

Załącznik 2a

AUTOREFERAT

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych, w szczególności określonych w art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki
(w języku polskim)

dr inż. Paweł Cwiąkała
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa

Spis treści

1. Imię i Nazwisko	1
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	1
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowo-dydaktycznych.....	1
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) ..	1
4.1. Wykaz publikacji naukowych stanowiących podstawę osiągnięcia naukowego	2
4.2. Geneza cyklu publikacji - uzasadnienie podjęcia tematu	6
4.3. Omówienie wyników badań własnych	8
4.4. Podsumowanie, perspektywy badawcze, potencjalne wykorzystanie wyników	34
5. Wykaz innych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt 4.1) opublikowanych prac naukowych oraz wskaźniki dokonań naukowych	36
6. Literatura	40

Janet Gmina

1. Imię i Nazwisko

Paweł Cwiąkała

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- Tytuł zawodowy magistra inżyniera w dyscyplinie geodezja i kartografia, specjalność: geodezja inżyniersko-przemysłowa, uzyskany na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.
Praca magisterska pt.: „Analiza przydatności skanerów laserowych do pomiaru strzałek zwisu lin odciągowych obiektów wieżowych i przewodów napowietrznych linii energetycznych” obroniona 24.06.2005 r.
Opiekun naukowy:
prof. dr hab. inż. Jacek Szewczyk
- Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie geodezja i kartografia, uzyskany na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.
Praca doktorska pt.: „Ocena wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię i obiekty budowlane na podstawie ciągłego monitoringu przemieszczeń poziomych”, obroniona 19.05.2011 r.
Promotor:
dr hab. inż. Jadwiga Maciaszek, prof. nadzw. AGH (AGH w Krakowie).
Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski (AGH w Krakowie),
prof. dr hab. inż. Jan Białek (Politechnika Śląska)

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowo-dydaktycznych

- Od 1.10.2010 do 30.09.2011 – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, asystent.
- Od 1.10.2011 – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, adiunkt.
- Od 1.10.2016 – kierownik studiów podyplomowych „Zastosowania bezzałogowych statków latających (BSL) w rozwiązywaniu zagadnień inżynierskich”.
- Od 24.07.2017 do 31.01.2019 – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Transferu Technologii, Broker Innowacji.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

Moim osiągnięciem naukowym jest cykl publikacji powiązanych tematycznie, zatytułowany: „Planowanie i wykonywanie nalotów bezzałogowymi statkami latającymi w badaniach pokrycia i ukształtowania terenów górskich”.



4.1. Wykaz publikacji naukowych stanowiących podstawę osiągnięcia naukowego

W swoich publikacjach analizuję i identyfikuję problemy występujące w związku z realizacją prac naukowo-badawczych wykonywanych w terenach o znacznej różnorodności morfologii terenu z wykorzystaniem bezzałogowych statków latających (BSL). Wynikiem przeprowadzanych analiz jest opracowanie metodyki badania dokładności wyznaczania położenia i realizowania misji automatycznych, których szczególnym przypadkiem są naloty fotogrametryczne z niskiego pułapu oraz planowania i wykonywania nalołów bezzałogowymi statkami latającymi do badań pokrycia i ukształtowania terenu w obszarach górskich.

Wykaz publikacji został zaprezentowany w sposób umożliwiający prześledzenie kolejnych wykonanych kroków, począwszy od przetestowania urządzeń BSL przed wykorzystaniem ich do prowadzenia misji wymagających poznania szczegółowych parametrów ich działania, poprzez realizację doświadczeń, na opracowaniu metodyki prowadzenia badań w terenach górskich o charakterze alpejskim z wykorzystaniem BSL kończąc.

W przypadku każdej z wymienionych poniżej publikacji powiązanych tematycznie, stanowiących oryginalne osiągnięcie naukowe miałem znaczący wpływ na jej powstanie lub jestem jej jedynym autorem. Byłem głównym pomysłodawcą koncepcji badań lub brałem znaczący, czynny udział w jej opracowaniu, planowałem i wykonywałem pomiary terenowe, opracowywałem uzyskane wyniki, tworzyłem autorskie algorytmy i metodykę prowadzenia dalszych prac naukowych.

Przy każdej publikacji podana jest liczba punktów przyznanych publikacji według klasyfikacji dokonanej przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Impact Factor zgodny z rokiem wydania czasopisma.

Proponowane przeze mnie oryginalne rozwiązanie dotyczące oceny dokładności wyznaczania położenia bezzałogowych statków latających jest unikalne w skali światowej. Wyniki opracowanych przeze mnie testów zostały zweryfikowane w praktyce poprzez uwzględnienie ich wyników podczas prowadzonych badań terenowych i prac naukowo-badawczych, których rezultatami jest opracowanie metodyki prowadzenia badań w terenach górskich o charakterze alpejskim z wykorzystaniem BSL.

Tabela 4.1. Zestawienie cyklu publikacji nt.: „Planowanie i wykonywanie nalołów bezzałogowymi statkami latającymi w badaniach pokrycia i ukształtowania terenów górskich”

Ozn.	Publikacja	Impact Factor	Liczba punktów wg listy MNiSW
A1	Krzysztof LALIK, Ireneusz DOMINIK, Paweł ĆWIAKAŁA , Janusz KWAŚNIEWSKI; Integrated stress measurement system in tower crane mast; Measurement; ISSN 0263-2241; 2017; vol. 102, s. 47–56.	2.218	30.00
	Mój udział określam na 25,0% i polegał on na: - opracowaniu koncepcji badań, - wykonaniu doświadczeń i pomiarów technikami geodezyjnymi, - opracowaniu wyników pomiarów technikami geodezyjnymi, - analizie statystycznej wyników eksperymentów technikami geodezyjnymi, - przygotowaniu tekstu manuskryptu w części poświęconej pomiarom geodezyjnym.		

A2	<p>Paweł ĆWIAKALA, Edyta PUNIACH; Assessment of the accuracy of positioning unmanned aerial vehicles; Measurement, Automation, Monitoring; Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich. Sekcja Metrologii, Polskie Stowarzyszenie Pomiarów Automatyki i Robotyki POLSPAR; ISSN 2450-2855; 2016; vol. 62, no. 1, s. 17–21.</p>	0.000	11.00
<p>Mój udział określam na 50% i polegał on na:</p> <ul style="list-style-type: none"> - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - przeprowadzeniu pomiarów terenowych, - opracowaniu danych pomiarowych, - analizie statystycznej wyników eksperymentów, - opracowaniu dyskusji wyników i wniosków, - badaniach literaturowych, - przygotowaniu tekstu manuskryptu, - opracowaniu rysunków, - edycji ostatecznej wersji manuskryptu. 			
A3	<p>Edyta PUNIACH, Anita KWARTNIK-PRUC, Paweł ĆWIAKALA; Use of unmanned aerial vehicles in Poland; "GIS ODYSSEY 2016": Geographic Information Systems Conference and Exhibition: 5th–9th September 2016, Perugia, Italy: conference proceedings; Croatian Information Technology Society – GIS Forum, 2016; ISBN: 978-953-6129-55-3; s. 207–217.</p>	0.000	15.00
<p>Mój udział określam na 33,3% i polegał on na:</p> <ul style="list-style-type: none"> - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - opracowaniu rysunków, - badaniach literaturowych 33,3%, - analizie dostępnych przepisów 33,3%, - przygotowaniu 33,3% tekstu manuskryptu. 			
A4	<p>Paweł ĆWIAKALA, Anna Cisińska, Szymon Szotek; Application of the FARO laser tracker to the study of selected functional characteristics of a Kawasaki ZD130 industrial robot; Measurement, Automation, Monitoring; Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich. Sekcja Metrologii, Polskie Stowarzyszenie Pomiarów Automatyki i Robotyki POLSPAR; ISSN 2450-2855; 2015; vol. 61, no. 10, s. 475–479.</p>	0.000	11.00
<p>Mój udział określam na 40,0% i polegał on na:</p> <ul style="list-style-type: none"> - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - wykonaniu pomiarów z wykorzystaniem trackera laserowego, - opracowaniu 40% wyników pomiarów, - przygotowaniu 40% tekstu manuskryptu. - analizie statystycznej wyników eksperymentów, - opracowaniu dyskusji wyników i wniosków, - badaniach literaturowych, - przygotowaniu tekstu manuskryptu, - opracowaniu rysunków, - edycji ostatecznej wersji manuskryptu. 			

A5	Paweł ĆWIAKAŁA ; Assessment of accuracy of basic maneuvers performed by an unmanned aerial vehicle during autonomous flight; INGEO 2017: proceedings of the 7 international conference on Engineering surveying: Lisbon, Portugal, October 18–20, 2017; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal; ISBN: 978-972-49-2300-0; 2017; s. 355–362.	0.000	0.00
A6	Paweł ĆWIAKAŁA ; Trajectory tracking of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in automatic missions; ISPRS International Journal of Geo-Information; publikacja w recenzji	0.000	0.000
A7	Edyta PUNIACH, Paweł ĆWIAKAŁA , Hubert Dec; Impact of Ground Control Points (GCPs) distribution and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) flight parameters on accuracy of Digital Surface Model (DSM); "GIS ODYSSEY 2018": Geographic Information Systems Conference and Exhibition: 25 anniversary conference: 10th to 14th of September 2018, Perugia, Italy: conference proceedings; Zagreb: Croatian Information Technology Society – GIS Forum, 2018; ISSN 2623-5714; s. 387–396.	0.000	2.50 <i>(w trakcie indeksowania w bazie Web of Science)</i>
	Mój udział określam na 33,3% i polegał on na: <ul style="list-style-type: none"> - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - przeprowadzeniu pomiarów terenowych, - opracowaniu danych pomiarowych, - ocenie dokładności produktów fotogrametrycznych, - analizie statystycznej wyników eksperymentów, - opracowaniu dyskusji wyników i wniosków, - badaniach literaturowych, - przygotowaniu tekstu manuskryptu, - opracowaniu rysunków, - edycji ostatecznej wersji manuskryptu. 		
A8	Wojciech GRUSZCZYŃSKI, Wojciech MATWIJ, Paweł ĆWIAKAŁA ; Comparison of low-altitude UAV photogrammetry with terrestrial laser scanning as data-source methods for terrain covered in low vegetation; ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing; ISSN 0924-2716; 2017; vol. 126, s. 168–179.	5.994	45.00
	Mój udział określam na 25,0% i polegał on na: <ul style="list-style-type: none"> - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - udziale w pomiarach terenowych, - opracowaniach danych wejściowych do dalszych analiz, - pracach koncepcyjnych nad algorytmem filtracji danych, - opracowaniu rysunków, - badaniach literaturowych, - przygotowaniu tekstu manuskryptu. 		
A9	Edyta PUNIACH, Agnieszka BIEDA, Paweł ĆWIAKAŁA , Anita KWARTNIK-PRUC, Piotr PARZYCH; Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for updating farmland cadastral data in areas subject to landslides; ISPRS International Journal of Geo-Information; ISSN 2220-9964; 2018; vol. 7, iss. 8, art. no. 331, s. 1–19.	1.723	15.00
	Mój udział określam na 20,0% i polegał on na: <ul style="list-style-type: none"> - opracowaniu koncepcji badań, 		

	<ul style="list-style-type: none"> - opracowaniu metodologii badań, - przeprowadzeniu pomiarów terenowych, - opracowaniu danych pomiarowych, - ocenie dokładności produktów fotogrametrycznych, - opracowaniu dyskusji wyników i wniosków, - przygotowaniu tekstu manuskryptu. 		
A10	<p>Paweł ĆWIAKAŁA, Edyta PUNIACH, Paweł Wdowiak; Optimisation of the UAV-based photogrammetric data collection process in documentation of linear objects of substantial height differences; "GIS ODYSSEY 2018": Geographic Information Systems Conference and Exhibition: 25 anniversary conference: 10th to 14th of September 2018, Perugia, Italy: conference proceedings; Zagreb: Croatian Information Technology Society – GIS Forum, 2018; ISSN 2623-5714; s. 146–156.</p>	0.000	2.50 <i>(w trakcie indeksowania w bazie Web of Science)</i>
	<p>Mój udział określam na 33,3% i polegał on na:</p> <ul style="list-style-type: none"> - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - przeprowadzeniu pomiarów terenowych, - opracowaniu danych pomiarowych, - ocenie dokładności produktów fotogrametrycznych, - analizie statystycznej wyników eksperymentów, - opracowaniu dyskusji wyników i wniosków, - badaniach literaturowych, - przygotowaniu tekstu manuskryptu, - opracowaniu rysunków, - edycji ostatecznej wersji manuskryptu. 		
A11	<p>Paweł ĆWIAKAŁA, Rafał KOCIERZ, Edyta PUNIACH, Michał NĘDZKA, Karolina Mamczarz, Witold NIEWIEM, Paweł WIĄCEK; Assessment of the possibility of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for the documentation of hiking trails in alpine areas; Sensors; ISSN 1424-8220; 2018; vol. 18, iss. 1, art. no. 81, s. 1–28.</p>	2.475	30.00
	<p>Mój udział określam na 35,0% i polegał on na:</p> <ul style="list-style-type: none"> - kierowaniu projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy, - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - przeprowadzeniu pomiarów terenowych, - opracowaniu danych pomiarowych, - ocenie dokładności produktów wynikowych, - analizie statystycznej wyników eksperymentów, - opracowaniu dyskusji wyników i wniosków, - badaniach literaturowych, - przygotowaniu tekstu manuskryptu, - opracowaniu rysunków, - edycji ostatecznej wersji manuskryptu. 		
A12	<p>Paweł ĆWIAKAŁA, Rafał KOCIERZ, Edyta PUNIACH, Michał NĘDZKA, Karolina Mamczarz, Witold NIEWIEM, Paweł WIĄCEK; Documentation of hiking trails and wooden areas using unmanned aerial vehicles (UAV) in Tatra National Park; Infrastructure and Ecology of Rural Areas; Polska Akademia Nauk. Oddział</p>	0.000	10.00

Paweł Ćwikała

	w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi; ISSN 1732-5587; 2017; no. IV/2, s. 1545–1561.		
	Mój udział określam na 35,0% i polegał on na: <ul style="list-style-type: none"> - kierowaniu projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy, - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - przeprowadzeniu pomiarów terenowych, - opracowaniu danych pomiarowych, - ocenie dokładności produktów wynikowych, - analizie statystycznej wyników eksperymentów, - opracowaniu dyskusji wyników i wniosków, - badaniach literaturowych, - przygotowaniu tekstu manuskryptu, - opracowaniu rysunków, - edycji ostatecznej wersji manuskryptu. 		
A13	Paweł ĆWIAKAŁA , Rafał KOCIERZ, Edyta PUNIACH, Stanisław SZOMBARA, Michał NĘDZKA, Dawid MROCHEŃ, Witold NIEWIEM, Paweł WIĄCEK; Ocena przydatności bezzałogowych statków latających do kontroli procesów erozyjnych wzdłuż szlaków turystycznych w aspekcie kartowania geomorfologicznego; Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich; Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi; ISSN 1732-5587; 2018; nr II/1, s. 377–392.	0.000	10.00
	Mój udział określam na 35,0% i polegał on na: <ul style="list-style-type: none"> - kierowaniu projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy, - opracowaniu koncepcji badań, - opracowaniu metodologii badań, - przeprowadzeniu pomiarów terenowych, - opracowaniu danych pomiarowych, - ocenie dokładności produktów wynikowych, - analizie statystycznej wyników eksperymentów, - opracowaniu dyskusji wyników i wniosków, - badaniach literaturowych, - przygotowaniu tekstu manuskryptu, - opracowaniu rysunków, - edycji ostatecznej wersji manuskryptu. 		
	RAZEM	12.410	182.00

4.2. Geneza cyklu publikacji - uzasadnienie podjęcia tematu

Zastosowanie bezzałogowych statków latających w różnych dziedzinach gospodarki pozwala na przyspieszenie wykonywania prac różnego rodzaju. BSL pozwalają zwiększyć bezpieczeństwo mienia i ludzi, a ich gwałtowny rozwój umożliwia wykorzystywanie tych urządzeń w zupełnie nowych gałęziach zastosowań. Dzięki możliwości zainstalowania na bezzałogowych statkach latających różnorodnych sensorów, kamer i urządzeń do transmisji danych drony mogą pełnić wiele funkcji. BSL stają się popularne w logistyce, dostarczaniu przesyłek, z powodzeniem stosowane są do rozpoznania z powietrza klęsk żywiołowych takich jak pożary lasów, monitoringu zmian geomorfologicznych, badaniach meteorologicznych, monitorowaniu i zarządzaniu ruchem drogowym, wspomaganie badań naukowych, modelowaniu 3D i opracowaniach do celów geodezyjnych, pokazach z wykorzystaniem wielu urządzeń jednocześnie. Te i inne zastosowania BSL opisane są w publikacjach [Nex i Remondino, 2013, Rao i inni, 2016].

Globalny rynek bezzałogowych statków latających w 2015 roku wart był 11,9 mld dolarów. Według prognoz Komisji Europejskiej cywilne drony w ciągu najbliższych 10 lat mogą stanowić nawet 10 proc. unijnego rynku lotniczego. Sektor ten miałby być wart nawet 15 mld dolarów. Analitycy przewidują, że branża BSL do 2050 r. może stworzyć w Europie 150 tys. miejsc pracy. W USA raporty dotyczące sprzedaży dronów wykazują wzrost o 224% w ciągu 12 miesięcy od kwietnia 2015 r., osiągając wartość 200 milionów dolarów. W Polsce rynek BSL szacuje się na ok. 75 mln dol., ale szybko rośnie. Rodzima dynamika rozwoju tego sektora sięga 24 proc. rocznie, więcej niż wynosi średni wzrost na świecie (14 proc.).

W czerwcu 2018 roku Parlament Europejski przegłosował przyjęcie nowego rozporządzenia, które jako pierwsze reguluje rynek bezzałogowych statków powietrznych [Bujnowski, 2017]. Obecnie jego rozwój hamują nieskoordynowane przepisy krajowe, co bardzo utrudnia wdrożenie unijnej idei Urban Space (U-Space) – specjalnej przestrzeni powietrznej dla lotów automatycznych i autonomicznych poza zasięgiem wzroku w miastach. Powszechne zastosowanie dronów wiąże się ze zwiększeniem liczby urządzeń operujących w przestrzeni miejskiej i przemysłowej. Do tej pory bezzałogowce, których waga nie przekraczała 150 kg, podlegały regulacjom poszczególnych krajów członkowskich UE. Ze względu na wzrost użycia dronów w unijnej przestrzeni powietrznej i coraz częstsze sytuacje, w których zagrażały one m.in. samolotom pasażerskim, Komisja Europejska zaproponowała wprowadzenie przepisów na szczeblu europejskim również dla mniejszych jednostek. Eksperti pozytywnie oceniają plan ujednoczenia przepisów. W ustawodawstwie europejskim planowane jest przeniesienie zarządzania przestrzenią powietrzną do 150 metrów na poziom samorządów miast i gmin. Proces ten otworzy drzwi do dalszego rozwoju rynku dronów i upowszechnienia bezzałogowych statków powietrznych. Przedsiębiorcy już dzisiaj wespół z samorządowcami testują nowe modele ekonomiczne wykorzystania dronów w aglomeracjach. Tym samym BSL coraz bardziej oddalają się od klasycznego lotnictwa i stają się latającymi robotami. Rosnące wymagania związane z zapewnieniem wysokiego poziomu bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych oraz regulacje prawne wymuszają certyfikowanie urządzeń BSL. Moim zdaniem jednym z etapów certyfikowania tego typu urządzeń powinny być testy pozwalające na określenie charakterystyk poprawności realizowania zadań przez BSL. Misje realizowane przez BSL mogą być wykonywane w trybie automatycznym, w którym urządzenie realizuje zaplanowaną wcześniej misję lub autonomicznym, na różnym poziomie autonomii [Adham i inni, 2018], gdzie nawigacja zaczyna się od analizy otoczenia z wykorzystaniem czujników (lasera, stereowizji, analizy czasu przelotu), modelowania otoczenia, lokalizacji za pomocą technik scalania danych pochodzących z czujników nawigacyjnych (GNSS, IMU, żyroskopów) i kontroli ruchu poprzez zdolność planowania trajektorii. Najbardziej zaawansowanymi rozwiązaniami w nawigacji autonomicznej są algorytmy włączające tworzenie mapy do zadania nawigacji, tzw. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Prowadzone są także prace nad przygotowaniem systemów teleinformatycznych wspierających misje BSL. Takim przykładem jest implementacja przez spółkę DronRadar systemu kontaktu organów służb ruchu lotniczego z operatorami BSL. Tworzone są także systemy do automatycznego startu i lądowania BSL. Innym przykładem jest spółka Spartaqs, która wykorzystując urządzenia radiowe, przygotowała specjalne platformy do lądowania. Nadają one indywidualny sygnał, który może odebrać i właściwie zinterpretować tylko przeznaczony dlań pojazd. Zgodnie z planowanymi regulacjami, elementami, w jakie muszą zostać wyposażone drony, które w przyszłości będą chciały wzbic się na unijne niebo, powinny być: wysokościomierz, urządzenie do określania pozycji, strefy geograficznej i maksymalnej dopuszczalnej odległości operacyjnej, a także systemy unikania kolizji i automatycznego lądowania. Parlament Europejski przekonuje, że chodzi o zapewnienie bezpieczeństwa. Nowe reguły mają też pozwolić na bardziej dynamiczny rozwój rynku BSL. Obecnie prowadzone są w wielu ośrodkach badania nad optymalizacją trajektorii lotu BSL. Skupiają się one nad optymalizacją pokrycia zdjęciami obszarów

podlegających pomiarowi w misjach fotogrametrycznych oraz w inspekcji obiektów jak również trajektorii zmian kierunku lotu.

