

dr hab. inż. Piotr Wężyk, prof. URK
Katedra Zarządzania Zasobami Leśnymi
Wydział Leśny
Uniwersytet Rolniczy im Hugona Kołłątaja w Krakowie

Kraków, dn. 09.01.2025 r.

RECENZJA


PROREKTOR
Politechniki Warszawskiej

prof. dr hab. inż. Mariusz Malinowski 2025 -01- 2 3

osiągnięć naukowych oraz aktywności naukowej **dr inż. Jakuba Stefana Markiewicza** w związku z postępowaniem o nadanie mu stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport z uwzględnieniem opinii o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.

Podstawa formalna i prawna oceny

Ocenę dorobku sporządzono w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport – Pana prof. dr hab. inż. Konrada Lewczuka (pismo sygn.. WTB.524.HAB.133.2024) z dnia 22.10.2024 roku – informującego o wyznaczeniu mojej osoby przez RDN jako Recenzenta Komisji Habilitacyjnej (uchwała RD ILGiT 1023/2024) w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport na wniosek pana dr inż. Jakuba Stefana Markiewicza.

Opinię wykonano na podstawie dostarczonych przez Politechnikę Warszawską wersji elektronicznej plików dokumentów zawierających:

- Wniosek przewodni Kandydata o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego na Politechnice Warszawskiej,
- Autoreferat,
- Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny,
- Oświadczeń współautorów 8 publikacji,
- Kopię dyplomu wydanego przez Politechnikę Warszawską potwierdzającego nadanie stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Geodezja i Kartografia z dnia 19.04.2018 roku;
- Kopie publikacji stanowiących osiągnięcia naukowe oraz
- Kopie dokumentów potwierdzających staże zagraniczne.

Przedłożona recenzja opiera się na kryteriach określonych w art. 219 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jedn. Dz. U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.). Zgodnie z tym przepisem stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która:

- 1) posiada stopień doktora;
- 2) posiada w dorobku osiągnięcia naukowe albo artystyczne, stanowiące znaczny wkład

w rozwój określonej dyscypliny, w tym co najmniej:

- a) 1 monografię naukową wydaną przez wydawnictwo, które w roku opublikowania monografii w ostatecznej formie było ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. a, lub
 - b) 1 cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b, lub
 - c) 1 zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne;
- 3) wykazuje się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Przedstawiona **dokumentacja pozwala na wykonanie recenzji**, zgodnie z art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.). Recenzja została napisana w oparciu o katalog przesłanek warunkujących nadanie stopnia doktora habilitowanego, które mają charakter zamknięty.

Sylwetka Habilitanta

Rozwój naukowy i zawodowy

Niemal cały rozwój naukowy Habilitanta związany jest Wydziałem Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, na którym w roku 2010 obronił pracę inżynierską pt. *„Wykonanie obserwacji metodą automatyczną dla aerotriangulacji bloku zdjęć lotniczych wspomaganych pomiarami GPS w systemie Image Station firmy Intergraph”*, a następnie (w 2012 roku) pracę magisterską pt. *„Integracja danych z różnych źródeł fotogrametrycznych przy budowie modelu 3D obiektu”*.

Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie geodezja i kartografia, nadany został Kandydatowi przez Radę Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, na podstawie rozprawy pt.: *„Badanie możliwości wykorzystania rastrów intensywności oraz metod dopasowania obrazów w automatycznej orientacji danych z naziemnego skaningu laserowego”*. Promotorem wyróżnionej przez Radę Wydziału Geodezji i Kartografii dysertacji była Pani dr hab. inż. Dorota Zawieska, prof. PW.

Pan dr inż. Jakub Markiewicz od 2012 pozostawał zatrudniony w Zakładzie Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej Politechniki Warszawskiej, przy czym do roku 2018 pracował na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego, a po uzyskaniu stopnia doktora na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego.

Zainteresowania badawcze Kandydata

Zainteresowania badawcze dr inż. Jakuba Markiewicza skupiają się głównie wokół zagadnień dotyczących fotogrametrii cyfrowej bliskiego zasięgu i cyfrowych metod analizy obrazu, w tym szczególnie algorytmów bazujących na detekcji i opisie punktów wiążących obrazy tworzących stereogram, algorytmach uczenia maszynowego, konwersji chmur punktów TLS LiDAR do obrazów rastrowych, transformacjach kartograficznych, technologii SLAM – w zakresie generowania obrazów i reprezentacji 3D obiektów, szczególnie w zakresie innowacyjnej dokumentacji architektonicznej oraz archeologicznej służącej ochronie zabytków. Poza ww. zagadnieniami Kandydat interesuje się wykorzystaniem fotogrametrii w analizach GIS oraz wykorzystaniem fotogrametrii niskiego pułapu (BSP) czy też technologiami TLS i ALS LiDAR głównie w zakresie zagospodarowania przestrzennego czy potrzeb związanych z ochroną dziedzictwa kulturowego.

