię” [4].

Ponieważ wielowirnikowiec DJI Inspire 1 ma wbudowany w kamerę GPS, to każde zdjęcie posiadało już w metadanych zapis współrzędnych środka zdjęcia w układzie WGS84. W związku z faktem, że przedmiotem badań w tym przypadku nie była analiza dokładności tego systemu, a jedynie jego funkcjonalne zastosowanie do szybkiego pozyskiwania danych przestrzennych, stąd zrezygnowano w trakcie nalołów z dodatkowych pomiarów naziemnym urządzeniem GPS i pozyskiwania współrzędnych z fotopunktów, co docelowo powinno być wykonywane dla uzyskania precyzyjnych wyników. Cyfrowe przetwarzanie opierało się więc wyłącznie na danych pozyskanych bezpośrednio z bezzałogowego statku powietrznego i automatycznej analizie wytworzonych na ich podstawie produktów, gdzie sam proces generowania modeli w programie *PhotoScan* został maksymalnie uproszczony.

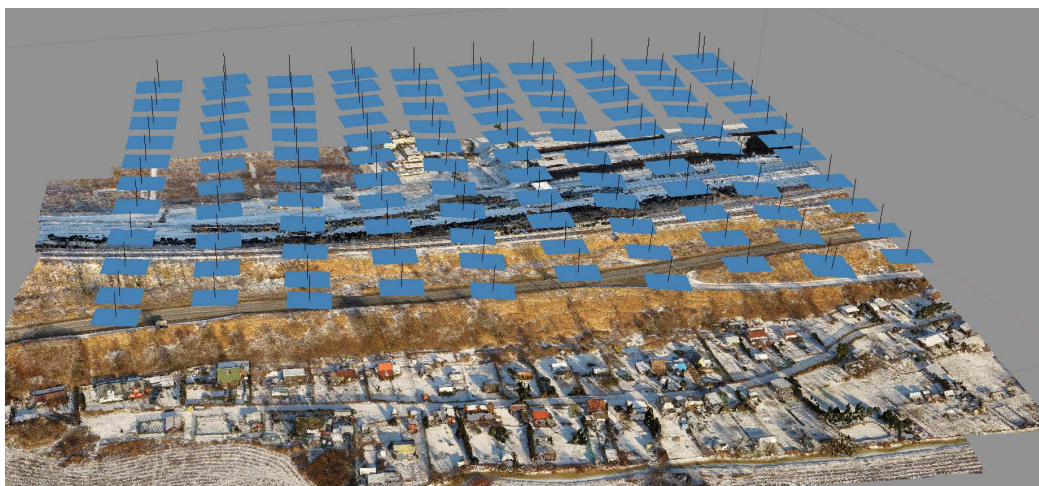
3. Wyniki

Aby stwierdzić przydatność użytego BSP do wykonywania poglądowych modeli 3D krajobrazu i obiektów architektonicznych, prace terenowe wykonywane były o różnych porach dnia, przy różnym nasłonecznieniu i temperaturze.

Przy niskiej temperaturze powietrza pojawiły się drobne problemy techniczne, ponieważ elektronika baterii w pojeździe DJI wyposażona jest w czujnik, który uniemożliwia start przy temperaturze poniżej 15°C. Ze względu na fakt, że niektóre loty były wykonywane zimą, konieczne było wówczas dodatkowe ogrzewanie baterii przed każdym startem. Z powodu zimna zdarzyło się też dwa razy samoczynne wyłączenie telefonu w trakcie misji, co skutkowało koniecznością powtórzenia całej operacji. W trakcie prac bateria litowo-polimerowa o pojemności 4500 mAh i napięciu 22,2V pozwalała na wykonanie lotu o maksymalnej długości ok. 12 minut, ale nie we wszystkich przypadkach ten czas był odpowiedni. Zastosowanie baterii o pojemności 5700 mAh i napięciu 22,8V pozwoliło docelowo na wydłużenie pojedynczego lotu do ok. 15 min. Z założenia wszystkie loty autonomiczne były tak planowane, aby mogły być zrealizowane na jednej baterii, pomimo tego, że w istniała możliwość podzielenia misji i dokończenia jej na drugiej baterii, jeśli byłaby taka konieczność.

Do planowania lotów najbardziej praktyczny okazał się program *Map Pilot*, który pozwalał na swobodne wyznaczanie trasy i konfigurację wszystkich wymienionych wcześniej parametrów, a w czasie lotu przekazywał maksymalną ilość informacji na temat statku powietrznego (jego aktualnej pozycji, stanu baterii, czasu do końca misji, prędkości pojazdu, wysokości, odchylenia od wyznaczonego wcześniej miejsca zdjęcia i pozycji wykonanego zdjęcia, podgląd na żywo zdjęcia, stan baterii nadajnika, odbiornika oraz telefonu, ilość dostępnych w czasie lotu satelitów). *Map Pilot* pozwalał też na korekcję ustawień parametrów kamery w czasie lotu, na wypadek gdyby pierwotne ustawienia po wzniesieniu pojazdu okazały się niewłaściwe. Program ten jako jedyny miał też taką zaletę, że pozwalał na planowanie i zapisywanie misji w trybie offline, czyli bez konieczności połączenia z BSP, a każdą zapisaną wcześniej misję można było swobodnie uruchomić na miejscu startu. Dlatego też przy wszystkich misjach autonomicznych wykorzystano właśnie program *Map Pilot*.