Współczesne konstrukcje BSL muszą być projektowane pod kątem spełnienia zakładanych osiągnięć, parametrów lotu i kosztów eksploatacyjnych. Konstrukcje musi cechować odpowiedni zestaw własności i właściwości. W eksploatacji BSL powinno zwracać się uwagę na problemy, jakimi są niezawodność i poprawność wykonywania powierzonych im zadań. Na niezawodność, czyli zdatność urządzenia w określonym przedziale czasu w określonych warunkach, bezpośredni wpływ mają funkcje lotne BSL charakteryzowane przez zespół cech decydujących o możliwości realizacji lotu, które opisują: charakterystyki lotno-techniczne (prędkości: maksymalne, startowe, wznoszenia, opadania, różnych ewolucji; wysokości: pułap, możliwość lotu na małych wysokościach; promień działania i zasięg lotu- długotrwałość lotu, sposób startu i lądowania), charakterystyki w zakresie stateczności i sterowności, charakterystyki techniczne: obciążenie eksploatacyjne i dopuszczalne, charakterystyka techniczna zespołu napędowego [Fellner, 2015]. Szczególnie ważnymi czynnikami, jakie należy brać pod uwagę w takcie planowania lotów BSL, są parametry dokładności realizowania misji automatycznych w zależności od warunków pogodowych. Biorąc pod uwagę szybki rozwój tych urządzeń, warto zwrócić uwagę na to, że prace prowadzone są w różnych kierunkach. Do najważniejszych można zaliczyć prace nad modelami matematycznymi trajektorii ruchu pojazdów, modelami strukturalnymi maszyn, badaniem ich niezawodności poprzez wypracowanie odpowiednich procedur i metod badań. Wynikami tego typu analiz są parametry mogące służyć do optymalizacji działania, trwałości, określenia bezawaryjności, bezpieczeństwa i efektywności działania systemów.

Moje autorskie badania miały na celu w pierwszej kolejności zbudowanie zestawu testów do pomiaru położenia BSL w przestrzeni w celu oceny możliwości zastosowania konkretnego zestawu BSL w misjach specyficznych, wymagających wykonania lotów przy małych separacjach poziomych i pionowych, na precyzyjnie ustalonych wysokościach oraz w obszarach o skomplikowanej morfologii terenu takich jak gęsta zabudowa miast, zakładów przemysłowych czy też w terenach górskich, zwłaszcza o specyfice alpejskiej. Prace te poprzedziły analizy przydatności instrumentów geodezyjnych, norm stosowanych do innych urządzeń oraz analizy istniejącego stanu prawnego dotyczącego stosowalności BSL w Polsce i na świecie.

Dalsza część prac związana była z weryfikacją możliwości użycia BSL na obszarach o zróżnicowanej morfologii terenu, zwłaszcza w dokumentacji szlaków turystycznych i innych obszarów położonych w terenie górskim o charakterze alpejskim. Problem degradacji antropogenicznej na stokach w obrębie ścieżek turystycznych jest aktualnie przedmiotem badań zarówno w Polsce, jak i na świecie. Skutki natężenia ruchu turystycznego są bardzo dobrze widoczne w rzeźbie ścieżek i dróg turystycznych w postaci różnych form erozyjno-denudacyjnych czy akumulacyjnych. W tej części moich prac przeprowadziłem badania mające na celu opracowanie metodyki prowadzenia prac dokumentacyjnych z wykorzystaniem bezzałogowych statków latających w terenach górskich.

4.3. Omówienie wyników badań własnych

W ramach prowadzonych przeze mnie badań zdefiniowałem dwa główne cele badawcze oraz siedem szczegółowych, dzięki którym osiągnąłem zadowalające wyniki naukowe. Głównymi celami naukowymi, jakie postawiłem przed sobą, były:

1. Opracowanie metodyki badania dokładności wyznaczania położenia i realizowania misji automatycznych z wykorzystaniem bezzałogowych statków latających.
2. Weryfikacja możliwości prowadzenia prac naukowo-badawczych w terenach o zróżnicowanej morfologii z wykorzystaniem bezzałogowych statków latających.

Na podstawie celów głównych wyodrębniłem następujące zadania badawcze, które zostały opisane w kolejnych publikacjach naukowych:

1. Opracowanie metodyki prowadzenia badań i testowanie pracy BSL w realizowaniu misji w sterowaniu manualnym.
2. Badania aktualnych przepisów związanych z wykorzystaniem BSL w przestrzeni powietrznej.
3. Badanie przydatności w testach BSL norm ISO służących testowaniu robotów przemysłowych.
4. Zbudowanie ostatecznego i uniwersalnego zestawu testów pozwalającego na ocenę pracy BSL.
5. Badanie dokładności produktów pozyskiwanych przy użyciu BSL, próby filtracji danych dla niskiej roślinności.
6. Wypracowanie metodyki prowadzenia prac badawczych w terenach górskich o charakterze alpejskim.
7. Analizy przydatności danych pozyskanych z pokładu BSL do oceny jakości szlaków, zniszczeń antropogenicznych i analiz leśnych.

Pierwszym analizowanym przeze mnie problemem przed rozpoczęciem właściwych prac badawczych mających na celu opracowanie zestawu testów do badania bezzałogowych statków latających była ocena przydatności zrobotyzowanych tachimetrów w śledzeniu celów poruszających się z dużą prędkością [A1]. Opracowana metoda polega na geodezyjnym pomiarze współrzędnych dwóch pryzmatów umieszczonych na konstrukcji dźwigu (maszt wieży, ramię żurawia) z użyciem tachimetrów zrobotyzowanych. Użyte instrumenty wyposażone były w serwomotory oraz system pomiarowy pozwalający na automatyczne śledzenie pryzmatu, na który zostały wycelowane. Taka konfiguracja urządzeń pozwoliła na wykonywanie pomiarów obiektów w ruchu. Dokładność wyznaczenia kolejnych współrzędnych poruszającego się sygnału uzależniona jest od prędkości liniowej, z jaką się on porusza. W pomiarach użyto oprogramowania instrumentów przedstawionego w publikacji [Ortyl i Owerko, 2007]. Rejestracji podlegały współrzędne biegunowe, tj. odległości skośne oraz kąty: poziomy i pionowy, kolejnych położenia dwóch pryzmatów zamontowanych na obiekcie. Pierwszy z nich był zainstalowany na jednej z nóg wieży dźwigu, tuż poniżej obrotnicy, a drugi na końcu ramienia żurawia. Każdy z instrumentów geodezyjnych był przypisany do jednego z pryzmatów i prowadził obserwacje zmian jego położenia. Dzięki takiej konfiguracji sprzętowej mogłem przetestować i zweryfikować możliwość ciągłego śledzenia zmian położenia pryzmatu poruszającego się z dużą prędkością, zainstalowanego na ramieniu dźwigu. Pomiar przeprowadzone w ramach tych badań stanowiły istotny wkład w opracowanie koncepcji prowadzenia pomiarów wyznaczania położenia BSL w przestrzeni oraz zweryfikowały pozytywnie przydatność tachimetrów zrobotyzowanych do śledzenia celu poruszającego się z dużą prędkością.

Kolejne etapy moich prac skoncentrowane były na ocenie jakości działania sensorów montowanych w BSL. Z tego powodu konieczne było opracowanie zestawu testów dla określania charakterystyk dokładności wyznaczania położenia BSL w locie. Prace te rozpocząłem w roku 2015 i kontynuowałem w latach następnych. W artykule [A2] zostały przedstawione wyniki badań, których celem było określenie dokładności stabilizacji położenia bezzałogowego systemu latającego. Testy przeprowadzono dla urządzenia DJI S900 z komputerem pokładowym DJI A2 podczas wykonywania podstawowych manewrów w locie. Wszystkie manewry były realizowane w trybie manualnego zdalnego sterowania przy użyciu aparatury RC. Na tym etapie prac przeprowadziłem dwa testy, w trakcie których bezzałogowy statek latający działał w trybie automatycznej stabilizacji – wysokość lotu była kontrolowana za pomocą barometru, natomiast do stabilizacji położenia w płaszczyźnie poziomej używany był odbiornik GNSS pracujący w trybie nawigacyjnym. Pomiar położenia urządzenia w przestrzeni wykonano instrumentem geodezyjnym Leica Nova MS50. Pierwszy test miał na celu wyznaczenie dokładności utrzymania zawisu przez BSL. Został on podzielony na dwie części różniące się czasem trwania pomiaru (5 minut i 10 minut). W trakcie badań BSL znajdował się na wysokości

minimum 30 m nad powierzchnią terenu. Takie warunki pomiaru pozwalają założyć, że na urządzenie nie działały inne czynniki poza parciem wiatru. W kolejnym etapie prac (test nr 2) wyznaczałem dokładność realizowania przez BSL przemieszczenia poziomego i pionowego o zadanej wartości.

Zaproponowany przeze mnie zestaw testów, stanowiący oryginalne osiągnięcie, pozwala na określenie dokładności wyznaczania położenia całego zestawu BSL (multirotor, stabilizator kamery, komputer pokładowy, a zwłaszcza odbiornik GNSS, kompas i czujnik IMU wraz z barometrem) w trakcie zawisu oraz przy realizowaniu prostych manewrów w locie manualnym. Wyniki z tego eksperymentu badawczego umożliwiają weryfikację poprawności pracy BSL oraz parametrów charakteryzujących dokładność wyznaczania jego położenia, które są podane przez producenta sprzętu. Opracowane testy są narzędziem umożliwiającym ocenę przydatności wskazań systemów pokładowych do realizacji tego typu misji.

Przed rozpoczęciem prac związanych z opracowaniem zestawu testów dla bezałogowych statków latających poddałem głębokiej analizie aktualne przepisy związane z ich wykorzystaniem w przestrzeni powietrznej [A3]. Wzrost popularności bezałogowych statków latających na rynku cywilnym wywołał dyskusję nad koniecznością zwiększenia bezpieczeństwa lotów BSL. Już w 1999 r. NATO i EUROCONTROL rozpoczęły współpracę, której celem było przygotowanie przepisów prawnych dotyczących platform BSL. Prace nie doprowadziły jeszcze do powstania międzynarodowych standardów z zakresie użytkowania BSL, zwłaszcza przy zastosowaniach cywilnych. Zwróciły jednak uwagę społeczności międzynarodowej na bezpieczeństwo użytkowania platform bezałogowych [Nex i Remondino, 2014]. W konsekwencji wiele krajów, w tym Polska, wprowadzała swoje wewnętrzne regulacje dotyczące BSL, które znacząco różnią się od siebie. Należy zaznaczyć, że w Polsce niemal co roku wprowadzane są znaczące zmiany w przepisach w obszarze lotnictwa bezałogowego. Dalszy rozwój i funkcjonowanie lotnictwa bezałogowego w Polsce będzie w dużym stopniu uzależniony od właściwie skonstruowanych regulacji prawnych obejmujących ten obszar lotnictwa. Jest to technologia o dużym potencjale, która z powodzeniem stosowana jest w wielu dziedzinach gospodarki. Zagadnienie lotów bezałogowych jest przedmiotem prac w wielu państwach członkowskich Unii Europejskiej. Również Komisja Europejska dostrzegła konieczność harmonizacji przepisów w tej sprawie. W marcu 2015 r. w Rydze przyjęto deklarację dotyczącą dalszego rozwoju systemów bezałogowych. Aktualnie w krajach członkowskich UE prowadzone są prace nad wprowadzeniem jednolitych przepisów dla całej Unii, umożliwiających ich rozwój. Unia Europejska stoi na stanowisku, że regulacje mają się przede wszystkim przyczynić do podniesienia bezpieczeństwa i umożliwienia bezkolizyjnego uczestniczenia bezałogowych statków powietrznych z załogowymi, w niewydzielonej cywilnej przestrzeni powietrznej. UE wskazuje również na potrzebę rozwiązania obaw społecznych odnośnie ochrony prywatności i danych osobowych oraz odpowiedzialności cywilnej i ubezpieczeń [<http://www.ulc.gov.pl/pl/uav>]. Do tej pory rozwój międzynarodowego rynku BSL hamują nieskoordynowane przepisy krajowe, co bardzo utrudnia wdrożenie unijnej idei Urban Space (U-Space) – specjalnej przestrzeni powietrznej dla lotów automatycznych i autonomicznych poza zasięgiem wzroku w miastach. Jednym z aspektów wdrożenia tej idei jest certyfikacja urządzeń.

Biorąc pod uwagę brak wytycznych dotyczących testowania urządzeń BSL w locie wytypowałem normy ISO o zbliżonej stosowalności. W ramach badań przedstawionych w publikacji [A4] przeprowadziłem prace związane z wykorzystaniem norm ISO dotyczących certyfikowania i określania dokładności pozycjonowania stacjonarnych robotów przemysłowych. Każdy robot jest sprawdzany pod kątem jakości wykonania i dokładności działania przed rozpoczęciem jego eksploatacji na docelowym miejscu pracy. Dokładność pracy robota przemysłowego określają jego charakterystyki funkcjonalne [Norma PN-EN ISO 8373:2001], z których najważniejsze to dokładność i powtarzalność pozycji. Wytyczne przeprowadzania badań dokładności robotów zostały opisane w normie PN-EN ISO 9283:2003 [Norma PN-EN ISO 9283:2003]. Do kalibracji i pozycjonowania tych urządzeń są stosowane różne metody pomiarowe [Shiakolas i inni, 2002; Ratajczyk, 2007]. Najczęściej do tego celu

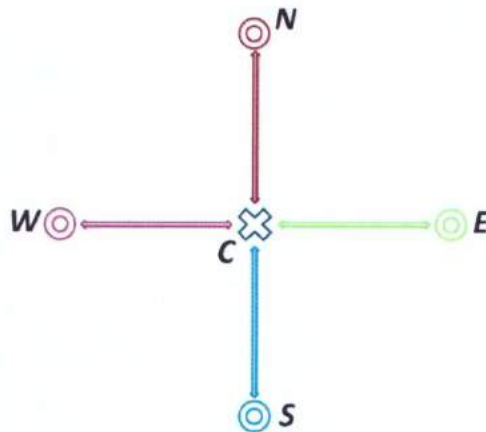
wykorzystywane są współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM) [Driels i inni, 1993; Nubiola i inni, 2014]. Prace pomiarowe mające na celu określenie dokładności robota przemysłowego przeprowadziłem za pomocą trackera laserowego. Jest to narzędzie, które umożliwia pozyskiwanie dużych zbiorów danych w krótkim czasie i z odpowiednio wysoką dokładnością [Nubiola i Bonev, 2014; Nubiola i inni, 2014]. Podczas pracy robota tracker laserowy rejestrował współrzędne X, Y, Z pozycji osiągniętych przez manipulator. Pozyskane dane zostały przetransformowane z lokalnego układu współrzędnych urządzenia pomiarowego do bazowego układu współrzędnych robota. Na tej podstawie obliczono parametry charakteryzujące dokładność pracy maszyny zgodnie z normami ISO. Wyniki tych prac pozwoliły na wstępne potwierdzenie przydatności norm ISO w aspekcie zastosowania ich do prowadzenia testów BSL. W publikacji [A5] przedstawiłem pierwsze wyniki badań związanych z zaimplementowaniem norm ISO do badania trajektorii ruchu BSL. Powszechnie stosowana definicja BSL odnosząca się dla urządzeń latających wykorzystywanych w celach innych niż rekreacyjne i sportowe mówi, że jest to statek powietrzny, który nie wymaga do lotu załogi obecnej na pokładzie oraz nie ma możliwości zabierania pasażerów, pilotowany zdalnie lub wykonujący lot autonomicznie. Z kolei definicja robota przemysłowego brzmi: manipulacyjny robot przemysłowy jest automatycznie sterowaną, programowaną, wielozadaniową maszyną manipulacyjną o wielu stopniach swobody, posiadającą własności manipulacyjne lub lokomocyjne, stacjonarną lub mobilną, dla ważnych zastosowań przemysłowych [ISO 8373:2012]. Biorąc pod uwagę powyższe definicje, BSL można zakwalifikować jako mobilne roboty przemysłowe. W moich pracach zrealizowałem praktycznie wybrane testy przedstawione w normie ISO 9283:2003 [ISO 9283, 2003] pod kątem możliwości ich zaimplementowania w pomiarach dokładności wyznaczania położenia BSL. Prace przeprowadzone przeze mnie w ramach tych badań stanowią istotny wkład w opracowanie koncepcji prowadzenia pomiarów położenia BSL w przestrzeni oraz miały na celu weryfikację przydatności norm ISO do tego typu zadań. Zaproponowany w publikacji [A5], wybrany z norm ISO, zestaw testów po wprowadzeniu niezbędnych modyfikacji może być traktowany jako jeden z kroków w procedurze testowej do badania komputerów pokładowych i czujników montowanych do kontroli lotu BSL.

Prace, jakie opisałem do tej pory, stanowiły wstęp do opracowania pełnej metodyki prowadzenia testów bezzałogowych statków latających, która została przedstawiona w publikacji [A6]. W ramach prac badawczych, jakie przeprowadziłem i opisałem w tej publikacji, sformułowałem zestaw zadań, których wykonanie pozwoli na ocenę parametrów lotu BSL w różnych warunkach terenowych jak i pogodowych podczas realizowania zaprogramowanych misji automatycznych. Warto zaznaczyć, że możliwa jest implementacja tych testów jako uniwersalnych, które można przeprowadzić niemal w każdym miejscu. W ramach szeregu testów, jakie przeprowadziłem w trakcie badań opisanych w [A2, A5] i podsumowanych w publikacji [A6], wyodrębniłem zadania opisane poniżej, których przeprowadzenie na danym typie BSL pozwala na ocenę charakterystyki jego pracy. Dodatkowo w ramach prowadzenia oceny jakości lotu wybranych BSL przy wykorzystaniu tej metodyki przeprowadziłem badania w skrajnie różnych warunkach pogodowych – przy słabym i silnym wietrze, którego prędkość była zbliżona do granicznej dla testowanych urządzeń. Zrealizowanie tych zaleceń pozwala na pełną ocenę przydatności danego BSL w danym rodzaju misji. Testowe analizy położenia bezzałogowych statków latających w przestrzeni wykonałem instrumentem geodezyjnym Leica Nova MS50, w układzie współrzędnych PL-2000/7 (EPSG: 2178). Urządzenie jest wyposażone w serwowmotory oraz system śledzenia ruchomego pryzmatu. Zgodnie z danymi podanymi przez producenta, MS50 pracujący w trybie ciągłego pomiaru pozwala na rejestrowanie położenia przemieszczającego się obiektu z częstotliwością do 20 Hz. W trakcie przeprowadzonych testów osiągnięto średnią częstotliwość rejestracji danych równą 5.8 Hz. Śledzony pryzmat zamontowany był na stabilizatorze aparatu (rysunek 4.1). Taki sposób montażu pryzmatu pozwolił na określenie zmian położenia elementu najważniejszego z punktu widzenia jakości pozyskiwanych danych fotogrametrycznych.



Rysunek 4.1. Sposób i miejsce montażu przyzmatu Mini360 na bezzałogowym statku latającym
Źródło: publikacja [A2]

- Zadanie 1 – ma na celu zbadanie dokładności utrzymania zawisu przez BSL. Urządzenie powinno być zaprogramowane tak, aby dotrzeć do punktu o wyznaczonych współrzędnych, a następnie utrzymać zadane położenie. Punkt ten powinien znajdować się minimum 30 m nad powierzchnią terenu. Takie warunki pomiaru pozwalają założyć, że na urządzenie działała jedynie parcie wiatru niezakłócone zawirowaniami od przeszkód terenowych.



Rysunek 4.2. Schemat bazy pomiarowej do zadania 2
Źródło: publikacja [A5]

- Zadanie 2 – oparte jest o 5 punktów stanowiących końce odcinków lotu realizowanych przez BSL. Punkty winny być rozmieszczone na bazie w postaci krzyża, którego ramiona są równoległe do kierunków stosowanego układu współrzędnych, każde ramię powinno mieć długość min. 25,00 m (licząc od środka bazy). Schemat bazy przedstawiono na rysunku 4.2.

- Zadanie 3 – ma na celu weryfikację dokładności wskazań systemu barometrycznego montowanego w BSL, odpowiedzialnego za poprawne realizowanie zaprogramowanych wysokości lotu, pod względem wykrywania nieprawidłowości związanych z błędem skali.
- Zadanie 4 – to symulacja misji fotogrametrycznej, w której urządzenie należy zaprogramować do realizowania misji nad zadany obszar. W zadaniu tym należy zastosować trajektorię zmiany kierunku lotu poprzez zatrzymanie w zaprogramowanym punkcie, a następnie obrót i rozpoczęcie drogi do punktu kolejnego.
- Zadanie 5 – to także symulacja misji fotogrametrycznej o takim samym zakresie jak w teście 4 z tym, że z wykorzystaniem trajektorii zmiany kierunku lotu, w którym BSL nie zatrzymuje się w punkcie załamania trasy, a wykonuje płynny zwrot w kierunku kolejnego punktu. Prędkość postępowania urządzenia jest dostosowywana do zakrętu automatycznie przez komputer pokładowy BSL w zależności od charakterystyki jego działania.