Dorobek naukowy

Sumaryczny IF prac opublikowanych przez Kandydata wynosi **34,714** przy czym prace składające się na osiągnięcie naukowe posiadają IF=17,540 a pozostałe artykuły IF=17,174.

Łączna liczba cytowań prac opublikowanych (38 wg. WoS oraz 54 wg. Scopus) z udziałem Kandydata w zależności od bazy publikacji na dzień 30.06.2024, wahała się od: 211 pozycji wg. Web of Science (160 bez autocytowań) oraz przez 328 wg. Scopus (220 bez autocytowań). Indeks Hirsha wynosił wg. WoS oraz Scopus odpowiednio 8 oraz 11.

Skumulowana liczba punktów wg list MNiSW/MEiN za wszystkie opublikowane przez Kandydata artykuły wynosi **2117 pkt**, przy czym po doktoracie: 65 pkt. przed rokiem 2019 oraz 1625 pkt. w okresie 2019-2024.

Podstawę przedłożonej do recenzji rozprawy habilitacyjnej stanowi spójny cykl powiązanych ze sobą tematycznie publikacji naukowych, o jakich mowa w art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce:

- cykl tematycznych publikacji pt.: „*Metodyka georeferencji danych z aktywnych i pasywnych sensorów pomiarowych przy wykorzystaniu zmodyfikowanej metody Structure-from-Motion*” oraz oryginalne zrealizowane osiągnięcie projektowe w myśl art. 219 ust. 1. pkt 2c, tj., rozumiane jako:
- implementacja oryginalnego autorskiego osiągnięcia TLS-SfM w ramach projektu pt. „Technologia integracji wielosensorowych danych geoprzestrzennych wykorzystywanych do generowania wysokorozdzielczej dokumentacji architektonicznej” (Inkubator Innowacyjności 4.0; MNiSW - „Wsparcie zarządzania badaniami naukowymi i komercjalizacja wyników prac B+R w jednostkach naukowych i przedsiębiorstwach” POIR 2014-2020.

L.p.	Publikacja	IF czasopisma	Licba punktów wg listy MNiSW
1	Markiewicz J., Pilarska M., Łapiński S., Kaliszewska A., Bieńkowski R., Cena A.: Quality assessment of the use of a medium format camera in the investigation of wall paintings: an image-based approach, in: Measurement, Elsevier, vol. 132, 2019, s. 224-237, DOI:10.1016/j.measurement.2018.07.001	2,260	200
2	Zawieska D., Markiewicz J., Kopiasz J.: Development of true orthophotomaps of the fortified settlement at Biskupin, Site 4, based on archival data, in: Archaeological Prospection, vol. 26 (2), 2019, s. 1-28, DOI:10.1002/arp.1748	1,640	140
3	Markiewicz J., Abratkiewicz K., Gromek A., Ostrowski W., Samczyński P., Gromek D.: Geometrical Matching of SAR and Optical Images Utilizing ASIFT Features for SAR-based Navigation Aided Systems, in: Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, vol. 19, nr. 24, 2019, s. 1-33, DOI:10.3390/s19245500	2,780	100
4	Markiewicz J., Zawieska D.: The Influence of the Cartographic Transformation of TLS Data on the Quality of the Automatic Registration, in: Applied Sciences-Basel, MDPI, nr. 9(3), 509, 2019, s. 1-28, DOI:10.3390/app9030509	2,520	100
5	Markiewicz J., Zawieska D.: Analysis of the Selection Impact of 2D Detectors on the Accuracy of Image-Based TLS Data Registration of Objects of Cultural Heritage and Interiors of Public Utilities, in: Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, vol. 20, nr. 11, 2020, s. 1-33, DOI:10.3390/s20113277	2,780	100
6	Markiewicz J.: The evaluation of 2D affine – hand-crafted detectors for feature-based TLS point cloud registration, Reports on Geodesy and Geoinformatics, 2024, vol. 117, s. 69-88. doi:10.2478/rgg-2024-0008.	0,700	70
7	Markiewicz J., Patryk K., Markiewicz Ł., Muradov M.: The evaluation of hand-crafted and learned-based features in Terrestrial Laser Scanning-Structure-from-Motion (TLS-SfM) indoor point cloud registration: the case study of cultural heritage objects and public interiors. <i>Herit Sci</i> 11, 254 (2023). https://doi.org/10.1186/s40494-023-01099-9	2,240	140
8	Muradov M., Kot P., Markiewicz J., Łapiński S., Tobiasz A., Onisk K., Shaw A., Hashim K., Zawieska D., Mohi-Ud-Din G.: Non-destructive system for in-wall moisture assessment of cultural heritage buildings, Measurement, Elsevier, vol. 203, 2022, s. 1-29, DOI:10.1016/j.measurement.2022	2,620	200
RAZEM		17,540	1050

Aktywność publikacyjna w czasopismach naukowych Habilitanta rozpoczyna się w roku 2012, tj., już w roku uzyskania tytułu magistra na Politechnice Warszawskiej.