Fragment ulicy Krygiera w Szczecinie wybrano ze względu na widoczne w małym obszarze znaczne różnice wysokości. Ulica biegnie pomiędzy obniżonym terenem działek rekreacyjnych i wysokim nasypem kolejowym, za którym znajduje się mniejszy nasyp oraz dwie niewielkie hałdy węgla. Aby utworzyć z tego krajobrazu teksturowany model 3D, wykonano w pełni autonomiczną misję bezzałogowym statkiem powietrznym. Poprzeczne i podłużne pokrycie zdjęć wynosiło 70%. W każdym z 10 szeregów wykonanych zostało 11 zdjęć. W trakcie obróbki cyfrowej, po rozsunięciu pozycji zdjęć w podglądzie programu widać ich nieregularne rozłożenie względem siebie oraz obrót względem osi kierunku lotu (Rys. 9). Zdjęcia były realizowane pomiędzy godziną 13⁰⁰ a 14⁰⁰, przez co na obrazie widoczne są już długie cienie drzew i zabudowań, a teren za wysokim nasypem pozostaje w cieniu.



Rys. 9. Widok rozkładu zdjęć z misji autonomicznej

Źródło: Opracowanie własne

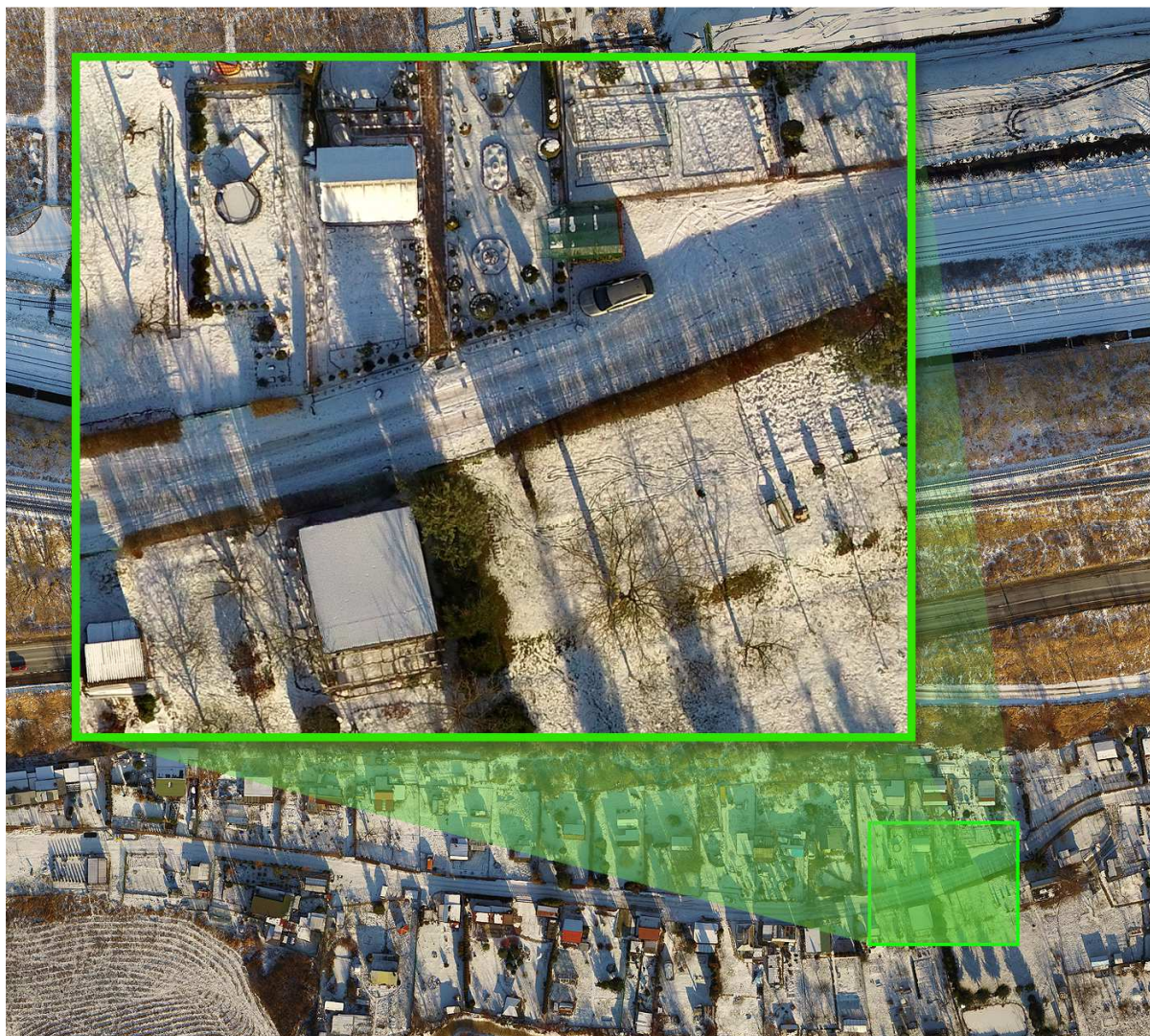
Fig. 9. View of the photo distribution of the autonomous mission