Zaznaczę, że ostateczny wybór proponowanego zestawu zadań poprzedzony był serią testów pozwalających na ich odpowiedni dobór pod względem zbadania oczekiwanych parametrów pracy BSL. W publikacji [A6] przeanalizowałem także prace terenowe, które obejmowały pomiary na komputerach pokładowych typu DJI A2 w dwóch rodzajach warunków pogodowych. DJI A2 to komputer pokładowy służący do sterowania platformami wielowirnikowymi. Urządzenie to wspiera wiele dodatkowych funkcjonalności platformy latającej takich jak sterowanie stabilizatorem kamery i wyzwalanie migawki, funkcje automatycznego powrotu do miejsca startu, zmiany trybu lotu, inteligentne tryby sterowania, ochronę przed rozładowaniem akumulatorów i aktywację spadochronu ratunkowego.

Dane rejestrowane przez instrument MS50 reprezentowały rzeczywiste położenie BSL w przestrzeni. Ponadto pozyskano dane zapisane w plikach LOG w komputerach pokładowych, które przedstawiały współrzędne i wysokości, jakie zarejestrował dron. Dane te zostały zarejestrowane w układzie WGS84 (EPSG 4326) i zostały przeliczone do układu PL-2000/7. Ostatnim rodzajem danych, które podlegały późniejszej analizie, był współrzędne punktów zaprojektowane do zrealizowania przez BSL. W projektach misji posługiwano się współrzędnymi w układzie WGS84, które przeliczone zostały także do układu PL-2000/7. Wysokości projektowano przy założeniu, iż w miejscu startu wysokość BSL wynosi 0.00 m. Tak więc porównanie wysokości wymagało redukcji danych pochodzących z instrumentu geodezyjnego na początek każdej misji. Synchronizację czasową danych pochodzących z MS50 i BSL dokonano, korelując czas startu i lądowania BSL. W wynikach pomiarów z MS50 przeprowadzono redukcję położenia pryzmatu względem anteny GNSS zainstalowanej w BSL, biorąc pod uwagę dane rejestrowane przez IMU zamontowane w dronie i zapisane w plikach LOG z każdego lotu.

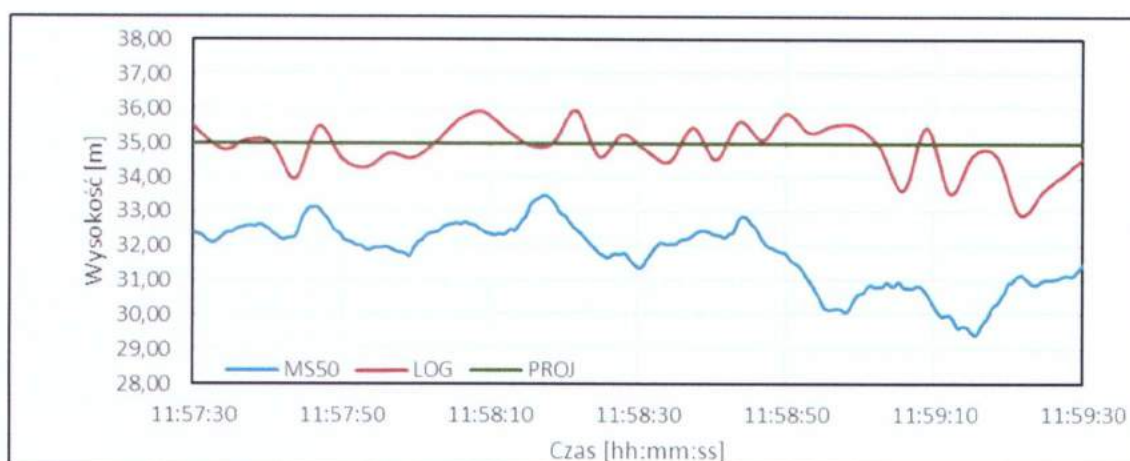
Dzięki zapisowi danych z każdego testu w pamięci BSL i w pamięci tachimetru śledzącego pryzmat oraz znając projekt danej misji, możliwe jest porównanie wzajemne tych trzech zestawów danych. W związku z tym w prowadzonych przeze mnie testach możliwe było pozyskanie następujących danych w postaci szeregów czasowych przedstawiających:

- różnice pomiędzy wartościami projektowanymi a pomierzonymi przez instrument geodezyjny Leica MS50, oznaczane jako PROJ-MS50,
- różnice pomiędzy wartościami projektowanymi a pozyskanymi z danych zapisanych w plikach LOG komputerów pokładowych BSL, oznaczane jako PROJ-LOG,
- różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi przez instrument geodezyjny Leica MS50 a pozyskanymi z danych zapisanych w plikach LOG komputerów pokładowych BSL, oznaczane jako MS50-LOG.

W przedstawionym przeze mnie zestawie testów możliwe jest określanie wielu parametrów urządzeń w oparciu o obliczanie wskazań różnic pomiędzy projektem, wskazaniem komputera

pokładowego oraz danymi z referencyjnego instrumentu geodezyjnego. Różnice pomiędzy wartościami projektowanymi a pomierzonymi przez tachimetr zrobotyzowany mogą służyć do oceny dokładności poprawności realizowanej misji BSL na przykład pod względem separacji od infrastruktury, przeszkód, zapewnienia odpowiednich odległości fotografowania itp. Różnice pomiędzy wartościami projektowanymi, a pozyskanymi z danych zapisanych w plikach LOG komputerów pokładowych BSL pozwalają na określenie dokładności wewnętrznej komputera pokładowego, czyli dopuszczalnych wartości, w jakich jego oprogramowanie uznaje za spełnione osiągnięcie zaplanowanych zadań. Natomiast różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi przez instrument MS50 a pozyskanymi z danych zapisanych w plikach LOG komputerów pokładowych BSL należy interpretować jako pomocne w określeniu dokładności urządzeń pokładowych BSL.

W przypadku zadania 1 analizę danych należy rozpocząć od sporządzenia wykresów zmian współrzędnych w czasie testu. Na rysunku 4.3 przedstawiono przykładowy wykres zmian położenia wysokościowego BSL w czasie: zarejestrowanych przez instrument MS50, z pliku LOG, oraz wartości zaprojektowanej dla komputera pokładowego DJI A2 zamontowanego na wielowirnikowcu DJI S900 Spreading Wings. W teście tym możliwe jest sprawdzenie poprawności czujników w jednostce IMU odpowiedzialnych za stabilizację urządzenia. Dodatkowo możliwe jest wykrycie dryftu czasowego wynikającego z niedokładności działania barometrów odpowiedzialnych za stabilizację wysokościową urządzenia. Ponadto mając do dyspozycji różnice obliczone pomiędzy poszczególnymi rodzajami pozyskanych danych, możliwe jest zestawienie maksymalnych i minimalnych różnic, ich zakresu, średnich wartości różnic oraz odchyłeń standardowych różnic współrzędnych.



Rysunek 4.3. Wykres zmian położenia wysokościowego BSL w trakcie realizacji zadania 1

Źródło: publikacja [A6]

Należy zwrócić uwagę na to, że testowane przeze mnie urządzenia w czasie zawisu wykonywały nieznaczne ruchy w poziomie związane z kompensowaniem podmuchów wiatru. W przypadku silnego wiatru widoczne jest to, że różnica skrajnych wartości położenia jest znacznie większa niż dla wiatru słabego. Podobnie odchylenia standardowe różnic są znacząco większe. W przypadku danych wysokościowych widoczne jest, że w żadnym z testów BSL nie osiągnął planowanej wysokości. W testach, jakie prowadziłem, zaobserwowano dryft położenia urządzeń w czasie zarejestrowany przez instrument zewnętrzny, widoczny najwyraźniej dla położenia wysokościowego. W przypadku dryftu położenia poziomego w czasie zauważono, że występował on jedynie w warunkach wietrznej pogody. W przypadku wysokości dryft występował we wszystkich testach i co charakterystyczne, wartości dla każdego komputera pokładowego były podobne bez względu na warunki pogodowe. Jednocześnie

obliczone wartości dryftów dla danych pochodzących z komputerów pokładowych są bliskie zeru, a zatem nie wskazują na taki błąd, co jednoznacznie oznacza ich nie w pełni prawidłowe działanie.

Zdefiniowanie zadania 2 było wynikiem wcześniej przeprowadzonych analiz przydatności norm ISO i ma na celu określenie jak największej liczby parametrów pracy BSL przy zastosowaniu norm dotyczących robotów przemysłowych, czym zajmowałem się już w ramach testów w publikacji [A5]. W publikacji omówionej wcześniej przeanalizowałem wybrane testy przedstawione w normach ISO pod kątem możliwości ich zaimplementowania w pomiarach dokładności położenia BSL. Poniżej przedstawiam parametry, jakie w mojej koncepcji testów są niezbędne w ocenie poprawności działania BSL:

- dokładność pozycjonowania rozumiana jako różnica między pozycją zadaną i średnią pozycją osiąganą przez robota, gdy osiągnięcie pozycji zadanej następuje z tego samego kierunku,
- powtarzalność pozycjonowania czyli miara rozrzutu odchyłeń między pozycjami osiąganymi po n powtórzeniach, przy osiągnięciu tej samej pozycji zadanej z tego samego kierunku,
- zmienność dokładności pozycjonowania osiąganego z wielu kierunków, która jest maksymalną odległością między średnią z osiągniętych pozycji, uzyskana przy osiągnięciu tej samej pozycji zadanej n razy z trzech prostopadłych kierunków,
- odchylenie odległości, które stanowi różnicę między odległością zadaną a średnią odległością osiągniętą,
- powtarzalność odległości czyli miara rozrzutu odchyłeń osiągniętych odległości, przy czym odległości osiągnięte odpowiadają tej samej odległości zadanej, powtarzanej n razy z tego samego kierunku.

Wszystkie testy powinny być przeprowadzone tak, aby punkt centralny bazy był osiąganym z 4 niezależnych kierunków związanych z osiami układu współrzędnych. BSL należy zaprogramować do realizacji misji tak, aby osiągać zadaną pozycję centralną minimum 25 razy z każdego kierunku. Test powinien być prowadzony na wysokości lotu minimum 30 metrów, tak aby na wyniki pomiarów nie miały wpływu turbulencje związane z drzewami i inną infrastrukturą w okolicy bazy pomiarowej.

Obliczenia należy prowadzić tak, aby opis wyników związany był z kierunkiem dolotu do punktu centralnego, odpowiednio od północy (N), południa (S), wschodu (E) i zachodu (W). Należy zaznaczyć, że w normie wymagane jest jedynie podawanie wartości przestrzennych dla środka ciężkości pozycji osiąganym przez robota z tego samego kierunku. Dla urządzeń latających rozdzielanie składowych na horyzontalne i pionowe jest konieczne ze względu na zastosowanie różnych czujników do stabilizacji w tych płaszczyznach.

Wyniki zadania 2 pozwalają na przeprowadzenie szerszych analiz. W przypadku parametru dokładności pozycjonowania, biorąc pod uwagę dokładność gwarantowaną przez producenta komputerów pokładowych, wyniki pozwalają stwierdzić, iż dla wyznaczania pozycji poziomej w lekkim wietrze, w większości przypadków zapewniane jest pozycjonowanie urządzenia z podawaną dokładnością. Natomiast przy wietrze na granicy stosowalności tego sprzętu wartości tego parametru są nieznacznie przekraczane. W przypadku pozycjonowania wysokości różnica jest znacznie większa względem podawanych przez producenta wartości. Parametr, jaki używany jest w normie, czyli dokładność pozycjonowania przestrzennego, w niemal wszystkich przypadkach znacznie przekracza podawane przez producenta wartości. W przypadku powtarzalności pozycjonowania należy podkreślić, iż parametr ten określa dokładność realizowania zadanej pozycji po wyeliminowaniu czynnika systematycznego związanego z niedokładnością rozwiązania odbiornika GNSS. Biorąc pod uwagę jego wartości, można stwierdzić, że kierunek dolotu do punktu centralnego nie ma wpływu na powtarzalność pozycjonowania urządzenia. Należy jednak zauważyć iż w przypadku testów prowadzonych przy silnym wietrze parametry te są większe. Zmienność dokładności pozycjonowania osiąganego z wielu kierunków podobnie jak we wcześniejszym teście w wietrznych warunkach jest

większa. Dla parametru odchylenia odległości dla każdego kierunku dościa do punktu centralnego widoczne jest, że we wszystkich kierunkach przelotu realizowana długość odcinka była krótsza od zakładanej. W przypadku klasycznych robotów przemysłowych świadczy to o błędzie skali urządzenia. Natomiast z analizy powtarzalności realizowanej odległości wynika, że parametr ten jest na poziomie powyżej 1 metra, można zatem przyjąć, że omawiane wcześniej wartości odchylenia odległości można uznać za zaniedbywalne.

Zadanie 3 zakłada stopniowe osiągnięcie kolejnych pułapów wysokości uprzednio zaprogramowanych w interwale co 5 m, w zakresie roboczym urządzenia. W testach, jakie przeprowadziłem, zakres ten wynosił pomiędzy 20 a 90 metrów. Dzięki temu urządzenie osiągało 15 punktów pomiarowych w każdym teście. Test należy przeprowadzić tak, aby w każdym z punktów BSL był pozostawiany w zawisie na czas minimum 15 sekund. Porównaniu podlegały różnice wysokości zarejestrowane na kolejnych wysokościach. Na podstawie pozyskanych danych należy zestawić także przyrosty wysokości pomiędzy kolejnymi osiąganymi punktami.

W zadaniu 3 wyniki wszystkich testów wykazują rosnące różnice pomiędzy wysokością zaprogramowaną, a pomierzoną przez instrument MS50. Równocześnie w tych samych punktach różnice pomiędzy wartościami zarejestrowanymi przez BSL w plikach LOG a projektowanymi nie przekraczały 1,00m, przy średniej wartości różnicy nie przekraczającej 0,15 m. Wartości liczbowe odpowiadające różnicom pomiędzy danymi pochodzącymi z MS50 i logów z BSL są zbliżone do danych omawianych jako zadanie 1. Wyniki tego zadania wskazują na błąd skali barometru, wpływający na osiąganą wysokość względem miejsca startu – wyznaczyłem parametr, którego wartość obliczyłem jako współczynnik osiągniętej wysokości pomierzonej przez MS50 do wysokości zaprojektowanej. W zależności od testowanego komputera pokładowego oraz warunków pogodowych podczas testu jego wartość wynosi od 0,87 do 0,99. Wysokie wartości korelacji wysokości zaprogramowanych z różnicami pomierzonymi instrumentem MS50 (PROJ-MS i MS50-LOG) wskazują na występowanie nieprawidłowości w pracy barometrów. Niskie wartości korelacji wysokości zaprogramowanych z różnicami wyników komputera pokładowego (LOG) wskazują na to, iż należy traktować je jako wartości przypadkowe. Obliczone wartości korelacji wysokości zaprogramowanych z różnicami pomierzonymi instrumentem MS50 świadczą o tym, że występuje błąd skali w barometrach. Zestawienie średnich wartości przyrostów wskazuje także, iż dla pomiaru z wykorzystaniem instrumentu MS50 nie jest osiągniata zaprogramowana wartość, natomiast w przypadku danych pochodzących z komputerów pokładowych średnie wartości pokrywają się z zadanymi z wysoką dokładnością.

Biorąc pod uwagę charakterystykę zadania 4, najważniejszym parametrem, jaki powinien być poddawany analizie jest moment wyzwolenia spustu migawki w aparacie fotograficznym zapisany w danych LOG pochodzących z BSL w porównaniu z projektem oraz danymi z pomiaru referencyjnego. Analizy obejmują zestawienia, w których podawane są odległości poziome i pionowe realizowanej misji od projektu. Biorąc pod uwagę charakterystykę tego zadania, w którym BSL dokonuje zmiany kierunku lotu poprzez zakręt po zatrzymaniu, podawane różnice powinny być obliczane jako długość rzutu prostopadłego punktów wyzwolenia zdjęć na projektowaną linię nalogu. W celu ułatwienia analiz punkty położone po prawej stronie od projektowanej trasy należy oznaczać znakiem dodatnim, a punkty po stronie lewej ujemnym. Dodatkowo zadanie to pozwala na przeprowadzenie obliczeń mających na celu uzyskanie zbliżonych parametrów osiągnięcia zadanych współrzędnych jak w zadaniu 2. Analiza danych wynikowych z zadania 4 pozwala na stwierdzenie, iż odchyłki od linii nalogu zarejestrowane przez instrument MS50 względem wartości projektowych różnią się znacznie w nalogach przy słabym i silnym wietrze. Wartość odchylenia standardowego różnic większa dla pomiarów podczas wiatru także jednoznacznie wskazuje na wpływ wiatru na rejestrowane różnice. Różnice pomiędzy MS50 a danymi z BSL pozwalają na wyznaczenie dokładności urządzenia. Na podstawie analizy rysunków i tabel przedstawionych w publikacji [A6] można także zauważyć

systematyczne przesunięcie całych misji względem projektu o wartości wynikające z niedokładności rozwiązania współrzędnych przez odbiornik GNSS. Dodatkowo pomocne w ocenie poprawności wykonywania misji są zestawienia różnic wysokości dla kolejnych miejsc wyzwolenia migawki. Analizując rysunki z przebiegiem misji, można stwierdzić, iż w warunkach silnego wiatru prostoliniowość nalotu jest mocno zaburzona, co skutkuje dużymi rozbieżnościami w odległościach pomiędzy kolejnymi pasami nalotu.

W zadaniu 5 zasadę określania wartości odchylenia od projektowanej linii nalotu należy przyjąć identyczną jak we wcześniejszym zadaniu. Ważnymi parametrami, jakie należy przeanalizować, są dane dotyczące odległości od końca planowanych pasów nalotu, w których BSL wykonywał zwrot. Wartości te należy obliczać jako rzuty najkrótszych odcinków łączących trajektorię ruchu BSL zrutowanych na linię prostopadłą do pasów nalotu. Tego typu analiza pozwala na określenie wartości, o jaką należy powiększyć misję fotogrametryczną, aby objąć nią cały obszar zadania.

Analiza wyników zadania 5 pozwala na stwierdzenie, że lot bez zatrzymywania nie jest podatny na silny wiatr tak jak przelot z zatrzymywaniem się urządzenia. Porównanie wyników dla zestawów danych PROJ-MS50 i PROJ-LOG przedstawionych w publikacji [A6] dla danych poziomych wykazuje, iż mają one podobne przebiegi. W przypadku analizy różnic MS50-BSL w płaszczyźnie poziomej różnice widoczne na wykresach w publikacji [A6] dla słabego wiatru wskazują na występowanie jedynie błędów przypadkowych w obserwacjach GNSS odbiornika zainstalowanego w BSL. Wykres wyników dla testu w wietrze wskazuje na występowanie czynnika systematycznego związanego z parciem wiatru, ma on jednak charakter powtarzalny, co nie będzie miało wpływu na pokrycia poprzeczne zdjęć [A6]. W przypadku analizy różnic wysokości potwierdzenie znajdują wcześniejsze obserwacje dotyczące nie osiągnięcia przez BSL projektowanej wysokości. Dodatkowo warto podkreślić fakt, iż BSL wyposażony w ten komputer pokładowy nie osiągał planowanych długości pasów nalotu. Dodatkowo na rysunkach opracowanych podczas testów widoczne jest, iż po zwrocie BSL zbliża się do planowanego pasa nalotu stopniowo. Warto zaznaczyć, że siła wiatru nie wpływała znacząco na ten parametr.

Biorąc pod uwagę wyniki otrzymane w zadaniach 4 i 5 przeprowadziłem dodatkowo w analizę wpływu niedokładności realizowania misji fotogrametrycznych na pokrycia zdjęć. Lot BSL wykonany niezgodnie z projektem w płaszczyźnie poziomej skutkuje zmniejszeniem lub zwiększeniem odległości pomiędzy kolejnymi szeregami nalotu. Skutkiem tego będzie zmniejszenie lub zwiększenie pokryć poprzecznych pomiędzy pasami nalotu.

W przypadku realizowania misji fotogrametrycznych zastosowanie trajektorii, w których BSL wykonuje nalot bez zatrzymywania, daje o wiele lepsze rezultaty. Należy jednak pamiętać o tym, aby wydłużyć odpowiednio długości pasów nalotu poza zakres opracowania w zależności od używanego typu komputerów pokładowych. Warto nadmienić, że zmiana trajektorii lotu BSL różni się znacznie w zależności od producenta i rodzaju komputera pokładowego, który jest odpowiedzialny za jej realizację. Dodatkowo należy pamiętać o poszerzeniu zakresu realizowanej misji, aby uwzględnić możliwość wystąpienia błędów wynikających z wyznaczenia położenia poziomego.

Podsumowując należy stwierdzić, iż stworzenie przeze mnie odpowiedniej, bezpiecznej bazy pomiarowej oraz zestawu testów pozwalających na określenie zachowania BSL w locie pozwoliło na określenie warunków brzegowych stosowalności tego typu urządzeń w różnych scenariuszach prowadzenia misji, a opracowana metodologia badania dokładności realizowania misji BSL jest unikatowym rozwiązaniem na skalę światową i stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe.