W zakresie monografii naukowych do momentu uzyskania stopnia doktora Kandydat był współautorem 17 rozdziałów głównie w zakresie ochrony zabytków, wykorzystania TLS jak i wieloczasowych serii zdjęć lotniczych w planowaniu przestrzennym. Po uzyskaniu stopnia doktora Kandydat był współautorem 8 rozdziałów w monografiach naukowych głównie w zakresie tworzenia opracowań dla ochrony zabytków ale również oceny jakości produktów fotogrametrycznych i nadawania georeferencji zobrazowaniom SAR.

Do momentu obrony doktoratu Kandydat publikuje 10 artykułów współautorskich w domenie m.in. fotogrametrii cyfrowej, naziemnego skanowania laserowego, miernictwa i generowania obiektów 3D i dokumentowania zabytków.

Po uzyskaniu stopnia doktora do momentu złożenia wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego – Kandydat opublikował 21 artykułów w czasopismach naukowych m.in. w zakresie: wykorzystania fotogrametrii cyfrowej i technologii TLS do tworzenia dokumentacji archeologicznej, dla opracowań w ochronie zabytków, a także algorytmów wspierających nadawanie georeferencji zobrazowaniom SAR przy wykorzystaniu dopasowania zdjęć fotogrametrycznych, ekstrakcji wybranych klas z chmur punktów ALS.

W zakresie publikacji w materiałach konferencyjnych kandydat opublikował 11 pozycji przed uzyskaniem stopnia doktora oraz 12 pozycji do momentu złożenia wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Ocena osiągnięcia naukowego będącego podstawą postępowania habilitacyjnego

Przedłożone do oceny **osiągnięcie naukowe nr I** zawarto w spójnym cyklu artykułów zatytułowanym „*Metodyka georeferencji danych z aktywnych i pasywnych sensorów pomiarowych przy wykorzystaniu zmodyfikowanej metody Structure-from-Motion*”, na który składa się 8 recenzowanych prac opublikowanych w czasopismach wysoko punktowanych o zasięgu międzynarodowym, indeksowanych w bazie Web of Science.

Osiągnięcie naukowe nr I składa zawiera 7 publikacji współautorskich, przy czym Habilitant jest w 5 z nich pierwszym autorem a jego udział w ich powstaniu jest co najmniej znaczący (wynosi od 25% do 80%). Jeden z artykułów (nr 6) jest jedno-autorski (100% udziału).

W ramach przedstawionego cyklu publikacji (nr 1-8) stanowiącego osiągnięcie naukowe nr I - Kandydat przedstawił autorską metodykę nadawania georeferencji geodanym pozyskiwanym z aktywnych (LiDAR, RADAR) i pasywnych (zdjęcia fotogrametryczne) metod obrazowania obiektów 3D w oparciu o zmodyfikowaną przez siebie metodę Structure-from-Motion (SfM) nazywając ją TLS-SfM. Kandydat argumentuje słusznie w Autoreferacie, iż główną motywacją podjęcia przez niego problemu badawczego była pilna potrzeba zautomatyzowania procesu przetwarzania geodanych wielo-źródłowych (Kandydat nazywa je „wielosensorowymi”). Jako praktyczne udokumentowanie wykorzystania i implementacji autorskiego rozwiązania TLS-SfM przedstawia raport ze współautorskiego projektu, które wskazuje jako oryginalne osiągnięcie projektowe (osiągnięcie naukowe nr II). O ile recenzent zgodzić się może z Kandydatem, iż ostatnie dekady przynoszą znaczący rozwój sposobów i

metod wykorzystania algorytmów i sensorów stosowanych do pozyskiwania geodanych (danych przestrzennych) dla potrzeb m.in. modelowania przestrzeni miast czy generowania tzw. cyfrowych bliźniaków (ang. Digital Twins) opartych na modelach 3-D, w tym BIM (*Building Modelling Information*), to już niekoniecznie ze stwierdzeniem Habilitanta, iż głównym ich źródłem są chmury punktów z naziemnego skanowania laserowego (ang. TLS) czy też dopasowania zdjęć naziemnych czy BSP metodami fotogrametrycznymi (np. *Structure-from-Motion*; SfM lub *Multi View Stereo* MVS). Przykładowo od roku 2011 realizowane są w Polsce projekty takie jak ISOK czy CAPAP (GUGiK), które dzięki akwizycji chmur punktów lotniczego skanowania laserowego (ALS LiDAR) dostarczają doskonałych danych do generowania budynków 3D w skali całego kraju udostępnianych w zasobach pzgik. Oczywiście Kandydat zna doskonale te technologie, jednak dokonuje pewnego skrótu myślowego, gdyż jego badania dotyczą głównie opracowań pojedynczych obiektów 3D w znacznie większej skali szczegółowości z wykorzystaniem skanowania TLS lub fotogrametrii naziemnej czy też obrazów z kamer wysokorozdzielczych na BSP.