Source: Elaboration of the Author

Pomimo tak słabego oświetlenia, utworzona na podstawie zdjęć ortofotomapa z pozyskanego obszaru oddaje dużo istotnych szczegółów obrazu, co pozwala na dobrą analizę badanej przestrzeni (Rys. 10). W kilku zacienionych miejscach nasypu kolejowego widoczne są małe braki w pokryciu obrazu, ale nie dyskwalifikują one w tym przypadku całego obrazu do celów poglądowych. Na szczycie najwyższego nasypu widoczne są też nieregularne kształty 8 wagonów kolejowych, natomiast analizując wagony znajdujące się na niższym nasypie i poniżej jego kształt ich pozostaje regularny. Górne wagony mimo dobrego oświetlenia nie zostały dobrze zarejestrowane, ponieważ w chwili realizowania misji, wagony te cały czas poruszały się i zwyczajnie „uciekały” z obrazu (Rys. 11).

Na podstawie zebranych zdjęć wygenerowano Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT), który czytelnie prezentuje poziom ukształtowania powierzchni i różnice wysokości. Na jego podstawie można też wykonać Numeryczny Model Terenu (NMT), usuwając wystające ponad powierzchnię elementy. Do oceny krajobrazu, tworzenia przekrojów lub analiz przestrzennych tego typu opracowania doskonale się nadają (Rys. 12).

Opracowanie chmury punktów i teksturowanego modelu 3D z uzyskanych zdjęć za pomocą BSP nie stanowiło większego problemu, a końcowy efekt był zadowalający (Rys. 13). Pomimo widocznych zniekształceń niektórych obiektów model mógłby posłużyć do właściwej oceny krajobrazu czy dalszych analiz przestrzennych. Przy pomniku Adama Mickiewicza w Szczecinie istotne było uzyskanie detali samego pomnika oraz jego otoczenia. W pierwszym opracowaniu z nalogu autonomicznego nie udało się uzyskać zadowalających efektów w modelu 3D, pomnik tylko w podstawie zachował część swojej bryły, a okalające go murki miały pofalowane kształty (Rys. 13).



Rys. 10. Przybliżony fragment ortofotomapy ulicy Krygiera w Szczecinie

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 10. An approximate fragment of the orthophotomap of Krygier Street in Szczecin