Zdobyte doświadczenie podczas testów urządzeń znajdujących się na stanie WGGiIŚ AGH pozwoliły mi na podjęcie wyzwań związanych z realizacją prac badawczych w wymagającym terenie górskim o charakterze alpejskim [A11, A12, A13]. Prace te poprzedziły dodatkowe analizy związane z testowaniem i optymalizacją procedur pozyskiwania danych na takich obszarach [A7, A8, A9, A10].

Pomimo niewątpliwie wielu zalet systemów bezzałogowych pojawia się również pytanie o dokładność uzyskanych opracowań. W ramach badań przedstawionych w publikacjach [A7 i A8]

postanowiłem zbadać dokładność produktów generowanych na polach testowych w porównaniu z dużymi zbiorami danych referencyjnych. Kluczowym elementem w tego typu opracowaniach pozyskiwanych z BSL jest wielkość piksela terenowego, na którą wpływ mają przede wszystkim wysokość nalotu oraz zastosowane kamery i obiektywy. Ważnym aspektem jest również sposób zapewnienia georeferencji produktom wynikowym. W tym przypadku bardzo ważne jest zaprojektowanie optymalnej konfiguracji osnowy fotogrametrycznej. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na dobranie odpowiedniego pokrycia podłużnego i poprzecznego zdjęć. Są to aspekty będące aktualnie przedmiotem wielu badań. Badany jest wpływ konfiguracji i liczebności fotopunktów na dokładność produktów pozyskiwanych z BSL [Forlani i inni 2018; Prajwal i inni, 2016; Tahar, 2013]. Analizowane jest również optymalne pokrycie zdjęć pozyskiwanych z pokładu BSL [Dandois 2015; Mesas-Carrascosa i inni, 2015; Torres-Sánchez i inni, 2018]. Nie przeprowadzono jednak badań analizujących oba te czynniki jednocześnie, co stało się celem analiz przedstawionych w publikacji [A7]. Badanie przeprowadziłem na obszarze o powierzchni około 4 ha użytkowanym rolniczo, o małym urozmaiceniu rzeźbie. Przed wykonaniem nalotów fotogrametrycznych na obszarze testowym rozmieściłem równomiernie 100 tarcz w siatce o oczku około 25 m. Ich współrzędne wyznaczono metodą RTN GNSS. Spośród pomierzonych punktów wybrano cztery konfiguracje, po dziesięć tarcz każda, które posłużyły jako punkty osnowy fotogrametrycznej. Pozostałe punkty, które nie posłużyły jako fotopunkty w żadnej z konfiguracji osnowy fotogrametrycznej, wykorzystałem jako punkty kontrolne. Przeprowadziłem pięć nalotów BSL różniących się pokryciem podłużnym i poprzecznym zdjęć. Należy wspomnieć, że przeprowadziłem również analizy na referencyjnym NMT pozyskanym za pomocą pomiarów tachymetrycznych. Celem było zbadanie dokładności numerycznych modeli terenu (NMT) oraz ortofotomozajek uzyskanych za pomocą BSL w zależności od konfiguracji osnowy fotogrametrycznej i zastosowanego pokrycia zdjęć.

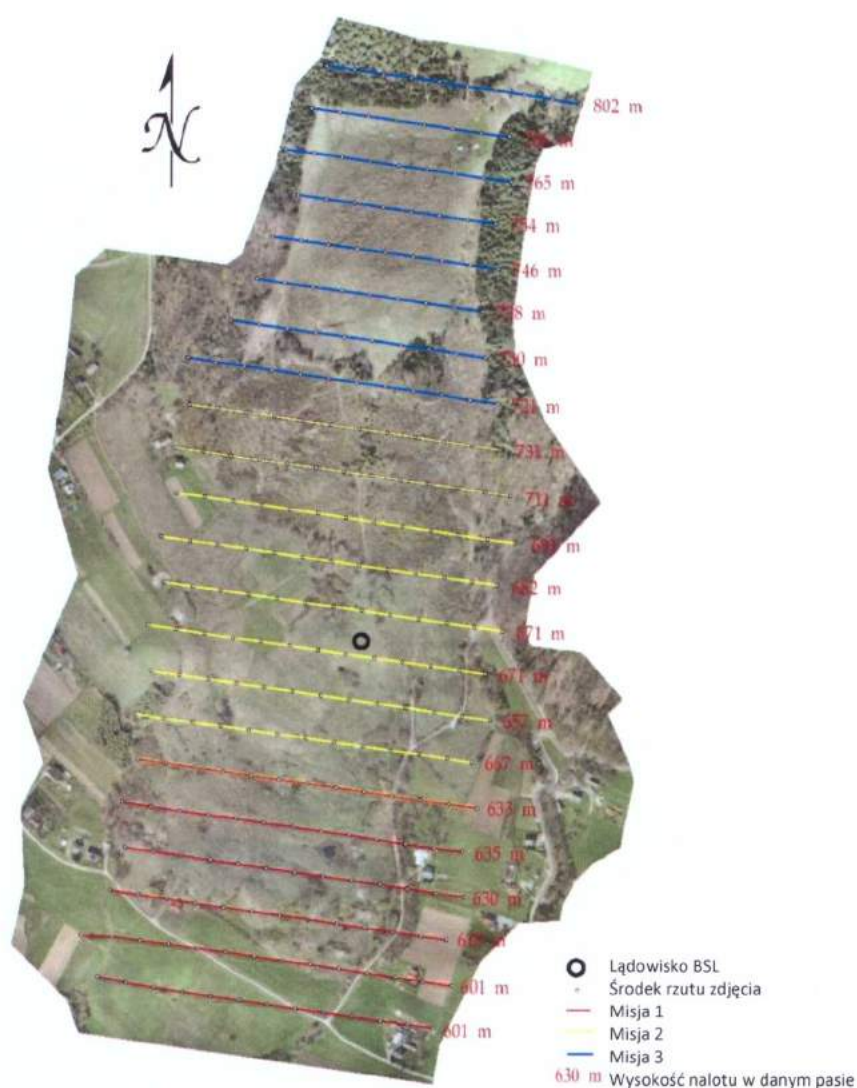
W wynikach tych badań nie zaobserwowałem wyraźnego związku pomiędzy dokładnością opracowania a konfiguracją osnowy fotogrametrycznej. Należy jednak zwrócić uwagę, że każda z analizowanych konfiguracji tarcz pomiarowych była projektowana w sposób zgodny z zasadami zakładania osnowy fotogrametrycznej. Zastosowane w badaniach pokrycia zdjęć z przedziału od 60% na 40% do 80% na 60% dały podobne rezultaty. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdziłem, że błędy wysokościowe produktów fotogrametrycznych uzyskane dla różnych zbiorów danych (zmienna pokrycie zdjęć oraz zmienna konfiguracja osnowy fotogrametrycznej) są do siebie zbliżone. Nie zauważyłem, aby na analizowanym obszarze ich rozkład zależał od wyżej wymienionych czynników. Warto natomiast dodać, że test został przeprowadzony na obszarze o niewielkim urozmaiceniu terenu, w większości pozbawionemu roślinności, dzięki czemu nawet w misjach o niskich pokryciach zdjęć uzyskano poprawne rezultaty. Należy także zwrócić uwagę na to, że o wiele większy wpływ na dokładność Numerycznego Modelu Terenu ma pokrycie terenu roślinnością. Moim oryginalnym osiągnięciem naukowym jest tu przeprowadzenie analizy dokładności produktów pozyskanych w porównaniu do klasycznych metod pomiarowych i wskazanie, iż nawet przy niewielkich pokryciach możliwe jest uzyskanie satysfakcjonujących wyników opracowań pozyskanych z niskiego pułapu.

Kontynuację tego wątku badawczego prowadziłem w publikacji [A8], gdzie główny nacisk położyłem na prace związane z badaniem dokładności odwzorowania terenu porośniętego trawą o różnej wysokości. W artykule zestawiono wyniki testów przeprowadzonych z wykorzystaniem BSL i naziemnego skaningu laserowego wykonanych w celu wyznaczenia rzeźby terenu. Dokładne wykonanie tego zadania geodezyjnego jest niezbędne dla np. wyznaczania naturalnych lub antropogenicznych obniżen/wypiętrzeń powierzchni terenu. Jednym z problemów napotykanym podczas wykorzystania tych metod do wyznaczania rzeźby terenu jest wpływ roślinności porastającej teren na wyznaczone wysokości jego powierzchni. W analizowanym przykładzie teren porośnięty był głównie niską zielenią (trawą). Terenem badań było niezabudowane, naturalnie ukształtowane zbocze położone na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Większość obszaru podlegającego

miarowi była porośnięta względnie rzadką nisko skoszoną (na potrzeby pomiaru) trawą, a część analizowanego obszaru nie została jednak skoszona i porośnięta była trawą o wysokości 30-40 cm. Prace badawcze wykonano w odstępie kilku dni. Wszystkie wyniki zostały nawiązane do tych samych punktów osnowy geodezyjnej wyznaczonych za pomocą statycznych pomiarów GNSS i dodatkowo powiązanych obserwacjami kątowno-liniowymi. Dane referencyjne pozyskano z wykorzystaniem tachimetru Leica Nova MS50, mierząc do przyzmatu 360 stopni umieszczonego na tyczce. Zastosowany do tego celu sprzęt i technologia pomiarowa pozwoliła osiągnąć krótki czas pomiaru oraz wyeliminować wpływ roślinności, co nie byłoby możliwe przy bezpośrednim zastosowaniu pomiaru bezlustrowego. Podjęta została próba filtrowania chmur punktów. Celem przetwarzania było pozostawienie tylko punktów reprezentujących powierzchnię terenu i usunięcie tych, których wysokości są istotnie obciążone wpływem porastającej roślinności. Jako referencyjną powierzchnię terenu przyjęto wyznaczoną (z gęstego pomiaru) tachimetrem. Zestawienie uzyskanych dokładności, kosztów i pracochłonności pomiarów w analizowanym przykładzie wskazuje na większą opłacalność zastosowania BSL (względem TLS - naziemnego skaningu laserowego) do wyznaczania gęstego modelu rzeźby tego typu terenu. Dotychczasowe moje doświadczenia związane z wykorzystaniem TLS do pomiaru obiektów inżynierskich, a także wysoka dokładność wyznaczania pozycji mierzonych punktów w tej technologii wskazują na jej przewagę w aspekcie dokładności względem BSL. W postawionym zadaniu jednak dokładności związane z samym pomiarem miały mniejsze znaczenie niż równomierne pokrycie terenu siatką pomiarową. Dodatkowo, uwzględniając koszty sprzętu i czasochłonność pomiaru zastosowanie BSL okazało się bardziej opłacalne w tym zadaniu. Dane wyznaczone za pomocą BSL mają korzystniejsze (bardziej jednorodne) przestrzennie rozłożenie niż dane pozyskane za pomocą TLS. Pomimo, że opracowania fotogrametryczne z niskiego pułapu charakteryzują się niższą dokładnością od danych pozyskanych metodą naziemnego skanowania laserowego, to ich znaczącą przewagą jest równomierne rozmieszczenie punktów pomiarowych na obszarze opracowania, mniejsza pracochłonność pozyskania danych oraz niższa cena sprzętu. Biorąc pod uwagę produkty generowane na podstawie nalotów bezzałogowych (DEM, ortofotomozaiki, modele różnicowe), BSL są szeroko stosowane przy monitorowaniu osuwisk [Tahar i inni, 2011; Lucieer i inni, 2014; Fernández i inni, 2015; Smith i Vericat, 2015; Hsieh i inni, 2016] oraz erozji gleb i stoków [Eltner i inni, 2013; Neugirg i inni, 2015], a także przy pomiarach wybrzeży morskich pod kątem ewolucji plaż i klifów [Dewez i inni, 2016; Lu, 2016; Papakonstantinou i inni, 2016]. Warto zaznaczyć, że pojawiają się opracowania sugerujące użycie BSL do okresowego monitorowania osuwisk, a TLS do pomiarów po zaistnieniu ekstremalnych zjawisk generujących powstawanie dużych deformacji na obiektach [Hsieh i inni, 2016]. Moim oryginalnym osiągnięciem naukowym jest współautorstwo koncepcji algorytmu pozwalającego na filtrację danych pozyskanych z BSL w celu uzyskania jak najlepszego odwzorowania powierzchni terenu.

Rozszerzeniem moich badań z publikacji [A7 i A8] była analiza, której głównym celem była weryfikacja możliwości wykorzystania BSL do aktualizacji danych katastralnych na obszarach osuwiskowych [A9]. W tak postawionym zadaniu badawczym istotne było sprawdzenie dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów stanowiących treść katastralnej bazy danych w zależności od metodyki opracowania danych pozyskanych z pokładu BSL oraz określenie czy tak przygotowane materiały są wystarczające do określenia zakresu zmian, jakie zaszły w danych katastru nieruchomości. W celu zrealizowania postawionego zadania zaplanowałem i przeprowadziłem w terenie eksperyment badawczy na obszarze osuwiska, które zeszło w czerwcu 2010 roku w miejscowości Kłodne w południowej Polsce, na terenach użytkowanych głównie rolniczo. Projekt misji fotogrametrycznej objął obszar o powierzchni ponad 70 ha. Ze względu na duże nachylenie terenu przelot każdym pasem odbywał się na innej wysokości dobranej w taki sposób, aby zachować średnią wysokość fotografowania (wysokość względem poziomego terenu), a co za tym idzie odpowiednią wielkość piksela terenowego. Różnica wysokości bezwzględnej pomiędzy skrajnymi pasami nalotu

wynosiła ponad 200 m (Rysunek 4.4). Projekt misji fotogrametrycznej przygotowałem przy uwzględnieniu specyfikacji użytego sprzętu pomiarowego, charakteru terenu, w planowaniu misji uwzględniano błędy instrumentów pokładowych BSL, jakie udało się zdiagnozować w urządzeniu, którym były wykonywane pomiary. W opracowaniu danych analizie poddałem wyniki w czterech wariantach różniących się od siebie liczbą wykorzystanych fotopunktów oraz metodą ich pozyskania (pomiar fotopunktów wykonany metodą statyczną lub kinematyczną GNSS) wykorzystanych następnie do opracowania ortofotomapy i Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu. Pozwoliło mi to na wskazanie czynników wpływających na otrzymaną dokładność oraz na zweryfikowanie danych katastralnych możliwych do aktualizacji na podstawie pomiarów wykonanych przy użyciu BSL.

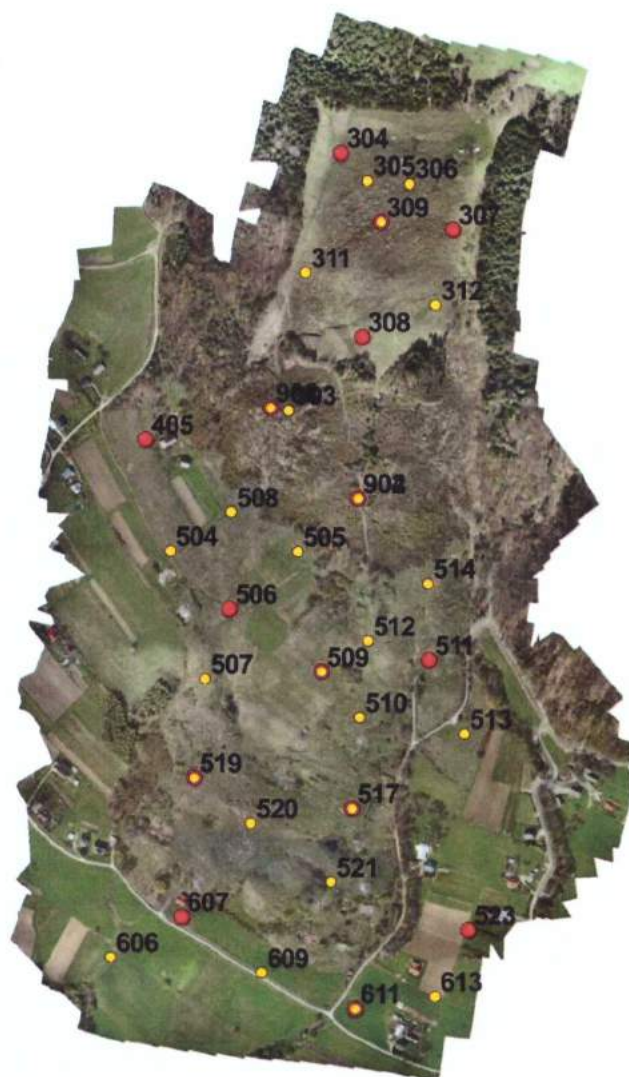


Rysunek 4.4. Projekt naltu fotogrametrycznego nad osuwiskiem

Źródło: publikacja [A9]

Na obszarze badań zastabilizowałem 33 punkty, które pełniły funkcję fotopunktów (15 punktów) i punktów kontrolnych (18 punktów). Ich rozmieszczenie przedstawiłem na rysunku 4.5. Współrzędne punktów wyznaczyłem dwoma sposobami, metodą statyczną GNSS oraz kinematyczną z wykorzystaniem techniki RTK w nawiązaniu do stacji referencyjnej sieci ASG-EUPOS.

Przed Cmielem



Rysunek 4.5. Szkic rozmieszczenia fotopunktów i punktów kontrolnych
Źródło: publikacja [A9]

Dane obserwacyjne z BSL opracowałem w czterech wariantach (Tabela 4.2), różniących się od siebie liczbą wykorzystanych fotopunktów oraz metodą ich pomiaru. W każdym wariantcie obliczeń parametry kalibracyjne kamery wyznaczono w procesie samokalibracji. Należy zauważyć, że zarówno liczba wykorzystanych punktów osnowy fotogrametrycznej, jak i sposób ich pomiaru wpływa na uzyskane wartości błędów. Średniokwadratowy przestrzenny błąd na fotopunktach dla wariantu I, uznanego za najmniej dokładny (8 fotopunktów pomierzonych metodą RTK GNSS), jest ponad dwukrotnie większy od analogicznego parametru wyznaczonego dla wariantu IV (15 fotopunktów pomierzonych metodą statyczną GNSS). Przy czym w żadnym przypadku nie przekracza on wartości 0,10 m. Na uzyskane wartości błędów przestrzennych duży wpływ mają błędy wysokości, które dla celów aktualizacji bazy danych ewidencji gruntów i budynków są nieistotne. Wartości średniokwadratowych błędów współrzędnych płaskich zachowują podobną tendencję i wahają się w granicach od 0,026 m (wariant IV) do 0,048 m (wariant I).

Renat Cmiński

Tabela 4.2. Warianty opracowania danych pomiarowych

<p><u>WARIANT I</u></p> <p>8 fotopunktów pomierzonych RTK GNSS</p>	<p><u>WARIANT II</u></p> <p>15 fotopunktów pomierzonych RTK GNSS</p>
<p><u>WARIANT III</u></p> <p>8 fotopunktów pomierzonych metodą statyczną GNSS</p>	<p><u>WARIANT IV</u></p> <p>15 fotopunktów pomierzonych metodą statyczną GNSS</p>

Źródło: publikacja [A9]

W celu określenia dokładności uzyskanych produktów fotogrametrycznych i ich przydatności do aktualizacji bazy danych ewidencji gruntów i budynków wykonałem pomiar położenia 18 punktów kontrolnych. Otrzymane wyniki porównałem z danymi uzyskanymi poprzez bezpośredni pomiar GNSS zarówno metodą statyczną, jak i RTK. Opisane w artykule badania udowodniły, że ortofotomozaika oraz NMPT wykonane z odpowiednią starannością, na podstawie danych pozyskanych z bezzałogowego statku latającego mogą służyć aktualizacji danych katastralnych, również w tak trudnym terenie jak obszary objęte ruchami masowymi. W tym celu na całym obszarze opracowania należy założyć odpowiednią osnowę fotogrametryczną. Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że dokładność produktów fotogrametrycznych z niskiego pułapu praktycznie nie różni się dla tych dwóch metod pozyskania współrzędnych fotopunktów. Nieznacznie lepsze wyniki uzyskałem dla trzeciego i czwartego wariantu, w których zastosowano współrzędne fotopunktów z metody statycznej GNSS. Jednak biorąc pod uwagę czasochłonność i pracochłonność takiego pomiaru, metoda ta nie daje znacząco lepszych wyników od metody RTK GNSS. Ważniejszym czynnikiem wpływającym na dokładność opracowań fotogrametrycznych jest liczba wykorzystanych fotopunktów. Dla wariantu I i III, w których użyto tylko 8 fotopunktów, analiza dokładności ortofotomapy i NMPT daje satysfakcjonujące wyniki z punktu widzenia wymagań określonych w rozporządzeniu w sprawie ewidencji gruntów i budynków [Rozporządzenie, 2001], a maksymalne odchyłki na pojedynczych punktach kontrolnych uzyskują wartości dochodzące do 0,100 m. Mimo to zalecam stosowanie większej liczby punktów osnowy fotogrametrycznej w celu podniesienia pewności wygenerowania produktów fotogrametrycznych. Moim oryginalnym osiągnięciem jest w tym przypadku określenie wymaganej dokładności i liczebności punktów osnowy naziemnej niezbędnej do uzyskania na punktach kontrolnych wymaganych dokładności w przypadku prowadzenia pomiarów na obiektach o znacznym nachyleniu.

W związku z tym, że docelowo planowałem przeprowadzenie prac badawczych związanych z analizami stanu szlaków turystycznych położonych w terenie o charakterze alpejskim, kolejnym zadaniem, z jakim się zmierzyłem, było przeprowadzenie testów związanych z optymalizacją procesu prowadzenia badań terenowych wzdłuż takich obiektów. W artykule [A10] przeanalizowałem problem odpowiedniego doboru parametrów misji oraz rozmieszczenia osnowy naziemnej na potrzeby inwentaryzacji fotogrametrycznej obiektów liniowych położonych w terenie o dużych różnicach wysokości. Wykorzystanie do tego celu BSL wymaga poprawnego zaprojektowania misji fotogrametrycznej oraz optymalizacji osnowy naziemnej.

Podczas badań przeanalizowałem wpływ dwóch czynników takich jak parametry lotu oraz konfiguracja osnowy fotogrametrycznej na dokładność generowanych produktów. Podczas badań pozyskano dane dotyczące dwóch ścieżek pieszych położonych w terenie o znacznych deniwelacjach. Projekty misji fotogrametrycznych wykonałem w oparciu o analizy przekrojów podłużnych terenu, przy

założeniu, że skala wszystkich zdjęć będzie stała (stały rozmiar piksela terenowego). Wymagało to zaprojektowania zmiennej wysokości lotu BSL względem miejsca startu, dostosowanej do ukształtowania terenu oraz uwzględnienia w planowaniu misji błędów instrumentów pokładowych BSL, jakie udało się zdiagnozować w urzędzeniu, którym były wykonywane pomiary.

BSL zawsze poruszał się na stałej wysokości nad powierzchnią terenu. Wykonane naloty różniły się natomiast liczbą pasów oraz pokryciem zdjęć. Nalot numer 1 istotnie różnił się od dwóch pozostałych, zakładał wykonanie zdjęć tylko w jednym pasie, z pokryciem 80% wzdłuż osi obu mierzonych ścieżek. Podczas drugiego i trzeciego nalotu zdjęcia pozyskałem w dwóch równoległych pasach, zachowując pokrycie poprzeczne zdjęć równe 70% (nalot nr 2) i 60% (nalot nr 3), przy pokryciu podłużnym na poziomie 80%.

Podczas prac terenowych wzdłuż badanych ścieżek założyłem osnowę fotogrametryczną (fotopunkty) oraz punkty kontrolne. Fotopunkty oraz punkty kontrolne zostały rozmieszczone na całym obszarze badań. Wzdłuż każdej ze ścieżek założono 3 szeregi punktów, jeden w osi ścieżki i dwa w odległości około 20 metrów od osi. Punkty zakładałem na przemian w odległości około 25 metrów. Ostatecznie założyłem 170 punktów, w tym 86 fotopunktów i 84 punkty kontrolne. Tak duża liczba fotopunktów umożliwiła mi przeprowadzenie szeregu analiz dotyczących optymalizacji ich rozmieszczenia, natomiast punktów kontrolnych użyłem przy analizie dokładności. Każdy z punktów został zamierzony metodą RTN GNSS w państwowym układzie współrzędnych geodezyjnych PL-2000/7. Dla każdego z trzech przeprowadzonych nalotów zdecydowałem się przetestować cztery różne warianty rozmieszczenia fotopunktów. W pierwszym wariantcie wykorzystano wszystkie 84 fotopunkty, średnia odległość między punktami wynosiła około 25 m (Rysunek 4.6a). Drugi wariant bazował na 27 punktach znajdujących się w odległościach około 100 m od siebie (Rysunek 4.6b). W kolejnej konfiguracji osnowy zastosowałem tylko 12 fotopunktów oddalonymi od siebie o około 250 m (Rysunek 4.6c). Ostatni wariant uwzględniał tylko fotopunkty położone w osi obu ścieżek (Rysunek 4.6d).

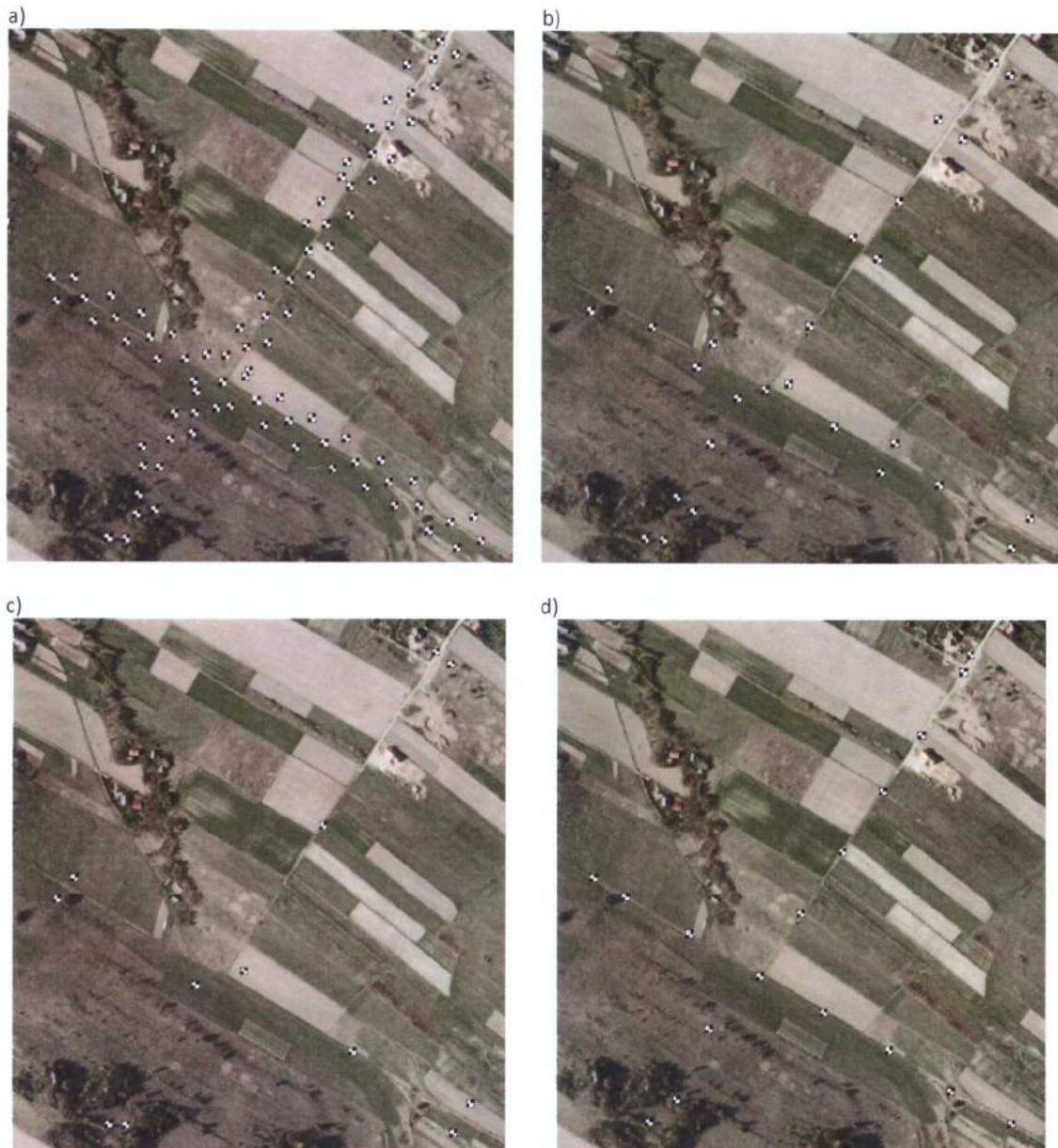
Produkty fotogrametryczne (ortofotomapy i NMPT) wygenerowane na podstawie dwunastu zestawów danych poddałem szczegółowej analizie dokładności. W tym celu z modeli fotogrametrycznych odczytałem współrzędne punktów kontrolnych. Następnie porównałem je ze współrzędnymi tych punktów pozyskanymi w wyniku pomiarów terenowych. W ten sposób wyznaczyłem różnice (odchyłki) współrzędnych, a na ich podstawie różnicę minimalną i maksymalną, średnią różnicę współrzędnych oraz odchylenie standardowe różnic współrzędnych.

Dla każdego zestawu danych wykonałem test Shapiro-Wilka. Dla założonego poziomu istotności ($\alpha = 0,05$) stwierdziłem, że test nie został spełniony dla dwóch przypadków. Dotyczą one różnic współrzędnych X dla zestawów danych z nalotu pierwszego, konfiguracja osnowy III i IV (fotopunkty co 250 m i fotopunkty tylko w osi ścieżek). Świadczy to o występowaniu dodatkowego czynnika wpływającego na obliczone różnice (poza błędami przypadkowymi). Dla pozostałych zestawów danych nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu.

Przy analizie danych z nalotu 1 zauważyłem, że najgorsze wyniki (największe różnice współrzędnych, największe odchylenie standardowe) uzyskałem dla trzeciego wariantu konfiguracji fotopunktów, natomiast najlepsze dla wariantu I. Odchylenie standardowe różnic współrzędnych X i Y wyniosło około 4 cm, a różnic wysokości 6 cm.

Dokładność produktów fotogrametrycznych wygenerowanych na podstawie danych pozyskanych podczas drugiego i trzeciego lotu BSL jest wyższa. Świadczą o tym zarówno wartości maksymalnych i minimalnych różnic współrzędnych, jak i ich odchyłeń standardowych. W obu przypadkach najlepsze wyniki uzyskano dla pierwszego wariantu konfiguracji osnowy fotogrametrycznej. Nie mniej jednak różnice pomiędzy dokładnościami pozostałych wariantów konfiguracji fotopunktów są niewielkie. Wyznaczone wartości odchyłeń standardowych współrzędnych są ze sobą zbieżne na poziomie 1 cm.

Rozpatrując wartości i kierunki odchyłek sytuacyjnych i wysokościowych, stwierdziłem, że wyniki uzyskane na podstawie danych z nalotu 1 (w każdej konfiguracji osnowy fotogrametrycznej) znacznie różnią się od tych uzyskanych dla pozostałych zbiorów danych (dane z nalotu 2 i 3 w każdej konfiguracji osnowy fotogrametrycznej).



Rysunek 4.6. Konfiguracje fotopunktów: a) wariant I – wszystkie fotopunkty; b) wariant II – 27 fotopunktów co 100 m; c) wariant III – 12 fotopunktów co 250 metrów; d) wariant IV – 17 fotopunktów, punkty tylko w osi ścieżek

Źródło: publikacja [A10]

Podsumowując wyniki przedstawione w publikacji [A10], podczas planowania lotów nad szlakami w terenie górskim należy zwrócić szczególną uwagę na projekt lotu. Należy pamiętać, że BSL latają na dużo mniejszych wysokościach niż samoloty załogowe. Z tego powodu deniwelacje terenu, przy stałej wysokości lotu BSL, mają duży wpływ na zmianę rozmiaru piksela terenowego oraz pokrycia pomiędzy zdjęciami. Biorąc to pod uwagę, należy przygotować projekt lotu, podczas którego BSL

będzie się znajdowało na stałej wysokości względem powierzchni terenu, a nie względem miejsca startu. Ponadto należy uwzględnić wykryte błędy w działaniu komputerów pokładowych. Planując dalsze pomiary, należy pamiętać, że wykonanie zdjęć tylko w jednym szeregu (bez pokrycia poprzecznego) jest niewystarczające do tworzenia wysokiej jakości dokumentacji obiektów liniowych położonych w terenie o dużych deniwelacjach terenu. Wyrównanie bloku zdjęć dla tak pozyskanych danych okazało się problematyczne. Wygenerowane produkty fotogrametryczne charakteryzują się również najniższą dokładnością (spośród opracowywanych zbiorów danych). Z kolei dane pozyskane podczas misji obejmujących dwa szeregi zdjęć pozwoliły na utworzenie produktów charakteryzujących się podobną dokładnością. Oznacza to, że pokrycie poprzeczne zdjęć wynoszące minimum 60% jest wystarczające do wykonywania dokumentacji obiektów liniowych o dużych różnicach wysokości. Dane wynikowe utworzone przy wykorzystaniu wszystkich fotopunktów (86 punktów w odległościach 25 m) są tylko nieznacznie dokładniejsze od produktów wygenerowanych dla innych testowanych wariantów konfiguracji osnowy. Ze względów ekonomicznych wykorzystanie tak dużej liczby fotopunktów jest nieopłacalne. Fotopunkty rozmieszczone w odległościach 250 metrów od siebie pozwalają na uzyskanie porównywalnych, satysfakcjonujących wyników. Fotopunkty powinny być rozlokowane nierównomiernie zarówno w osi badanego obiektu, jaki i poza nią. Zalecam również zagęszczenie fotopunktów w miejscach, w których teren charakteryzuje się największym nachyleniem. Moim oryginalnym osiągnięciem jest opracowanie metodyki prowadzenia prac badawczych dla obiektów liniowych z wykorzystaniem BSL w terenach górskich o charakterze alpejskim.

Ostatnim etapem moich badań w ramach cyklu publikacji były prace związane z oceną przydatności bezzałogowych statków latających do inwentaryzacji szlaków turystycznych w terenach górskich o charakterze alpejskim. Badania te prowadziłem w Tatrzańskim Parku Narodowym, w latach 2016 i 2017. Byłem kierownikiem zespołu badawczego, który przeprowadził terenowe prace badawcze mające na celu ocenę stanu szlaków górskich położonych we wszystkich piętrach roślinności tatrzańskiej na niemal 60 kilometrach długości. Tatrzański Park Narodowy zaliczany jest do parków najbardziej "obciążonych" ruchem turystycznym w Europie. Wyjątkowa popularność tego miejsca jest przyczyną intensyfikacji procesów morfogenetycznych, których skutkiem jest rozwój licznych form erozyjnych. Dodatkowo w jesieni 2018 roku przeprowadziłem prace związane z inwentaryzacją 20 km koryt potoków górskich w celu dokumentacji zmian, jakie zaszły w terenie po nawalnych deszczach w lipcu tamtego roku. W oparciu o zrealizowane badania oraz na podstawie doświadczeń zdobytych w ramach wcześniejszych prac [A7, A8, A9 i A10], opracowałem pełną metodykę pozyskania danych w tak trudnym i wymagającym terenie, jakim są szlaki lub inne obiekty liniowe charakteryzujące się dużymi deniwelacjami. Zaproponowane rozwiązanie obejmuje opracowanie metodyki prowadzenia prac przygotowawczych oraz terenowych związanych z pozyskaniem zdjęć pionowych z pokładu bezzałogowego statku latającego wraz z danymi umożliwiającymi ich georeferencję. Ponadto przeprowadziłem skanowanie laserowe wybranych fragmentów szlaków wraz z pomiarem poprzecznych profili kontrolnych w różnych miejscach szlaków w celu oceny dokładności pozyskiwanych wyników. Dodatkowo poddałem ocenie zastosowania przygotowanych produktów zarówno do oceny zasięgu i nasilenia erozji wzdłuż szlaków turystycznych, jak i badania sukcesji roślinności czy stanu drzewostanu w terenie bezpośrednio przylegającym do szlaków turystycznych. Rezultaty tych prac przedstawione są w publikacjach [A11, A12, A13]. Poniżej przedstawię zbiorczo ich zakres. Podczas każdej sesji badawczej pracowałem nad przygotowaniem wszystkich misji fotogrametrycznych, konfiguracją osnowy pomiarowej oraz byłem pomysłodawcą i wykonawcą szeregu opracowań związanych z analizą wyników pozyskanych podczas prac terenowych.

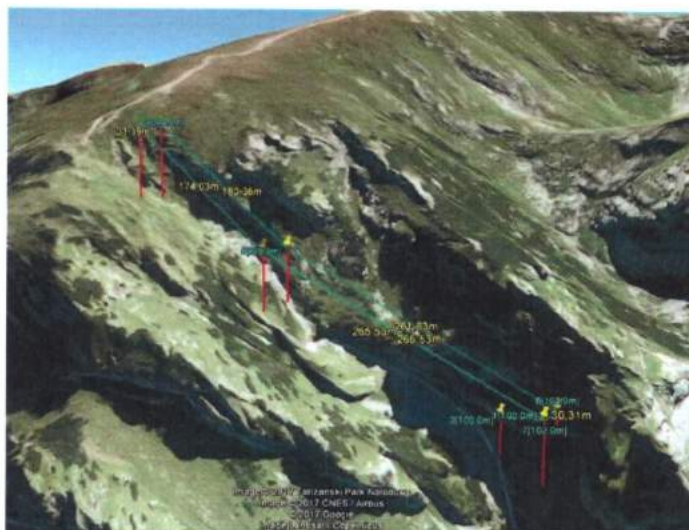
W artykułach [A11, A12, A13] szczegółowo opisałem proces pozyskania danych przestrzennych za pomocą bezzałogowych statków latających w trudnym górskim terenie. Obszar, na którym były prowadzone badania, jest wymagający i narzuca konieczność precyzyjnego zaplanowania misji BSL oraz

rozmieszczenia fotopunktów z uwzględnieniem wielu czynników. W szczególności należy na tym etapie zwrócić uwagę na rzeźbę terenu, pokrycie roślinnością wysoką oraz wpływ dokładności systemów pokładowych BSL na dokładność realizowanej misji. Pomiary terenowe z wykorzystaniem bezałogowego statku powietrznego zostały poprzedzone opracowaniem planów lotów BSL. Projektowanie misji fotogrametrycznych przeprowadzono na podstawie informacji o zakresie opracowania, Numerycznego Modelu Terenu obszaru badań wykonanego na podstawie chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego, specyfikacji użytego sprzętu, zwłaszcza pod względem niedokładności realizowania misji w aspekcie wysokości oraz zakładanego rozmiaru piksela terenowego. Plany lotów bezałogowego statku powietrznego zostały dostosowane do charakteru obszaru opracowania, przy uwzględnieniu występujących wzdłuż szlaków deniwelacji terenu oraz ich przebiegu w płaszczyźnie poziomej. Zakres prac przygotowawczych obejmował również wskazanie optymalnych miejsc startu i lądowania urządzenia. Położenie lądowisk dobierano tak, aby były one łatwo dostępne ze szlaku, oddalone od przeszkód terenowych, tj. wysokich drzew czy ścian skalnych, oraz aby w trakcie wykonywania nalotu BSL nigdy nie znalazł się poniżej wysokości punktu startu. Dla poszczególnych odcinków projekty misji zakładały nalot w minimum dwóch szeregach równoległych względem siebie i osi szlaku. W ten sposób zaprojektowano misje o długościach do 4,5 km. Przykład zaprojektowanej misji zamieszczam na rysunku 4.7. Zakres prac przygotowawczych obejmował również wykonanie projektu rozmieszczenia punktów osnowy fotogrametrycznej (fotopunktów i punktów kontrolnych) wzdłuż tras przelotu, przy czym ze względu na trudne warunki terenowe założenia te wstępnie weryfikowano na podstawie ortofotomapy oraz NMT, mając na celu uniknięcie terenów zadrzewionych (brak widoczności z powietrza) oraz niedostępnych ze względu na duże nachylenie stoków (potencjalne niebezpieczeństwo dla zespołu pomiarowego). Moim autorskim osiągnięciem jest opracowanie metodyki planowania tego typu terenowych prac badawczych. W trakcie prac terenowych, przed rozpoczęciem każdego zaprojektowanego nalotu BSL, należało wytyczyć, zamarkować oraz pomierzyć współrzędne przestrzenne fotopunktów i punktów kontrolnych w granicach obszaru objętego daną misją fotogrametryczną. Pomiar fotopunktów i punktów kontrolnych zrealizowałem metodą RTN GNSS w nawiązaniu do sieci stacji referencyjnych lub metodą RTK GNSS w nawiązaniu do własnych stacji bazowych, które były rozmieszczone równomiernie na obszarze opracowania.

W wyniku wykonanych nalotów BSL uzyskałem bloki zdjęć cyfrowych, które poddałem obróbce fotogrametrycznej, następnie wygenerowałem gęste chmury punktów z wykorzystaniem funkcji gęstego matchingu. Kolejnymi krokami było tworzenie produktów wynikowych, które stanowiły dane wejściowe do dalszych opracowań. W pierwszej kolejności utworzyłem Numeryczny Model Pokrycia Terenu, na podstawie którego wykonana została ortorektyfikacja zdjęć oraz tworzenie ortofotomozaiki.

Podczas prac terenowych wykonałem także prace mające na celu zbadanie poprawności produktów pozyskiwanych w oparciu o wypracowaną przeze mnie metodykę. Dla potrzeb analizy dokładności modelu uzyskanego z wykorzystaniem BSL wykonałem pomiary metodą naziemnego skanowania laserowego. Pomiar obejmował fragment zielonego szlaku o długości około 400 m na Hali Kondratowej. Ponadto, w celu walidacji dokładności Numerycznego Modelu Terenu uzyskanego metodą fotogrametryczną z pułapu BSL wykonałem pomiar przekrojów poprzecznych szlaków objętych inwentaryzacją. Zastosowałem technologię pomiaru analogiczną jak przy pomiarze osnowy fotogrametrycznej. Przekroje kontrolne zrealizowałem w takich miejscach jak: szczyt Małotączniaka, Kondracka Przełęcz, wzdłuż Doliny Kondratowej, wzdłuż szlaku przy Ratuszowym Źródle (Czerwony Grzbiet), wzdłuż szlaku z Cudakowej Polany na Ciemniak.