Source: Elaboration of the Author

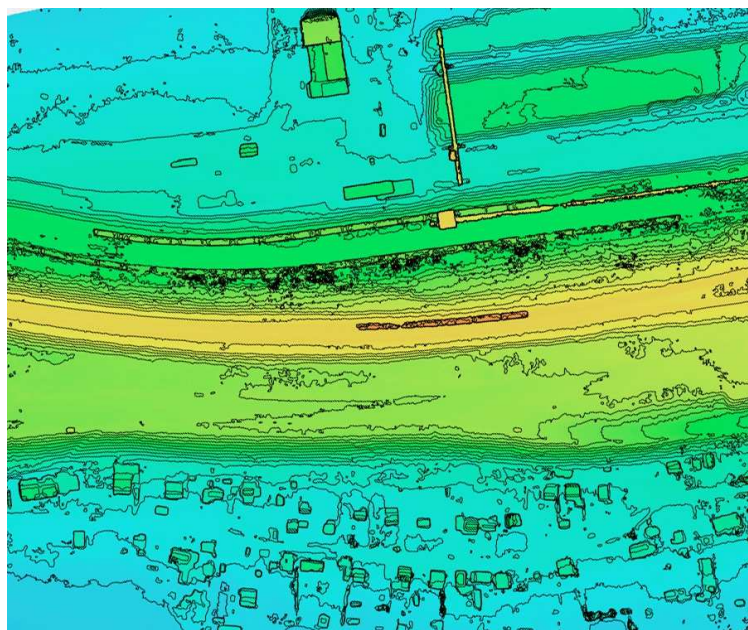


Rys. 11. Braki i deformacja wagonów na ortofotomapie ulicy Krygiera w Szczecinie

Źródło: Opracowanie własne

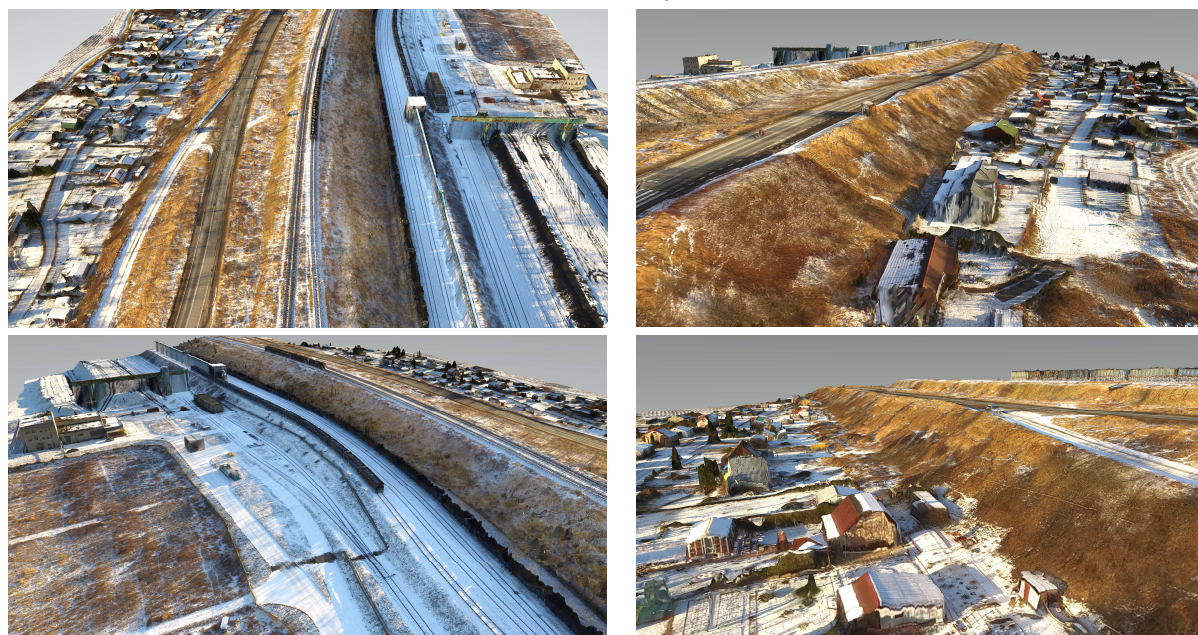
Fig. 11. Deficiencies and deformation of wagons on the orthophotomap of Krygier Street in Szczecin

Source: Elaboration of the Author



Rys. 12. Numeryczny Model Pokrycia Terenu fragmentu ulicy Krygiera w Szczecinie
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 12. Numerical Model of Area Covering a fragment of Krygier Street in Szczecin
Source: Elaboration of the Author



Rys. 13. Teksturowany model 3D fragmentu ulicy Krygiera w Szczecinie
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 13. Textured 3D model of a fragment of Krygier Street in Szczecin
Source: Elaboration of the Author

Do drugiego opracowania wykorzystano tylko nieregularne zdjęcia wykonane wokół konstrukcji pomnika w różnych płaszczyznach i odległościach. Końcowy efekt pozwolił na uzyskanie detali architektonicznych murków oraz bryły pomnika, co spełniło pierwotne założenia a uzyskany model 3D dobrze oddaje zabytkowy obiekt (Rys. 14).

Z danych pozyskanych nad stadionem im. Floriana Krygiera przy ul. Karłowicza w Szczecinie wykonana została w pierwszej kolejności ortofotomapa (Rys. 14) i numeryczny model pokrycia terenu (Rys. 15).



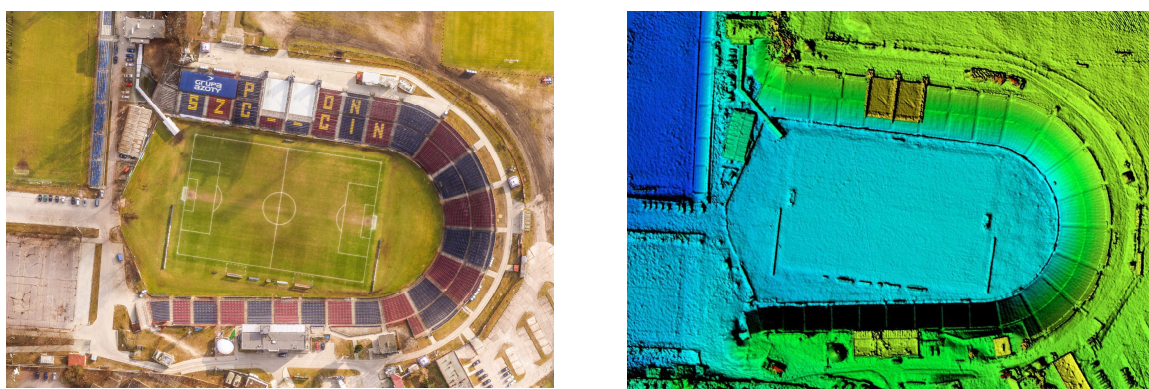
Rys. 14. Model 3D pomnika Adama Mickiewicza wykonany na podstawie nalotu autonomicznego (z lewej) oraz zdjęć uzyskanych za pomocą sterowania ręcznego (z prawej)

Źródło: opracowanie własne

Fig. 14. The 3D model of Adam Mickiewicz monument made on the basis of autonomous raid (left) and photographs obtained by manual control (right)

Source: Elaboration of the Author

Oba opracowania, jak na tego typu materiał wejściowy, są dobrej jakości i oddają dużą ilość szczegółów. Wprawdzie na ortofotomapie widoczne są w niektórych miejscach znaczne zniekształcenia obiektów, ale rozdzielczość obrazu jest na tyle dobra, że można z niego wyszczególnić każde pojedyncze krzeselko na trybunach. Zarówno opracowany NMPT jak i model 3D również dały w tym przypadku zadowalające wyniki jeśli chodzi o koronę stadionu, murawę czy właściwe oddanie ukształtowania trybun. Dane te mogą być dobrym materiałem wyjściowym do dalszych analiz przestrzennych czy oceny aktualnego stanu obiektu, chociaż należy też dodać, że we wszystkich opracowaniach nie udało się właściwie odwzorować czterech górujących nad stadionem masztów oświetleniowych.



Rys. 15. Ortofotomapa (z lewej) i NMPT (z prawej) stadionu im. Floriana Krygiera w Szczecinie

Źródło: Opracowanie własne

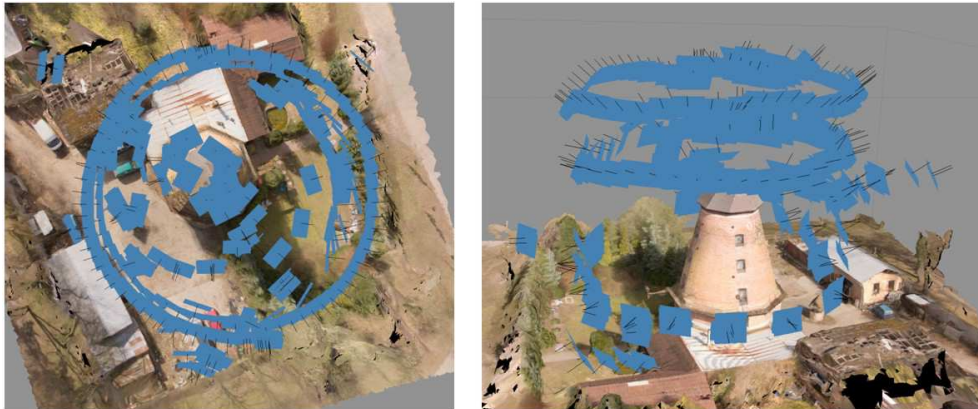
Fig. 15. Ortofotomap (left) and NMPT (right) Florian Krygier stadium in Szczecin

Source: Elaboration of the Author

Ze względu na szybkość zapisu zdjęć oraz ograniczenia aplikacji, przy misjach autonomicznych nie można zapisywać surowych zdjęć w formacie RAW, a jedynie skompresowane obrazy w formacie JPG. Ogranicza to możliwość edycji uzyskanych zdjęć w post-produkcji. W trakcie pracy w programie *PhotoScan* stwierdzono też problemy z automatycznym dopasowaniem plików JPG, które poddano wcześniej korekcji barwnej w programie *Photoshop* i zapisano ponownie. Pliki te nie były właściwie rozpoznawane przez program, pomimo że przetworzony plik posiadał prawidłowo zachowane metadane.

W związku z tym do dalszego przetwarzania obrazów z autonomicznych misji wykorzystywano tylko oryginalnie uzyskane zdjęcia w czasie nalotu, bez ich wcześniejszej obróbki graficznej. Nieco odmienna natomiast była sytuacja w przypadku czwartego obiektu, gdzie zdjęcia wykonywano za pomocą ręcznego sterowania bezzałogowym statkiem powietrznym.

Wówczas od razu pozyskano zdjęcia RAW w formacie DNG, które w dalszej kolejności poddano korekcji barwnej i zapisano jako pliki JPG. W tym przypadku pliki były rozpoznawane prawidłowo i nie zdiagnozowano podobnych kłopotów z ich użyciem. Aby jednak szczegółowo zweryfikować możliwości edycji i przetwarzania pozyskanych zdjęć przed opracowaniem, rozwiązanie tego problemu zostanie podjęte w kolejnych pracach badawczych. Przy modelu wiatraka istotne było oddanie detali budynku i zaprezentowanie ich w wysokiej rozdzielczości. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń, przy tym obiekcie zrezygnowano ze zdjęć autonomicznych i wykonano jedynie zdjęcia wokół osi samego budynku (Rys. 16).