Paweł Cmiel



Rysunek 4.7. Misja BSL dla fragmentu szlaku niebieskiego z Polany Przystół Miętusi na Małałącziak w rejonie Kobylarzowego Żlebu
Źródło: publikacja [A11]

W ramach opracowań, jakie powstały na podstawie pozyskanego materiału pomiarowego, przeprowadziłem wspomniane już wcześniej prace związane z oceną dokładności pozyskanych produktów [A11], badaniem przydatności wyników w ocenie erozji szlaków [A13] oraz możliwości ich użycia w analizach stanu lasów [A12].

Jednym z celów badań, jakie przedstawiłem, była inwentaryzacja wybranych liniowych szlaków turystycznych w Tatrach na odcinkach od regla dolnego do najwyżej położonych odcinków w piętrach hal. Pomiar BSL zweryfikowano innymi metodami geodezyjnymi (pomiar przekrojów kontrolnych, naziemne skanowanie laserowe). Uzyskane dane, po ich porównaniu z danymi archiwalnymi dostarczonymi przez Tatrzański Park Narodowy (lub danymi pozyskanymi w kolejnych seriach pomiarowych) są cenną informacją pozwalającą między innymi na:

- badanie stopnia erozji szlaków w obszarach zalesionych i niezalesionych,
- badanie postępu sukcesji leśnej,
- badanie zmiany górnej granicy lasu,
- badanie wpływu denudacji antropogenicznej na zmiany granicy lasu w obszarach granic pięter roślinności w terenie bezpośrednio przylegającym do szlaków turystycznych.

Na podstawie danych z naziemnego skanowania laserowego wykonałem analizy, które polegały na porównaniu następujących warstw rastrowych: Numerycznego Modelu Terenu pozyskanego na podstawie danych z naziemnego skanowania laserowego z Numerycznym Modelem Pokrycia Terenu pozyskanym z wykorzystaniem bezałogowego statku latającego. Dzięki porównaniu danych pochodzących z naziemnego skanowania laserowego oraz pozyskanych z BSL możliwe było oszacowanie dokładności uzyskanych wyników. Przykłady przedstawione w publikacji [A11] pozwalają wyciągnąć następujące wnioski:

- dane na obszarze odsłoniętego szlaku charakteryzują się wysoką zgodnością (na poziomie 5 cm),
- na obiektach pokrycia terenu widoczne są duże różnice wynikające z porównania NMT pochodzącego ze TLS względem NMPT pochodzącego z BSL,
- duże różnice na granicy opracowania są skutkiem interpolacji danych z naziemnego skanowania laserowego oraz niewielkiej rozdzielczości skanowania w odległości powyżej 30 m od szlaku.

Ryszard Cwik

W celu uzyskania danych liczbowych charakteryzujących dokładność danych pozyskanych z BSL na obszarach szlaków turystycznych, które były przedmiotem badań przedstawionych w artykule [A11], wykonałem również analizy porównujące chmurę punktów z naziemnego skanowania laserowego z chmurą punktów i siatką mesh wygenerowanymi na podstawie zdjęć z BSL. Wybrałem dwa pola testowe. Pierwsze z nich obejmowało fragment szlaku przy schronisku na Hali Kondratowej oraz teren go otaczający. W pierwszym kroku przeprowadzono punktową analizę różnic pomiędzy danymi z BSL i TLS. Średnia wartość różnicy wyniosła w obu przypadkach około 0,05 m z odchyleniem standardowym na poziomie 0,05 m. Analogiczne obliczenia wykonano dla całego zbioru danych pozyskanego metodą naziemnego skanowania laserowego. W tym przypadku średnie różnice nieznacznie przekroczyły 0,04 m (z odchyleniem standardowym rzędu 0,04 m). Drugi obszar to część obszaru pierwszego zawierający fragment szlaku w bezpośrednim sąsiedztwie schroniska na Hali Kondratowej. Charakteryzuje się on brakiem roślinności i dużą gęstością chmury punktów pozyskanej z TLS. Dla tego obszaru wyznaczono różnice pomiędzy chmurą punktów z TLS a chmurą punktów utworzoną na podstawie zdjęć z BSL. Dla tego obszaru otrzymano średnią wartość różnicy 0,062 m z odchyleniem standardowym 0,013 m. Niska wartość odchylenia standardowego uzyskana dla drugiego pola testowego świadczy o tym, że obie metody odwzorowały ukształtowanie terenu w sposób porównywalny, a największe względne różnice występują na krawędziach skał. Z kolei wyższe wartości odchylenia standardowego dla pierwszego pola testowego wynikają z różnicy gęstości obu zbiorów punktów oraz występującej na tym obszarze roślinności. Zaproponowany przeze mnie sposób oceny dokładności danych z BSL wykazuje możliwość wykrycia, czy pomiędzy metodami występuje przesunięcie, które może wynikać z dokładności nadawania georeferencji lub niezachowania parametru skali i świadczy o poziomie dokładności, na jakim mogą być porównywane. Ocena dokładności pozyskanych materiałów przeprowadziłem również na podstawie przekrojów kontrolnych, dla których analizowałem różnice wysokości punktów przekroju uzyskane różnymi metodami pomiaru. Na podstawie współrzędnych płaskich punktów kontrolnych wyznaczono linie, względem których wykonano przekroje kontrolne. Przekroje te opracowałem, wykorzystując wszystkie dostępne w danym miejscu źródła danych o ukształtowaniu terenu, to znaczy:

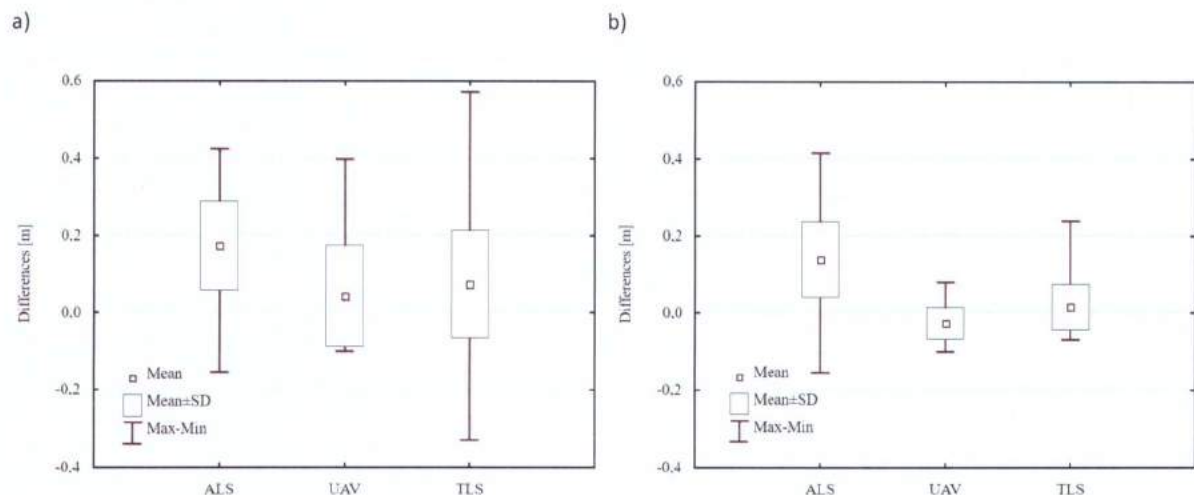
- punkty pomierzone metodami RTK/RTN GNSS – dane o najwyższej dokładności przestrzennej ($\pm 2 \div 3$ cm), jednak małej rozdzielczości. Należy zwrócić uwagę na problem generalizacji rzeźby terenu występujący podczas pomiaru dyskretnego,
- NMT pozyskany z naziemnego skanowania laserowego – dane o wysokiej dokładności przestrzennej (± 5 cm) i bardzo dużej rozdzielczości (3 cm) w obrębie szlaku,
- NMPT pozyskany z BSL – dane o nieco niższej dokładności przestrzennej (± 10 cm) i bardzo dużej rozdzielczości ($3 \div 5$ cm),
- NMT pozyskane z archiwalnych chmur punktów lotniczego skanowania laserowego (ALS) – dane o najniższej dokładności (± 30 cm) i niskiej rozdzielczości (35 cm).

Choć pomiary RTK/RTN GNSS charakteryzują się niewielką gęstością, to można zaobserwować bardzo wysoką zgodność uzyskanych wysokości z modelem pochodzącym z zobrazowań z poziomu BSL, co potwierdza poprawność wykonania obu pomiarów. Natomiast widoczny w niektórych przypadkach odstęp dla danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego (około 30 cm) wynika z dokładności tego typu danych. Dodatkowo należy podkreślić, że dane z lotniczego skanowania laserowego (ALS) pochodzą z 2012 roku. Z tego względu nie można wykluczyć wpływu zmian ukształtowania terenu na prezentowany wynik.

W dalszej kolejności, przyjmując za najdokładniejszą metodę pomiarową RTK/RTN GNSS, określiłem parametry pozwalające ocenić dokładność wyników uzyskanych pozostałymi metodami, tj. średnią różnicę wysokości, różnicę maksymalną i minimalną oraz odchylenie standardowe wyznaczonych różnic. Analizę wykonałem na dwa sposoby. W pierwszym brano pod uwagę wszystkie

punkty pomierzone metodą RTK/RTN GNSS, a w drugim – jedynie punkty na utwardzonej części szlaku. Dla pierwszego wariantu obliczeń parametry oceny dokładności wyznaczono na podstawie wszystkich punktów na profilach kontrolnych. W tym przypadku średnie różnice wysokości dla każdej z metod mają wartości dodatnie, a odchyłki o znaku dodatnim są znacznie większe od maksymalnej ujemnej różnicy wysokości. Na tej podstawie można dojść do wniosku, że punkty pomierzone metodą RTK/RTN GNSS znajdują się poniżej punktów wyznaczonych pozostałymi metodami. Jest to efekt nie oddawania rzeczywistego ukształtowania terenu przez produkty pozyskane z bezałogowego statku powietrznego i metodą naziemnego skanowania laserowego (TLS) dla obszarów porośniętych roślinnością (obrazują one w dużej mierze jedynie ich pokrycie szatą roślinną). Natomiast średnia różnica pomiędzy danymi pochodzącymi z lotniczego skanowania laserowego i pomiaru GNSS uwidacznia systematyczne przesunięcie obserwacji wysokościowych nieprzekraczające średniego błędu chmury punktów ALS (Rysunek 4.8).

W celu określenia dokładności detekcji zmian związanych z erozją szlaków z analiz odrzuciłem punkty znajdujących się poza utwardzoną częścią szlaku (drugi wariant obliczeń). Doprowadziło to do znacznego obniżenia średniej różnicy wysokości obliczonej dla metod BSL i TLS. Parametry obliczone dla danych ALS praktycznie nie uległy zmianie w stosunku do pierwszego wariantu obliczeń. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku BSL wartości maksymalnej i minimalnej różnicy wysokości nie przekraczają 10 cm przy odchyleniu standardowym 41 mm. Parametry oceny dokładności dla danych TLS są nieco mniej korzystne, ale również mieszczą się w granicach szacowanej dokładności pomiaru.



Rysunek 4.8. Wykres przedstawiający parametry oceny dokładności pozyskanych danych ALS, BSL i TLS względem pomiarów RTK/RTN GNSS: a) dla punktów leżących na szlakach oraz w jego bezpośrednim sąsiedztwie; b) dla punktów leżących na szlakach

Źródło: publikacja [A11]

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki, należy zauważyć, że odśnieżone części szlaków turystycznych przy zastosowanej metodologii pomiarów mogą być inwentaryzowane metodą fotogrametryczną z użyciem BSL z dokładnością na poziomie 50 mm.

Określenie zasięgu i intensywności erozji szlaków turystycznych było jednym z głównych celów prowadzonych prac. W tym celu wykonałem porównanie chmur punktów pozyskanych z BSL względem danych archiwalnych z lotniczego skanowania laserowego dla całego obszaru opracowania. Na podstawie wyników tych analiz wygenerowałem rastrowe mapy różnicowe, które pozwalają

na wizualną ocenę stopnia i przyczyn zjawisk erozyjnych. Należy jednak pamiętać, że dane archiwalne pochodzące z lotniczego skanowania laserowego (ALS) charakteryzują się znacznie mniejszą rozdzielczością przestrzenną i tym samym część specyficznych obiektów przestrzennych tj. koryta szlaków, pojedyncze głązy, leje erozyjne mogły ulec generalizacji. Jednocześnie dane te charakteryzują się mniejszą dokładnością przestrzenną, co może się objawiać w stałym przesunięciu względem danych aktualnych, co zostało udowodnione przez pomiar profili kontrolnych oraz analizy statystyczne omówione wcześniej. Dane ALS porównałem w dwóch wersjach:

- pierwsza zawierała wszystkie klasy punktów i tym samym reprezentowała ukształtowanie terenu wraz z pokryciem (NMPT ALS);
- druga zawierała jedynie punkty sklasyfikowane jako ground, reprezentujące jedynie ukształtowanie terenu (NMT ALS).

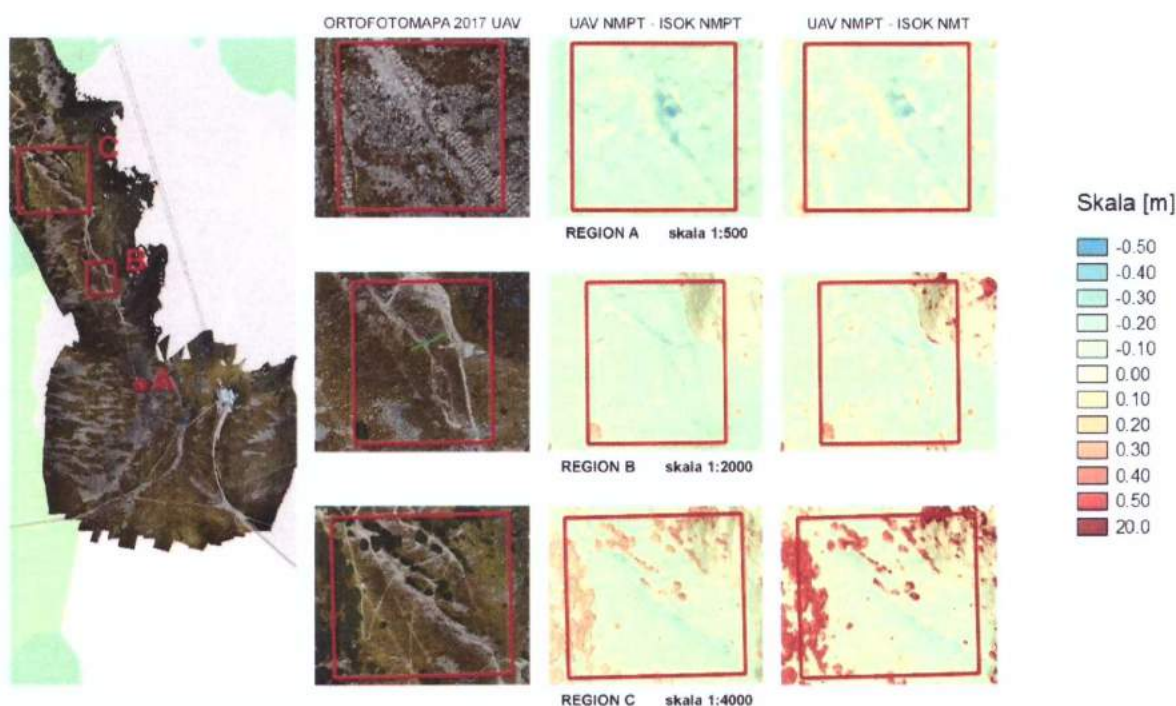
Następnie, aby uzyskać jak najbardziej wiarygodne wyniki porównań, dla danych ALS wykonywałem modele TIN (siatkę nieregularnych trójkątów). W ten sposób wyznaczone odległości pomiędzy chmurami punktów były liczone wzdłuż wektorów normalnych do wygenerowanych trójkątów, dzięki temu uzyskiwałem informacje o kierunku zmian ukształtowania terenu (ubytek/przyrost) oraz wyeliminowałem wpływ różnicy gęstości danych pomiarowych na dokładność wyznaczanych odległości. W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskałem dla zbioru pozyskanego z BSL wartość odchylenia pomiędzy NMPT i/lub NMT pochodzącym z danych archiwalnych a stanem aktualnym. Wyniki przedstawiono w postaci rastrowej (Rysunek 4.9). Ze względu na specyfikę porównywanych danych właściwa interpretacja otrzymanych map różnic powinna polegać na zlokalizowaniu lokalnych zaburzeń wartości różnic i porównaniu ich z obrazem na wysokorozdzielczej ortofotomapie. Dzięki takiemu postępowaniu możliwe jest określenie przyczyn powstałych zmian lub stwierdzenie, że są one związane z błędami pomiarowymi (np. ludzie znajdujący się na szlaku w trakcie wykonywania pomiaru).

W wyniku przeprowadzania autorskich badań opracowałem pełną metodykę prowadzenia prac terenowych oraz związanych z oceną ich dokładności w dokumentacji stanu szlaków turystycznych w terenach górskich o charakterze alpejskim.

Kolejnym z celów prowadzonych przeze mnie prac badawczych było określenie stopnia przydatności BSL do oceny intensywności erozji szlaków turystycznych w aspekcie kartowania geomorfologicznego [A13]. Podczas analiz porównałem wyniki kartowania obszarów, na których zachodzi intensywna erozja lub jest duże potencjalne zagrożenie jej wystąpieniem. Do tych celów wykorzystałem analizy omówione wcześniej. Wyniki wykorzystałem do sprawdzenia, czy produkty wygenerowane na podstawie danych pozyskanych z pokładu BSL mogą służyć do oceny intensywności erozji szlaków turystycznych. Na rysunku 4.9 zaprezentowałem wyniki uzyskane dla trzech obszarów w pobliżu kopuły szczytowej Kasprowego Wierchu, w których zaobserwowałem istotne zmiany erozyjne. Jest to obszar, na którym procesy morfogenetyczne zachodzą z dużą intensywnością. Pokazują one wyraźnie, że zastosowane technologie pomiarowe i porównawcze pozwalają na wyznaczenie obszarów podlegających zintensyfikowanym procesom erozyjnym. Przedstawione wyniki wskazują, że zastosowanie produktów pozyskanych z pomiarów BSL wykazuje dużą przydatność w pracach związanych z kartowaniem geomorfologicznym. Na ich podstawie jest możliwa wizualna oraz ilościowa ocena stopnia i przyczyn zjawisk erozyjnych w obrębie szlaków w obszarach zalesionych i niezalesionych. W oparciu o wygenerowane NMPT możliwe jest również szacunkowe określenie objętości usuniętego materiału glebowego. Dodatkowo na podstawie zdjęć lub ortoobrazu można śledzić zmiany przebiegu szlaków, zmiany szerokości, jak również ocenić potencjalne miejsca zagrożone erozją lub wymagające bieżących remontów. Należy jednak pamiętać, że wykorzystane dane archiwalne charakteryzują się znacznie mniejszą rozdzielczością przestrzenną, co powoduje,

że część charakterystycznych obiektów przestrzennych tj. koryta szlaków, pojedyncze głazy czy leje erozyjne mogą ulegać generalizacji.

Interpretacja ww. materiałów pozwoliła mi stwierdzić, że produkty utworzone na podstawie danych pozyskanych z BSL są bardzo pomocne w opracowaniach geomorfologicznych. Korzystając z nich, można z dużą dokładnością określić stopień erozji na szlakach oraz ich zmiany przestrzenne, a także ocenić wizualnie i ilościowo stopień przekształceń terenu (m.in. określić objętości usuniętych pokryw zwietrzelinowych i materiału glebowego). Możliwe jest również wyciągnięcie wniosków o dalszym przebiegu procesów erozyjnych i wyznaczenie obszarów, które erozją mogą być objęte w niedalekiej przyszłości. To z kolei pozwoli na takie planowanie przebiegu szlaków oraz ich remontów, aby zminimalizować wpływ antropopresji spowodowany przez wzmożony ruch turystyczny. Moim oryginalnym osiągnięciem naukowym jest weryfikacja możliwości zastosowania danych pozyskanych z BSL zgodnie z opracowaną wcześniej metodologią do opracowań geomorfologicznych i kartowania geomorfologicznego.



Rysunek 4.9. Zmiany rzeźby terenu w okolicach Kasprowego Wierchu

Źródło: publikacja [A13]

Poza badaniami przedstawionymi w publikacji [A11] przeanalizowałem także możliwości wykorzystania map spadków obliczonych na podstawie wysokorozdzielczego numerycznego modelu pokrycia terenu, do detekcji przebiegu pozaszlakowych ścieżek pieszych niemożliwych do wyselekcjonowania na surowej lub wstępnie przetworzonej ortofotomozajce. W wyniku tych analiz możliwa jest ocena prędkości zanikania nieużywanych szlaków zarówno w terenie porośniętym trawą jak i na gołoborzach kamiennych.

Kolejnym etapem badań była analiza przydatności BSL do oceny stanu roślinności leśnej w bezpośrednim sąsiedztwie szlaków pieszych. Metody fotogrametryczne są jednym z najpopularniejszych źródeł danych wykorzystywanych w pracach związanych z gospodarką leśną. Warto zwrócić uwagę na możliwości bezzałogowych statków latających, które pozwalają dostarczyć

informacji o mierzonym terenie w dowolnym momencie. Dodatkową zaletą jest skala wykonywanych zdjęć. W pracy [Będkowski, 2005] zwrócono uwagę, że skala zdjęć lotniczych może być niewystarczająca dla potrzeb identyfikacji pojedynczych koron drzew, w przypadku wykorzystania jednostek BSL problem ten jest minimalizowany przez odpowiedni dobór parametrów misji, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie wysokiej rozdzielczości dochodzącej do 1 cm.

W ramach tego zadania wykonałem przykładową analizę polegającą na oznaczeniu wszystkich drzew oraz ich selekcji na drzewa zdrowe, drzewa o częściowo suchych i o całkowicie suchych koronach. Wybrałem pola testowe najbardziej dotknięte zjawiskiem obumierania drzew. Były to:

- fragment żółtego/niebieskiego szlaku turystycznego z Polany Chochołowskiej na Grzesia o długości 350 m,
- trzy odcinki żółtego szlaku turystycznego z Polany Chochołowskiej do Jarząbczej Doliny o długościach: 350 m, 220 m i 520 m.

Badania były prowadzone w granicach bufora dwudziestu pięciu metrów od granicy szlaku, przy czym drzewa martwe i obumierające zaznaczono również poza wyznaczoną strefą. Za kryterium klasyfikacji drzew przyjęto ubytek aparatu asymilacyjnego. Jeżeli ubytek aparatu asymilacyjnego drzewa był:

- - mniejszy od 10% – roślinę uznawano za zdrową,
- - w zakresie od 10% do 90% – roślinę uznawano za obumierającą,
- - większy od 90% – roślinę uznawano za martwą.

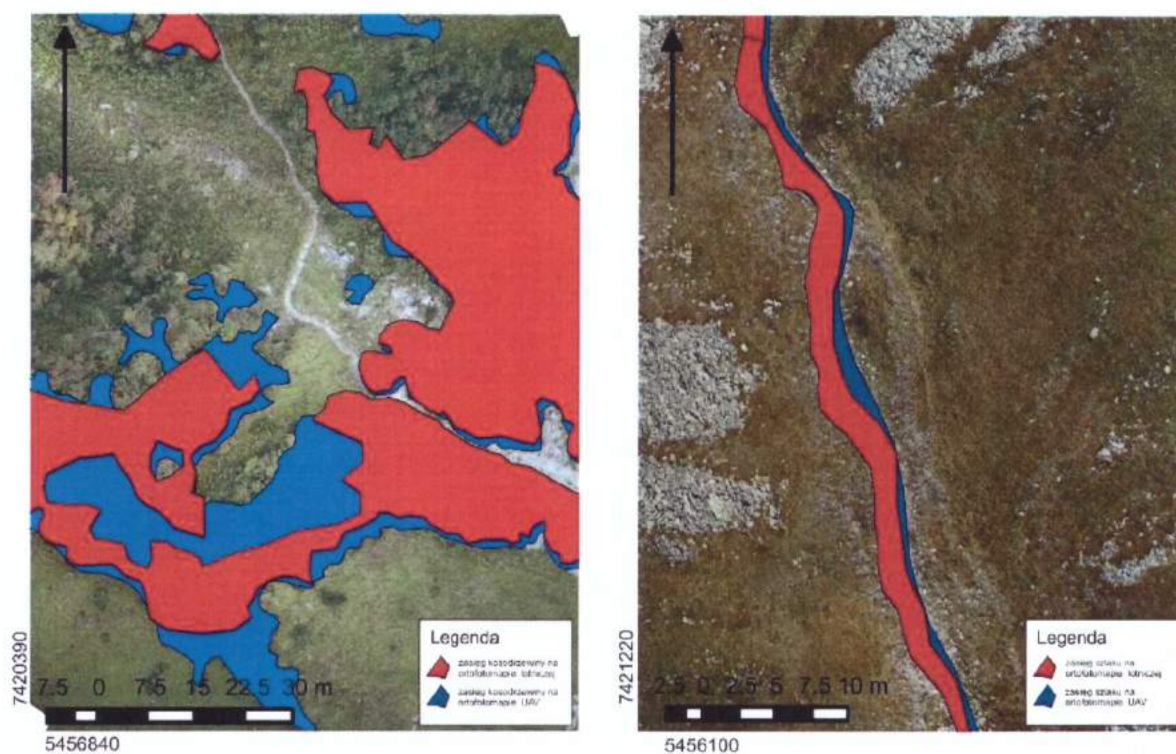
W rozpatrywanym obszarze dla stanu aktualnego (2016 r.) drzewa zdrowe stanowią 74% wszystkich drzew, drzewa o częściowo suchych konarach – 25%, natomiast martwe drzewa – 1%. Dla danych pierwotnych (2009 lub 2013 r.) ze względu na rozdzielczość materiałów z CODGiK nie było możliwe wskazywanie pojedynczych drzew (zdrowych, martwych lub obumierających), dlatego zaznaczano grupy drzew wyróżniające się inną barwą. Celem naukowym, który udało się osiągnąć jest weryfikacja przydatności zobrazowań RGB pozyskanych za pomocą BSL do oceny jakości drzewostanu.

Ponadto przeprowadziłem inwentaryzację przykładowych obszarów zajętych przez drzewa, kosodrzewinę i szlaki turystyczne. Część obszaru testowego zwektoryzowałem w celu określenia podstawowych parametrów charakteryzujących szlaki turystyczne, obszary zajęte przez kosodrzewinę i drzewa. Opracowałem sześć warstw wektorowych, obejmujących trzy grupy obiektów na ortofotomapie będącej przedmiotem opracowania oraz te same trzy grupy na ortofotomapie pozyskanej z CODGiK. Przykładowy obszar opracowania znajduje się na rysunku 4.10. łączna długość obszaru testowego wyniosła 7,2 km, na które składało się:

- 2,1 km niebieskiego szlaku turystycznego z Kobylarza na Małołącziak,
- 2,2 km żółtego szlaku turystycznego z Polany Chochołowskiej do Jarząbczej Doliny,
- 2,9 km żółto/niebieskiego szlaku turystycznego z Polany Chochołowskiej na Grzesia.

Badaniom poddałem obszar w granicach tego samego bufora, odsuniętego od granicy szlaku o 25 m. Warto podkreślić, że wektoryzacja granicy obszaru zajętego przez szlak turystyczny, kosodrzewinę lub las jest zawsze obarczone błędem interpretacji. W związku z tym takie analizy powinny być prowadzone doraźnie, w momencie zaistnienia takiej potrzeby, przez jedną osobę.

W ramach prac określiłem, jak zmieniła się powierzchnia liniowych szlaków turystycznych. Na analizowanym obszarze w wyniku porównania ortofotomap z pomiaru pierwotnego i aktualnego stwierdziłem, że całkowita powierzchnia szlaków zwiększyła się o prawie 10%, choć w przypadku opracowań niejednakowo dokładnych jest to tylko szacunkowa wartość. Na terenach leśnych zwiększenie powierzchni traktów pieszych nie przekroczyło 6%. Wykonałem także analizę średniej szerokości szlaku, próbując ją na polach testowych co pięćdziesiąt metrów. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.3.



Rysunek 4.10. Zwektoryzowany obszar zajęty przez szlak turystyczny (po prawej) i kosodrzewinę (po lewej)

Źródło: publikacja [A12]

W wyniku przeprowadzenia walidacji danych pozyskanych przy pomocy mojej autorskiej metodyki przeanalizowałem również na obszarze kontrolnym zmiany pola powierzchni lasu i kosodrzewiny. Oprócz analiz ilościowych, na podstawie materiałów archiwalnych i danych pozyskanych w ramach opracowania, można wykonywać liczne analizy jakościowe. Możliwe jest na przykład określenie zniszczeń związanych z wiatrolomami w Dolinie Chochołowskiej lub efektów działania Wspólnoty Leśnej prowadzącej w tym rejonie intensywną gospodarkę leśną.

Tabela 4.3. Średnia szerokość szlaku w 2009/2013 r. i w 2016 r., przebiegającego przez obszary leśne, porośnięte kosodrzewiną i tereny odkryte

Szerokość szlaku w obszarze:	na ortofotomapie z BSL, 2016 r.	na ortofotomapie ze zdjęć lotniczych.
Leśnym	1,2 m	1,1 m
porośniętym kosodrzewiną	2,6 m	2,3 m
odkrytym	3,4 m	2,9 m

Źródło: publikacja [A12]

4.4. Podsumowanie, perspektywy badawcze, potencjalne wykorzystanie wyników

Przedstawiony cykl publikacji miał na celu opracowanie metodyki badania dokładności położenia i realizowania przez BSL misji automatycznych oraz prowadzenia badań pokrycia i ukształtowania terenu w obszarach górskich z wykorzystaniem bezzałogowych statków latających. Podsumowując mój cały dorobek przez pryzmat postawionych na początku szczegółowych celów badawczych, ich rozwiązanie zostało przedstawione w następujących publikacjach:

1. Opracowanie metodyki prowadzenia badań i testowanie pracy BSL w realizowaniu misji w sterowaniu manualnym – [A1 i A2].
2. Badania aktualnych przepisów związanych z wykorzystaniem BSL w przestrzeni powietrznej – [A3].
3. Badanie przydatności w testach BSL norm ISO służących testowaniu robotów przemysłowych – [A4 i A5].
4. Zbudowanie ostatecznego i uniwersalnego zestawu testów pozwalającego na ocenę pracy BSL – [A6].
5. Badanie dokładności produktów pozyskiwanych przy użyciu BSL, próby filtracji danych dla niskiej roślinności – [A7, A8, A9].
6. Wypracowanie metodyki prowadzenia prac badawczych w terenach górskich o charakterze alpejskim – [A10].
7. Analizy przydatności danych pozyskanych z pokładu BSL zgodnie z opracowaną metodyką do oceny jakości szlaków, zniszczeń antropogenicznych i analiz leśnych – [A11, A12, A13].

W pierwszej części cyklu publikacji omówiłem moje autorskie badania, które miały na celu opracowanie metodyki prowadzenia tego typu testów oraz przeprowadzenie ich w warunkach starowania BSL w trybie manualnym. W dalszej części cyklu publikacji przeprowadziłem szereg analiz aktów prawnych pod kątem prowadzenia misji z wykorzystaniem BSL. Biorąc pod uwagę to, że do tej pory rozwój międzynarodowego rynku BSL hamowany był przez nieskoordynowane przepisy krajowe, co bardzo utrudniało wdrożenie unijnej idei Urban Space (U-Space), należy zaakcentować, iż jednym z aspektów wdrożenia tej idei jest certyfikacja urządzeń. Przeprowadzone przeze mnie prace koncepcyjne związane z odpowiednią konfiguracją zestawu testów dla określenia dokładności realizowania misji z wykorzystaniem BSL wpisują się w ten trend. Trzeba podkreślić, że zbudowanie zestawu testów do pomiaru położenia BSL w przestrzeni w celu oceny możliwości zastosowania konkretnego zestawu BSL w misjach specyficznych, wymagających wykonania lotów przy małych separacjach poziomych i pionowych, na precyzyjnie ustalonych wysokościach oraz w obszarach o skomplikowanej morfologii terenu takich jak gęsta zabudowa miast, zakładów przemysłowych czy też w terenach górskich daje ogromne możliwości. Zaproponowany przeze mnie zestaw testów, stanowiący oryginalne osiągnięcie, pozwala na określenie dokładności położenia całego zestawu BSL (multitrotor, stabilizator kamery, komputer pokładowy, a zwłaszcza odbiornik GNSS, kompas i czujnik IMU wraz z barometrem). W cyklu publikacji znajduje całe spektrum informacji o przedstawionym przeze mnie zestawie testów. Opisałem możliwość określania wielu parametrów urządzeń w oparciu o obliczanie różnic pomiędzy projektem misji, wskazaniami komputera pokładowego oraz danymi z referencyjnego instrumentu geodezyjnego. Zaproponowane przeze mnie testy pozwalają na weryfikowanie algorytmów optymalizujących obloty obiektów w rzeczywistości. Wyniki testów mogą także służyć jako dodatkowa informacja przy pracy nad algorytmami optymalizującymi planowanie lotów w różnych warunkach terenowych i pogodowych [Torres i inni, 2016; Coombes i inni, 2018; Torres-Sánchez i inni, 2018; Guerrero i Bestaoui, 2013; Pereira i inni, 2018; Goerzen i inni, 2010; Ahmad i inni, 2008; Kluz i Trzepieciński, 2014, Yazdani i inni, 2017] oraz wspomagającymi lądowania precyzyjne [Bircher i inni, 2016; Nuske i inni, 2015]. Tego typu pomiary pozwolą także na wprowadzenie dodatkowych parametrów wynikających z pomiaru rzeczywistej trajektorii lotu urządzenia [Dandois i inni, 2015].

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki oraz planowane zasady korzystania z BSL proponowany zestaw testów oraz metodyka ich prowadzenia z powodzeniem może być stosowana do kontroli poprawności ich pracy. W związku z wprowadzeniem przestrzeni U-Space zakładające loty na wysokościach do 120 m [Bujnowski, 2017] testowanie urządzeń pod względem dokładności realizowania zadań automatycznych wydaje się koniecznością, aby określić stosowalność poszczególnych urządzeń w zależności od zastosowanych w nich komputerów pokładowych i systemów GNSS-IMU. Stworzenie przez mnie odpowiedniej, bezpiecznej, bazy pomiarowej oraz zestawu testów pozwalających na określenie zachowania BSL w locie pozwala na określenie warunków brzegowych stosowalności tego typu urządzeń w różnych scenariuszach prowadzenia misji.

W części cyklu publikacji poświęconej badaniu dokładności produktów pozyskiwanych z BSL przeprowadziłem szereg analiz na polach testowych w porównaniu z dużymi zbiorami danych referencyjnych, biorąc pod uwagę wiele czynników mających wpływ na wyniki prac. Należy tu przede wszystkim wymienić: sposób zapewnienia georeferencji produktom wynikowym, zaprojektowanie optymalnej konfiguracji osnowy fotogrametrycznej oraz zwrócić uwagę na dobranie odpowiedniego pokrycia podłużnego i poprzecznego zdjęć.

Ostatnia część cyklu publikacji, stanowiąca podsumowanie moich badań skoncentrowana jest na opracowaniu pełnej metodyki prowadzenia prac inwentaryzacyjnych w terenie górskim o charakterze alpejskim. Przeprowadzone innowacyjne badania wraz z pełną oceną ich dokładności pozwalają na stosowanie tego typu technologii na innych obszarach górskich. Produkty, będące wynikiem nalotów BSL (chmury punktów, NMT, ortofotomozaiki), stanowią cenny materiał źródłowy, który umożliwia prowadzenie zaawansowanych analiz przestrzennych. Parametry oceny ich dokładności obliczone na podstawie porównania z wynikami pomiarów wykonanych metodami GNSS i TLS są zadowalające. Analizy polegające na porównaniu danych z różnych epok pomiarowych zostały przeprowadzone na podstawie porównania uzyskanych materiałów z danymi historycznymi cechującym się niższą dokładnością i rozdzielczością przestrzenną. Mimo to wykonane porównania chmur punktów umożliwiają interpretację zmian zachodzących na obszarach szlaków. Analizując wygenerowane mapy różnicowe, można wyznaczać miejsca o lokalnie zaburzonych wartościach różnic, przy czym miejsca te należy dodatkowo przeanalizować na wysokorozdzielczych ortofotomapach, aby wyeliminować czynniki mogące zaburzać wyniki analiz tj. przyrost roślinności, występowanie ludzi na szlaku w trakcie pomiaru. Natomiast zastosowanie różnych metod cyfrowej analizy obrazu pozwala na automatyczne wykrywanie zjawisk i zależności niewidocznych dla obserwatora, będąc jednocześnie o wiele wydajniejsze od manualnej obróbki danych. Warto dodać, że w dłuższej perspektywie wykonanie kolejnych serii pomiarowych na tym samym obszarze pozwoli na przeprowadzenie szczegółowych analiz wpływu ruchu turystycznego na stan środowiska przyrodniczego. Na materiałach stanowiących produkt opracowania można wykonać analizy dotyczące pokrycia terenu takie jak monitoring antropogenicznych zmian środowiska czy ekstrakcja koron drzew [Wallace, 2013]. Dane w postaci wysokorozdzielczej ortofotomapy pozwalają na wykonywanie klasyfikacji nadzorowanej i nienadzorowanej w celu uzyskania map pokrycia terenu. Metody przetwarzania informacji rastrowej ulegają modyfikacjom w stosunku do procedur klasteryzacji i klasyfikacji opracowanych dla obrazów satelitarnych [Hunt i inni, 2014]. Różnice głównie w rozdzielczości geometrycznej, radiometrycznej i spektralnej powodują odmienne podejście do przetwarzania georastrów. Klasyfikacja nadzorowana najbliższego sąsiedztwa jest rozwiązaniem najtrafniejszym, ze względu na ogólny cel klasyfikacji, którym jest separacja obszarów objętych roślinnością od gleb odkrytych i podłoża skalnych. Próbkę treningową należy jednak dobierać każdorazowo dla obszarów fotografowanych w różnych porach dnia lub dniach. Nie bez znaczenia jest również zmieniająca się morfologia rzeźby terenu [Dunford i inni, 2009]. Należy zwrócić uwagę, że przedstawione przez mnie opracowania pozwolą na podniesienie skuteczności działań ochronnych podejmowanych przez Tatrzański Park Narodowy.

5. Wykaz innych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt 4.1) opublikowanych prac naukowych oraz wskaźniki dokonań naukowych

Od uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych przedmiotem moich badań są również zagadnienia dotyczące zastosowania różnorodnych technik pomiarowych w prowadzeniu prac geodezyjnych. Od roku 2014 czynnie uczestniczę w prowadzeniu prac dokumentacyjnych podczas badań archeologicznych, czego wynikiem są publikacje [B1, B2, B3, B4, B14]. Do drugiej grupy zagadnień należy zaliczyć prace związane z monitoringiem osuwisk, gdzie poza klasycznymi technikami geodezyjnymi stosowałem także automatyczne systemy do pomiarów odkształceń liniowych w gruncie [B6, B8, B15, B20]. Prowadziłem także badania związane z możliwością zastosowania skaningu laserowego w dokumentacji ścian skalnych oraz ostańców wapiennych Jury Krakowsko Częstochowskiej, także pod kątem zachodzących w nich zmian pod wpływem antropopresji wspinaczkowej [B10, B12]. Ponadto prowadziłem testy związane z badaniem użyteczności skaningu laserowego do pomiarów struktur lodowych [B7] oraz prace związane z integracją technologii geodezyjnych na przykładzie pomiarów batymetrycznych [B25]. W okresie zaraz po ukończeniu doktoratu kontynuowałem także prace związane z zastosowaniem różnego rodzaju czujników do monitoringu [B16, B17, B18, B21, B21, B23, B24] oraz analizą dynamicznych odkształceń mostów i innych konstrukcji [B26]. Ponadto prowadziłem prace związane z badaniami szybów i wież szybowych [B5, B9], czego zwieńczeniem było zgłoszenie patentowe na system do monitoringu rury szybowej. Poza omówionym dorobkiem jestem autorem trzech monografii w tym jednej w języku angielskim [B11, B13, B19]. Najważniejsze wskaźniki dokonań naukowych zestawiam w tabeli poniżej.