Rys. 16. Zakres zdjęć wykonanych wokół wiatraka holenderskiego w Szczecinie

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 16. Range of pictures taken around the Dutch windmill in Szczecin

Source: Elaboration of the Author



Rys. 17. Teksturowany model 3D wiatraka holenderskiego w Szczecinie

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 17. Textured 3D model of a Dutch windmill in Szczecin

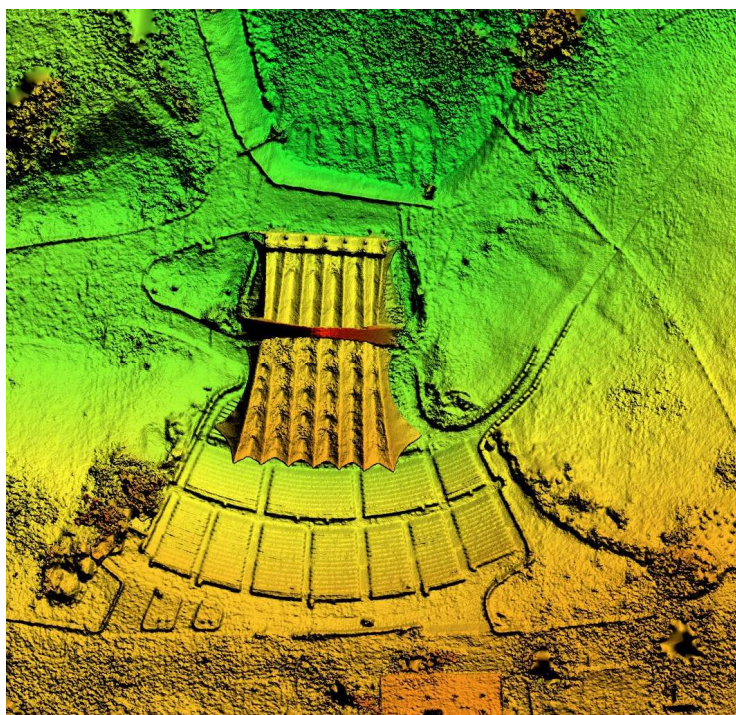
Source: Elaboration of the Author

Obiekt fotografowany był w słoneczny dzień, co skutkowało lepszym oświetleniem, ale tylko na części budynku oraz pojawieniem się cienia po porośniętej roślinnością stronie. Mimo tego, udało się na modelu uzyskać oczekiwany efekt i zachować dosyć dokładne szczegóły architektoniczne także w cieniach (Rys. 17). Tego typu cyfrowa archiwizacja zabytkowych obiektów architektury może w przyszłości posłużyć jako element wyjściowy do renowacji,

a w przypadku jego uszkodzenia bądź pożaru, jako wzór do odtworzenia aktualnego stanu budynku. Takie opracowania mogłyby też być doskonałym uzupełnieniem rejestru zabytków, w szczególności w serwisach internetowych miast czy regionów, dzięki czemu każdy taki obiekt można by zwiedzać wirtualnie.

Wytworzenie z wykorzystaniem średniej klasy BSP precyzyjnych modeli 3D dla większych i bardziej rozległych obiektów zabytkowych, które można byłoby opracować również na drukarce 3D jest przedmiotem dalszych prac badawczych autora.

Rejon Teatru Letniego w Szczecinie wybrano do badania ze względu na widoczne różnice ukształtowania terenu, w którym zlokalizowany jest ten obiekt oraz z powodu jego konstrukcji, gdzie nad zadaszeniem trybun góruje wysoki, kamienny łuk. Całość zabudowy i różnic wysokości doskonale oddaje Numeryczny Model Pokrycia Terenu, na którym dobrze widoczne są detale teatru (Rys. 18).



Rys. 18. Numeryczny model pokrycia terenu na obszarze Teatru Letniego w Szczecinie
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 18. Numerical models of area coverage in the area of the Summer Theater in Szczecin
Source: Elaboration of the Author

Chociaż chmura punktów oddaje bardzo ładnie ukształtowanie analizowanej przestrzeni, nie udało się jednak uzyskać zadowalającej jakości modelu 3D tego obiektu (Rys. 19). Widać również znaczący brak punktów pod zadaszeniem sceny, które zakrywa także część dolnych trybun, co wynika z faktu, że autonomiczny nalot był wykonany na dużej wysokości, zabrakło jednak dodatkowych zdjęć ukośnych lub pionowych z niższej perspektywy. Dlatego o ile uzyskana ortofotomapa czy NMPT są zadowalającej jakości, to do wytworzenia dobrego modelu 3D konstrukcji teatru należałoby podejść jak do poprzednich zabytków architektury. Wskazane byłoby więc ponowne badanie w tym rejonie, aby uzyskać lepszej jakości zdjęcia na różnych wysokościach.

Ostatnie opracowanie zostało wykonane na odcinku ulicy Floriana Krygiera, przy wjeździe na teren centrum handlowego. Obszar ten wybrano ze względu na zróżnicowane ukształtowanie powierzchni, ale dodatkowo na tym małym fragmencie widocznych jest kilka dróg oraz dwa ronda, z czego jedno wiszące nad główną ulicą.



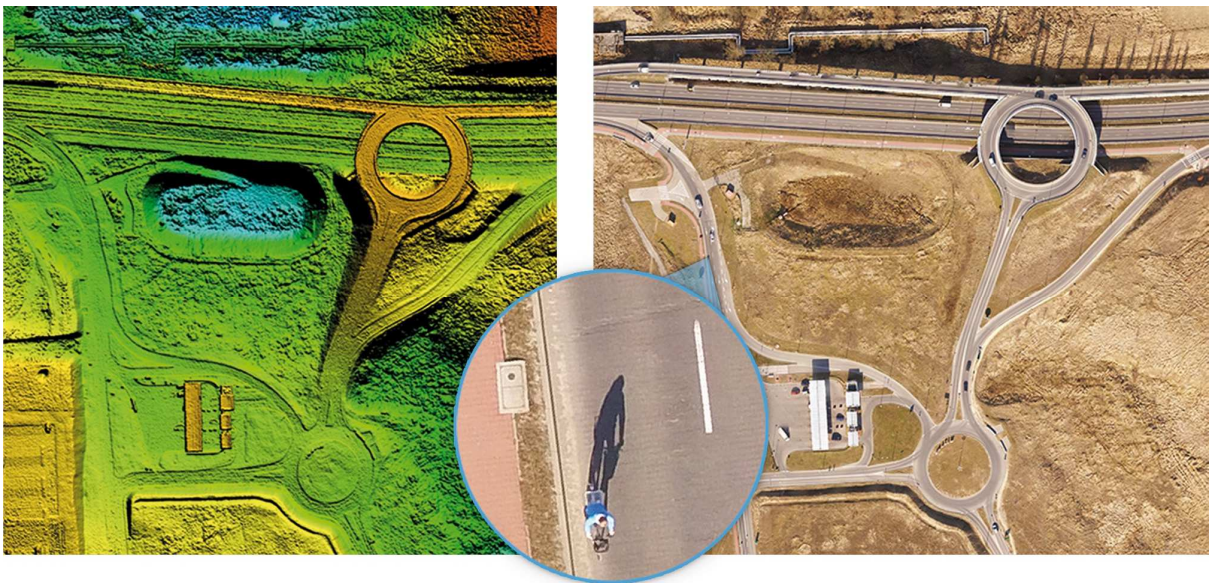
Rys. 19. Chmura punktów i model 3D Teatru Letniego w Szczecinie

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 19. Point cloud and 3D model of the Summer Theater in Szczecin

Source: Elaboration of the Author

Ponieważ realizowany był w tym przypadku nalot autonomiczny, możliwe były do wykonania ortofotomapa, numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) oraz na ich podstawie teksturowany model 3D. Jakość ortofotomapy jest bardzo dobra, w powiększeniu 1:1 można wyszczególnić piesznych, studzienki kanalizacyjne czy nawet poszczególne kostki na brukowanych drogach. Bardzo obrazowy jest również model NMPT, na którym widać różnice w wysokościach pomiędzy poszczególnymi obszarami oraz górujące nad wszystkimi wiszące rondo. Na tym modelu widać też, czego nie można zauważyć na ortofotomapie, że rondo faktycznie jest na innej wysokości, a skrajny pas głównej jezdni, po stronie północnej jest wyżej od niej i łagodnie obniża się do poziomu pozostałych pasów (Rys. 20).



Rys. 20. Numeryczny model pokrycia terenu (z lewej) i ortofotomapa (z prawej) fragmentu ulicy

Floriana Krygiera w Szczecinie

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 20. Numerical terrain coverage model (left) and orthophotomap (right) fragment of

Florjan Krygier Street in Szczecin

Source: Elaboration of the Author

Model 3D dobrze odzwierciedla badaną przestrzeń (Rys. 21). Widoczne są drobne braki małych elementów (jak np. siatka ogrodzeniowa, której cień widoczny jest na chodniku, czy nie pełny napis „Witamy” na małym rondzie). Spore błędy są też w rejonie wiszącego ronda, gdzie brakuje tekstury dolnej jezdni i wygląda jakby brakowało pod nim przejazdu.

Ten sam efekt można zauważyć na fragmencie stacji benzynowej obok małego ronda, gdzie zadaszenia przypominają pełne budynki. Efekt ten występował również na innych omawianych wcześniej modelach wykonanych za pomocą nalotu autonomicznego, gdzie na większości pionowych ścian lub w miejscu występowania pustej przestrzeni tekstura takich obiektów była niewłaściwa. Pomimo tego model 3D poprawnie oddaje charakter badanej przestrzeni i jest doskonałym uzupełnieniem wcześniejszych opracowań. Całość pozyskanej dokumentacji stanowi dobry punkt wyjścia do dalszych analiz tego niewielkiego obszaru.