Tabela 5.1. Zestawienie wskaźników dokonań naukowych w latach 2011-2019

Dokonania po doktoracie 2011-2019		liczba	Liczba punktów wg listy MNiSW
Artykuły w czasopismach punktowanych bazy JCR		4 Impact Factor: 12.410	120.00
Artykuły w czasopismach punktowanych bazy Scopus		8	179.00
Artykuły w czasopismach punktowanych z bazy Web of Science		9	149.00
Artykuły w czasopismach punktowanych z listy MNiSW (bez JCR)		25	211.00
Współautorstwo w książkach lub monografiach		3	65.00
Artykuły w czasopismach niepunktowanych		6	-
Razem (JCR+MNiSW+Monografie+Niepunktowane)		38	396.00
Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych		7	-
Wystąpienia na konferencjach krajowych		2	-
Indeks Hirscha Cytowania	Według Bazy Scopus (według opcji View secondary documents)	Indeks Hirscha: 3 35 cytowań (5 autocytowań)	
	Według Bazy Web of Science Core Collection (według opcji Cited Ref. Search)	Indeks Hirscha: 3 33 cytowania (7 autocytowań)	
	Według Bazy Google Scholar	Indeks Hirscha: 4 61 cytowań (11 autocytowań)	

Tabela 5.2. Zestawienie innych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt 4.1) opublikowanych prac naukowych

OZN.	Publikacja	LICZBA PUNKTÓW MNISW
B1	Paweł ĆWIAKAŁA , Wojciech MATWIJ, Agnieszka OCHAŁEK, Edyta PUNIACH, Justyna Ruchała, Szymon Stelmach; XVI Wyprawa Bari – nowoczesna inwentaryzacja w Parku Archeologicznym w Pafos, XVI Bari Expedition – a modern documentation in the Archaeological Park of Paphos; w: Pafos – misterium miasta Afrodyty: dziedzictwo archeologiczne a nowe technologie, Paphos – mystery of the city of Aphrodite: archaeological heritage versus new technologies, red. nauk. Ewdoksia Papuci-Władyka; Kraków: Archaeologica Foundation; ISBN: 978-83-941010-1-5; 2018; s. 132–141.	0.00
B2	Paweł ĆWIAKAŁA , Wojciech MATWIJ, Karolina MATWIJ, Edyta PUNIACH; Skanowanie laserowe w archeologii: doświadczenia Paphos Agora Project, Laser scanning in archaeology: experiences from the Paphos Agora Project; w: Pafos – misterium miasta Afrodyty: dziedzictwo archeologiczne a nowe technologie, Paphos – mystery of the city of Aphrodite: archaeological heritage versus new technologies, red. nauk. Ewdoksia Papuci-Władyka; Kraków: Archaeologica Foundation; ISBN: 978-83-941010-1-5; 2018; s. 124–131.	0.00
B3	Mateusz Boruchowski, Paweł ĆWIAKAŁA , Małgorzata Kajzer, Witold Niewiem, Kamila Nocoń, Edyta PUNIACH; Dokumentacja fotogrametryczna naczyń ceramicznych, Photogrammetric documentation of ceramic vessels; w: Pafos – misterium miasta Afrodyty: dziedzictwo archeologiczne a nowe technologie, Paphos – mystery of the city of Aphrodite: archaeological heritage versus new technologies, red. nauk. Ewdoksia Papuci-Władyka; Kraków: Archaeologica Foundation; ISBN: 978-83-941010-1-5; 2018; s. 108–115.	0.00
B4	Agnieszka OCHAŁEK, Witold NIEWIEM, Edyta PUNIACH, Paweł ĆWIAKAŁA ; Accuracy evaluation of real-time GNSS precision positioning with RTX Trimble technology, Ocena dokładności precyzyjnego pozycjonowania GNSS w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem technologii RTX Trimble; Civil and Environmental Engineering Reports, Prace z Inżynierii Lądowej i Środowiska; ISSN 2080-5187; 2018; no. 28, vol. 4, s. 49–61.	9.00
B5	Wojciech JAŚKOWSKI, Tomasz LIPECKI, Paweł ĆWIAKAŁA , Wojciech MATWIJ; The visual assessment of the condition of a shaft lining and reinforcement equipment using video monitoring system; w: SGEM 2017: 17th international multidisciplinary scientific geoconference: informatics, geoinformatics and remote sensing: 29 June–5 July, 2017, Albena, Bulgaria: conference proceedings. Vol. 17, iss. 22, Geodesy and mine surveying; Sofia: STEF92 Technology Ltd., cop. 2017; International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM; ISSN 1314-2704; ISBN: 978-619-7408-02-7; s. 727–734.	0.00 <i>(w trakcie indeksowania w bazie Web of Science)</i>
B6	Janusz Mirek, Jacek STANISZ, Robert KACZMARCZYK, Paweł ĆWIAKAŁA ; Prototyp systemu monitorowania terenów osuwiskowych LandSMS – wyniki testów na osuwisku w Kłodnem w Karpatach fliszowych, Prototype of early warning system for areas at risk of landslides LandSMS – results of tests on the landslide in Kłodne in flysch Carpathians; Przegląd Geologiczny; ISSN 0033-2151; 2017; vol. 65, nr 10/2, s. 817–822.	12.00
B7	Edyta PUNIACH, Anita KWARTNIK-PRUC, Paweł ĆWIAKAŁA ; Evaluation of the usefulness of terrestrial laser scanning for measurements of ice structures; w: "GIS ODYSSEY 2017": Geographic Information Systems	15.00

	Conference and Exhibition: 4th to 8th of September 2017, Trento – Vattaro, Italy: conference proceedings, eds. Tomasz Adamczyk, Ewa Dębińska; Zagreb: Croatian Information Technology Society – GIS Forum; Conference Proceedings (GIS Odyssey. CD-ROM); ISSN 2459-7627; 2017; s. 295–304.	
B8	Paweł ĆWIAKAŁA , Jacek STANISZ, Andrzej WRÓBEL, Robert KACZMARCZYK, Paweł Drwal, Paulina Grabek, Monika Daroch, Michał Pękała, Małgorzata Świątek, Mateusz Zierkiewicz; Wyznaczenie przemieszczeń powierzchniowych na osuwisku w Kłodnem (gmina Limanowa, południowa Polska), Determination of surface displacement on the landslide in Kłodne (Limanowa community, southern Poland); Przegląd Geologiczny; ISSN 0033-2151; 2016; vol. 64, nr 2, s. 122–130.	12.00
B9	Paweł ĆWIAKAŁA , Mateusz JABŁOŃSKI; Pomiar inwentaryzacyjny wieży szybowej przy użyciu techniki skanowania laserowego, Inventory measurement of the headframe with the use of the laser scanning technique; Wiadomości Górnicze; ISSN 0043-5120; 2016; vol. 67, no. 2, s. 154–160.	5.00
B10	Paweł ĆWIAKAŁA , Paweł Wiącek; Assessment of the possibility to measure deformations of rock walls using terrestrial laser scanning, Ocena możliwości pomiarów zmian rzeźby ścian skalnych z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego; Geomatics and Environmental Engineering; ISSN 1898-1135; 2016; vol. 10, no. 2, s. 15–28.	11.00
B11	Paweł ĆWIAKAŁA , Krzysztof Deska, Rafał KOCIERZ, Łukasz ORTYL, Tomasz OWERKO, Edyta PUNIACH, Izabela Skrzypczak, Tomasz Świętoń; Wybrane problemy geodezji inżynierskiej: monografia, Selected problems of engineering geodesy, pod red. Tomasza Świętonia; Rzeszów: Wyższa Szkoła Inżyniersko-Ekonomiczna, 2015.	20.00
B12	Paweł ĆWIAKAŁA , Edyta PUNIACH, Monika Jarosz, Kamil Kmak; The surveying inventory of Kraków–Częstochowa upland's rocks illustrated with the example of the Hercules' Club (Maczuga Herkulesa) in Pieskowa Skała, Geodezyjna inwentaryzacja ostańców jurajskich na przykładzie Maczugi Herkulesa w Pieskowej Skale; Geomatics and Environmental Engineering; ISSN 1898-1135; 2015; vol. 9, no. 1, s. 15–23.	11.00
B13	Paweł ĆWIAKAŁA , Justyna Gabryszuk, Karol Krawczyk, Robert KRZYŻEK, Przemysław Leń, Grzegorz Oleniacz, Edyta PUNIACH, Zbigniew Siejka, Justyna Wójcik-Leń; Technologia GNSS i jej zastosowanie w pomiarach realizacyjnych i kontrolnych, GNSS technology and its application in setting out surveys and monitoring, pod red. Grzegorza Oleniacza; Rzeszów: Wyższa Szkoła Inżyniersko-Ekonomiczna; ISBN: 978-83-60507-24-7; 2015.	20.00
B14	Paweł ĆWIAKAŁA , Karolina MATWIJ, Wojciech MATWIJ, Łukasz Misk, Weronika Winiarska; Integration of 2D and TLS data using GIS to create a database for the Paphos Agora Project; Studies in Ancient Art and Civilization; ISSN 1899-1548; e-ISSN 2449-867X; 2015; vol. 19, s. 203–232.	13.00
B15	Paweł ĆWIAKAŁA , Paweł Drwal, Monika Daroch, Paulina Grabek; Temporary monitoring of areas prone to landslides illustrated with the example of the Kłodne village; Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Infrastructure and Ecology of Rural Areas; Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi; ISSN 1732-5587; 2014; nr IV/1, s. 1089–1099.	5.00
B16	Paweł ĆWIAKAŁA , Jacek KUDRYS; Porównanie wyników pomiarów czujnikami inklinometrycznymi z pomiarami GNSS w monitoringu permanentnym przemieszczeń obiektów, The comparison of results of surveys conducted by means of inclinometer sensors and GNSS in permanent monitoring of objects	7.00

	translocation; Pomiar, Automatyka, Kontrola; Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich. Sekcja Metrologii, Polskie Stowarzyszenie Pomiarów Automatyki i Robotyki POLSPAR; ISSN 0032-4140; 2014; vol. 60, nr 3, s. 156–159.	
B17	Paweł ĆWIAKAŁA ; Monitoring of displacements of building structures subjected to effects of underground mining exploitation; w: SGEM2013: GeoConference on Informatics, geoinformatics and remote sensing: 13th international multidisciplinary scientific geoconference: 16–22, June, 2013, Albena, Bulgaria: conference proceedings. vol. 2, Geodesy and mine surveying; Photogrammetry and remote sensing; Sofia: STEF92 Technology Ltd., cop. 2013; International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM; ISSN 1314-2704; ISBN: 978-619-7105-01-8; s. 331–338.	10.00
B18	Paweł ĆWIAKAŁA ; Determining the suitability of MEMS inclination sensors for measuring deformation in mining areas; w: SGEM2013: GeoConference on Informatics, geoinformatics and remote sensing: 13th international multidisciplinary scientific geoconference: 16–22, June, 2013, Albena, Bulgaria: conference proceedings. vol. 2, Geodesy and mine surveying; Photogrammetry and remote sensing; Sofia: STEF92 Technology Ltd., cop. 2013; International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM; ISSN 1314-2704; ISBN: 978-619-7105-01-8; s. 127–134.	10.00
B19	Jan GOCAŁ, Łukasz ORTYL, Tomasz OWERKO, Przemysław KURAS, Rafał KOCIERZ, Paweł ĆWIAKAŁA , Edyta PUNIACH, Olga SUKTA, Adam BAŁUT; Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry; Kraków: Wydawnictwa AGH, 2013; ISBN: 978-83-7464-645-1.	25.00
B20	Paweł ĆWIAKAŁA , Wojciech JAŚKOWSKI, Olga SUKTA; The concept of a measuring unit for monitoring the stability of areas at risk of landslides; Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Infrastructure and Ecology of Rural Areas; Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi; ISSN 1732-5587; 2012; nr 1/IV, s. 103–112.	5.00
B21	Ryszard HEJMANOWSKI, Mieczysław JÓŻWIK, Agnieszka MALINOWSKA, Paweł ĆWIAKAŁA , Anton Sroka, Grzegorz Patykowski; Influence of mining tremors on deformation of terrain Surface; w: 13. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie: 10. und 11. Mai 2012, Freiberg, Hrsg. A. Sroka; TU Bergakademie Freiberg; Essen: VGE Verlag GmbH, cop. 2012; Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg; H. 2012-1; ISBN: 978-3-86797-137-9; s. 220–225.	0.00
B22	Paweł ĆWIAKAŁA , Tomasz OWERKO; Determination the accuracy of TELPOD SVP 45 resistive sensors as tools for measuring the relative displacement of points, Ocena dokładności czujników opornościowych grupy TELPOD SVP 45 jako narzędzi do pomiarów odkształceń; Geomatics and Environmental Engineering; ISSN 1898-1135; 2012; vol. 6, no. 3, s. 25–33.	5.00
B23	Paweł ĆWIAKAŁA ; Przykład zastosowania mobilnej rozety pomiarowej do pomiarów odkształceń poziomych nad krawędzią eksploatacji górniczej, The mobile measurement rosette – an example of application to measuring horizontal distortion above ledge of mining exploitation; w: Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii, T. 2, Interdisciplinary topics in mining and geology, pod red. Jana Drzymały i Wojciecha Ciężkowskiego; Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, cop. 2011; ISBN: 978-83-7493-596-8; s. 7–15.	4.00

B24	Paweł ĆWIAKAŁA , Wojciech JAŚKOWSKI, Mieczysław JÓŹWIK, Krzysztof Musz; Przykłady współpracy przy prowadzeniu prac badawczych i monitoringu terenów górniczych w obrębie złóż eksploatowanych przez ZG „Piekary”, Examples of cooperation at conducting of research work and monitoring of mining grounds within deposits exploited by the “Piekary” coal mine; Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, Research Reports. Mining & Environment; Główny Instytut Górnictwa, Katowice; ISSN 1643-7608; 2011; nr 2/1, s. 92–99.	5.00
B25	Tomasz OWERKO, Łukasz ORTYL, Anita KWARTNIK-PRUC, Paweł ĆWIAKAŁA ; Integracja technologii geodezyjnych na przykładzie pomiarów batymetrycznych, Geodesic technology integration on the example of bathymetric measurement; Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Infrastructure and Ecology of Rural Areas; Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi; ISSN 1732-5587; 2011; nr 4, s. 21–29.	5.00
B26	Paweł ĆWIAKAŁA , Przemysław KURAS, Olga SUKTA; Analysis of dynamic strains of suspension bridge on the example of pedestrian footbridge, Analiza dynamicznych odkształceń mostu o konstrukcji wiszącej na przykładzie kładki dla pieszych; Geomatics and Environmental Engineering; ISSN 1898-1135; 2011; vol. 5, no. 3, s. 37–46.	5.00
	RAZEM:	214.00

6. Literatura

- Ahmad R. A., Azmi H., Syamimi S., Mohd Z. N., Shahrum A. The Repeatability Analysis of Industrial Robot under Loaded Conditions and Various Distances. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* 2008.
- Atyabi, A., Somaiyeh, M., Nefti-Meziani, S. Current advancements on autonomous mission planning and management systems: An AUV and UAV perspective. *Annual Reviews in Control* 2018, vol. 46, pp. 196-215.
- Będkowski, K. *Fotogrametryczna metoda oceny stanu i zmian wysokościowej struktury warstwy koron w drzewostanach*, 1st ed.; Wydawnictwo SGGW: Warsaw, Poland, 2005; pp. 1-208.
- Bircher, A., Kamel, M., Alexis K., Burri, M., Oettershagen, P., Omari, S., Mantel T. Three-dimensional coverage path planning via viewpoint resampling and tour optimization for aerial robots. *Autonomous Robots* 2016, vol. 40 (6), pp. 1059-1078.
- Bujnowski, M. Integration of unmanned aerial vehicles with the EU civil aviation system (Integracja bezzałogowych statków powietrznych z unijnym systemem lotnictwa cywilnego).
- Coombes, M., Fletcher, T., Chen, W.-H., Liu, C. Optimal Polygon Decomposition for UAV Survey Coverage Path Planning in Wind. *Sensors* 2018, vol. 18, art. no. 2132.
- Dandois, J.P., Olano, M., Ellis, E.C. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. *Remote Sens.* 2015, vol. 7, pp. 13895–13920.
- Dewez, T.J.B., Leroux, J., Morelli, S. Cliff collapse hazard from repeated multicopter UAV acquisitions: returns on experience. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2016, vol. XLI-B5, pp. 805-811.
- Driels M.R., Swayze W., Potter S. Full-pose calibration of a robot manipulator using a coordinate-measuring machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 1993, vol. 8, pp. 34 - 41.
- Dunford, R., Michel, K., Gagnage, M., Piegay, H., Tremelo M.-L. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *Int. J. Remote Sens.* 2009, vol. 30, pp. 4915-4935.

- Eltner, A., Mulsow, C., Maas, H.-G. Quantitative measurement of soil erosion from TLS and UAV data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2013, vol. XL-1/W2, pp. 119-124.
- Fellner, A. Mańka, A. Mańka, I. Risk analysis arising from use of unmanned aerial vehicles (drones). *TTS Technika Transportu Szynowego* 2015, no. 12, pp. 489-491.
- Fernández, T., Pérez, J. L., Cardenal, F. J., López, A., Gómez, J. M., Colomo, C., Delgado, J., Sánchez, M. Use of a light UAV and photogrammetric techniques to study the evolution of a landslide in Jaen (southern Spain). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2015, vol. XL-3/W3, pp. 241-248.
- Forlani, G., Dall'asta, E., Diotri, F., Cella, U.M., Roncella, R., Santise, M. Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. *Remote Sens.* 2018, vol. 10, art. no. 311.
- Goerzen, C., Kong, Z. & Mettler, B. A. Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 2010, vol. 57, pp. 65.
- Guerrero, J.A., Bestaoui, Y. J. UAV Path Planning for Structure Inspection in Windy Environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 2013, vol. 69, pp. 297-311.
- Hsieh, Y.-C., Chan, Y.-C., Hu, J.-C. Digital Elevation Model Differencing and Error Estimation from Multiple Sources: A Case Study from the Meiyuan Shan Landslide in Taiwan. *Remote Sens.* 2016, vol. 8, art. no. 199.
- Hunt R., Daughtry, C.S.T., Mirsky, S.B, Hively, W.D. Remote Sensing With Simulated Unmanned Aircraft Imagery for Precision Agriculture Applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 2014, vol. 7, pp. 4566 - 4571.
- Kluz, R., Trzepieciński, T. The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm. *Assembly* 2014, vol. 34, pp. 285-295.
- Lucieer, A., de Jong, S.M., Turner, D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Prog. Phys. Geogr.* 2014, vol. 38, pp. 97-116.
- Lu, C. H. Applying UAV and photogrammetry to monitor the morphological changes along the beach in Penghu islands. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2016, vol. XLI-B8, pp. 1153-1156.
- Torres, M., Pelta, D.A., Verdegay, J.L., Torres, J.C. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction. *Expert Systems with Applications* 2016, vol. 55, pp. 441-451.
- Mesas-Carrascosa, F.-J., Torres-Sánchez, J., Clavero-Rumbao, I., García-Ferrer, A., Peña, J.-M., Borra-Serrano, I., López-Granados, F. Assessing Optimal Flight Parameters for Generating Accurate Multispectral Orthomosaics by UAV to Support Site-Specific Crop Management. *Remote Sens.* 2015, vol. 7, pp. 12793-12814.
- Neugirg, F., Kaiser, A., J. Schmidt, J., Becht, M., Haas, M. Quantification, analysis and modelling of soil erosion on steep slopes using LiDAR and UAV photographs. *Proc. IAHS* 2015, vol. 367, pp. 51-58.
- Nex, F., & Remondino, F. UAV for 3d mapping applications: a review. *Applied Geomatics* 2013, vol. 6, pp. 1-15.
- Nuske, S., Choudhury, S., Jain, S., Chambers, A., Yoder, L., Scherer, S., Chamberlain, L., Cover, H. Singh, S. Autonomous Exploration and Motion Planning for a UAV Navigating Rivers, *Journal of Field Robotics*, vol. 32, pp. 1141-1162.
- Norma PN-EN ISO 8373:2001. Manipulating industrial robots - vocabulary.
- Norma PN-EN ISO 9283: 2003 Manipulating industrial robots. Performance criteria and related test methods.
- Nubiola, A., Slamani, M., Joubair, A. Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker. *Robotica* 2014, vol. 32, pp. 447 - 466.
- Nubiola, A., Bonev, I.A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2013, vol. 29, pp. 236 - 245.

- Ortyl Ł, Owerko T. Korekta wpływu deniwelacji terenu oraz częstotliwości wyznaczenia pozycji przez system GNSS lub tachymetry TCA w procesie przestrzennej lokalizacji obiektów wykrywanych georadarem (The correction of area's drop and frequency of determining a position by the global positioning system of TCRA total stations in the process of spatial localisation of the objects detected by a georadar). *Zeszyty Naukowe/Politechnika Śląska* 2007, no 1752, s. 335–352.
- Papakonstantinou, A.; Topouzelis, K.; Pavlogeorgatos, G. Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2016, vol. 5, art. no. 75.
- Pereira Coutinho, W., Battarra, M., & Fliege, J. 2018. The Unmanned Aerial Vehicle Routing and Trajectory Optimisation Problem, a Taxonomic Review. *Computers and Industrial Engineering* 2018, vol. 120, pp. 116-128.
- Prajwal, M., Rishab, J., Vaibhav, S., Karthik, K.S. Optimal Number of Ground Control Points for a UAV based Corridor Mapping. *International Journal of Innovative Research in Science. Engineering and Technology* 2016, vol. 5, pp. 28-32.
- Rao, B., Gopi, A. G., Maione, R. The societal impact of commercial drones. *Technology in Society* 2016, vol. 45, pp. 83–90.
- Ratajczyk, E. Zaawansowane pomiary współrzędnościowe w technikach wytwarzania. *Measurement Automation and Monitoring* 2007, vol. 53, pp. 9 – 16.
- Rozporządzenie, 2001 – Rozporządzenie Ministra Rozwoju Regionalnego i Budownictwa z dnia 29 marca 2001 r. w sprawie ewidencji gruntów i budynków.
- Shiakolas, P.S., Conrad, K.L., Yih, T.C. On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots. *International Journal of Modelling and Simulation* 2002, vol. 22, pp. 245 - 254.
- Smith, M.W., Vericat, D. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. *Earth Surf. Process. Landf.* 2015, vol. 40, pp. 1656–1671.
- Tahar, K.N., Ahmad, A., Wan Mohd Akib, W.A.A. Unmanned aerial vehicle technology for low cost landslide mapping. *Proceedings of 11th South East Asian Survey Congress and 13th International Surveyors' Congress, PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia, June 2011.*
- Tahar, K.N. An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2013, vol. XL-2/W2, pp. 93-98.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I., Peña-Barragán, J.M. Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. *Precision Agriculture* 2018, vol. 19, pp. 115-133.
- Wallace, L. Assessing the Stability of Canopy Maps Produced from UAV-LIDAR Data. *2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2013*, pp. 3879-3882.
- Yazdani, A.M., Sammut, K., Yakimenko, O.A., Lammis, A., Tang, Y., Mahmoud Zadeh, S. IDVD-based trajectory generator for autonomous underwater docking operations. *Robotics and Autonomous Systems* 2017, vol. 92, pp. 12-29.