Rys. 21. Rzuty z modelu 3D fragmentu ulicy Floriana Krygiera w Szczecinie

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 21. Projections from 3D model of Florian Krygier street in Szczecin

Source: Elaboration of the Author

4. Dyskusja i wnioski

Powyższe wyniki badań wykazują znaczącą przydatność bezzałogowych pojazdów latających w analizach przestrzennych. Weryfikując natomiast jakość pozyskanych danych stwierdza się, że do tego typu poglądowych opracowań niskobudżetowa platforma spełnia swoje zadania w pełni.

W ciągu kilku lub kilkunastu minut nalotu BSP można zebrać wysokiej jakości zdjęcia lotnicze, z których w dalszym etapie obróbki cyfrowej uzyskać można zadowalające opracowania do dalszych prac analitycznych. Tego typu przestrzenna analiza obszarów, gdzie dostępną mamy w dobrej rozdzielczości mapę zdjęciową oraz model NMPT jest źródłem dodatkowych informacji i stanowi niewątpliwie przewagę nad typowymi mapami. Do tego mamy dostępny dynamiczny teksturowany model 3D, który pozwala nam spojrzeć na analizowaną przestrzeń nie tylko z góry, ale też z dowolnych kątów i różnych wysokości.

Opracowane w ten sposób modele 3D mogą okazać się przydatne do cyfrowej archiwizacji zabytków architektury, szczególnie tych będących obecnie w złym stanie technicznym i wymagających renowacji, ale i nie tylko. Analizując statystyki Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zabytków, w wyniku pożarów w 2015 roku zniszczonych zostało 16 zabytków architektury, a w 2016 roku ogień pochłonął kolejnych 20 tego typu obiektów w Polsce². Jeśli spojrzymy szerzej na świat, chociażby na wynik trzęsienia ziemi w październiku 2016 roku we Włoszech, gdzie w wyniku wstrząsów w jednej chwili zniszczonych zostało ponad pięć tysięcy zabytków, konieczność digitalizacji dziedzictwa kultury, przy obecnej technologii wydaje się wręcz koniecznością. Zdaniem autora, cyfrowa archiwizacja, nawet w takim minimalnym stopniu jak przy opisywanym powyżej opracowaniu wiatraka holenderskiego w Szczecinie, powinna być wykonana dla wszystkich zabytkowych obiektów w kraju.

Na podstawie badań można stwierdzić, że nie we wszystkich przypadkach uzyskane modele 3D były poprawne, wynikało to jednak po części ze źle pozyskanych danych w pierwszym etapie prac (najczęściej niewłaściwie dobrane parametry nalotu do oczekiwanego efektu), lub niewłaściwych parametrów wyjściowych w trakcie obróbki cyfrowej. Należy tu zauważyć, że z powodu bardzo dużych wymagań programu *PhotoScan* co do pamięci RAM komputera, opracowanie modeli było realizowane przy średnich ustawieniach wyjściowych. W czasie badań nie dysponowano zaawansowaną jednostką obliczeniową, a jedynie średniej klasy komputerem biurowym, stąd obciążenie go maksymalnymi parametrami ustawień w programie nie było możliwe, ale w zakresie powyższych badań nie było też to warunkiem koniecznym.

Należy również wspomnieć, że dane pozyskane za pomocą omawianej platformy BSP, mogą być z powodzeniem integrowane z miejskimi bądź lokalnymi systemami GIS [5], czy to w postaci rastrowych plików geotiff, czy wytworzonych na ich bazie danych numerycznych. Dzięki georeferencji, nie ma również żadnych przeszkód, aby umieszczać wygenerowane ortofotomapy czy modele NMPT w internetowych mapach, jako jedna z wielu warstw tematycznych. Modele 3D mogą natomiast stanowić dodatkowe uzupełnienie w platformie Google Earth czy innych podobnych opracowaniach.

Literatura

- [1] Becmer D., Romanek A.: *Bezzałogowe Platformy Latające*. Wrocław, 2011.
- [2] Kaczyński R.: *Trendy w fotogrametrii i teledetekcji w świetle XXII Kongresu ISPRS. Komisja I - Image Data Acquisition - sensors and platforms*. Wojskowa Akad. Techniczna, 2013.
- [3] Kędzierski M., Fryškowska A., Wierzbicki D.: *Opracowania fotogrametryczne niskiego pułapu*. Wojskowa Akademia Techniczna, 2014.
- [4] Kurczyński Z.: *Fotogrametria*. Warszawa: PWN, 2014.
- [5] Rotchimmel K., Kacprzak M.: *Techniki fotogrametryczne stosowane w modelowaniu 3D miast*. Warszawa: Prace Instytutu Lotnictwa, 2016.
- [6] Sawicki P.: *Bezzałogowe aparaty latające UAV w fotogrametrii i teledetekcji - stan obecny i kierunek rozwoju*. Olsztyn, 2012.

² stratyzabytkow.nimoz.pl