Niewątpliwie fotogrametria skazywana jeszcze kilkanaście lat temu na powolne zapomnienie dziś zyskuje na znaczeniu właśnie dzięki wykorzystaniu zaawansowanych algorytmów w zakresie automatycznego dopasowania obrazów i generowania znacznie gęstszych chmur punktów niż standardowe skanowanie laserowe. Należy mieć jednak na uwadze również pewne ograniczenia fotogrametrii szczególnie w obszarach z szatą roślinną.

Kandydat celnie zauważa, iż istnieje trend spowodowany rozwojem metod i algorytmów fuzji wielo-źródłowych i wielo-czasowych geodanych powodowany faktem ich pozyskiwania przez aktywne (np. LiDAR, czujniki mikrofalowe) jak i pasywne sensory. W zależności od środowiska umiejscowienia obiektów czy też czynników zewnętrznych synergia różnych typów źródeł geodanych jest nieoceniona i pozwala na uzyskiwanie dokładniejszych wyników. Współczesny komercyjny rynek geoinformatyczny oferuje rozwiązania przetwarzania geodanych pozyskiwanych z platform wielo-sensorowych (np. systemy Mobilnego Skanowania Laserowego) w oprogramowaniu dedykowanym przez producentów konkretnym rozwiązaniom. Przykładowo Hexagon oferuje w dedykowanym platformie MLS Pegasus wykorzystanie naziemnych zdjęć fotogrametrycznych do wsparcia przetwarzania chmur punktów LiDAR (np. zagęszczania chmur lub ich uzupełniania) czy procesu wyrównywania danych. Kandydat oczywiście posiada znajomość wielu oprogramowań z zakresu TLS integrujące chmury punktów TLS ze zdjęciami pozyskiwanymi kamerami wbudowanymi na stałe w urządzenie lub zintegrowane ze skanerem (np. lustrzanki) ale faktycznie obrazy te są stosowane głównie w celach kolorowania chmur punktów i ich wizualizacji. Kandydat zwraca uwagę, iż niektórzy producenci w swoich oprogramowaniach posiadają zaimplementowane algorytmu do łączenia (dopasowania) pojedynczych chmur punktów TLS wspierając się rozwiązaniami *Simultaneous Localisation and Mapping* (ang. SLAM) znanych jako *Blue Workflow* czy *Visual Inertial System* (VIS) z wykorzystaniem jednostek inercyjnych IMU (czasem mamy jednak do czynienia ze wsparciem pomiarów metodami RTK GNSS – systemy DG (ang. *Direct Georeferencing*). Oczywiście istnieją rynkowe

prawne ograniczenia licencyjne czy też sprzętowe (np. opatentowane jednostki IMU czy algorytmy) do upowszechniania takich rozwiązań na drodze wolnego oprogramowania. Dodatkowo pojawiają się problemy z dostępem do zakupu licencji znanego oprogramowania Metashape Agisoft, które choć wymieniane przez Kandydata od około 3 lat nie może być zgodnie z prawem dostarczane do UE z Rosji (producent oprogramowania zarejestrowany w Federacji Rosyjskiej).

Te i inne przesłanki wymienione przez Kandydata spowodowały jego zainteresowanie w kierunku podjęcia prac naukowych nad opracowaniem autorskiego rozwiązania określanego przez niego pod akronimem „TLS-SfM”.

W skrócie metoda pozyskiwania chmur punktów TLS z wielu stanowisk zakłada ich połączenie na zasadzie „*Master – Slave*” czyli w zasadzie, orientację wzajemną (ang. *Relative Orientation*; RO) polegającą na transformacji afinicznej a w końcowym etapie nadania połączonej chmurze punktów - georeferencji (orientacji bezwzględnej; ang. *Extrenal Orientation*; EO) do przyjętego układu współrzędnych XYZ (płaskich i wysokościowych).

Orientacja chmury punktów TLS może być oparta na punktach (*point-based registration*) lub ma cechach obiektów (*featured-based registration*). Ta pierwsza metoda może dotyczyć zasady sygnalizowanych punktów osnowy lub tzw. metod *Iterative Closest Point (ICP)* a także algorytmu SLAM dopasowującemu grupy punktów do wspólnych płaszczyzn odniesienia lub kształtów. Metody dopasowania chmur punktów oparte na cechach obiektów bazują na detekcji krawędzi obiektów, płaszczyzn czy nawet krzywizn.

Z kolei metoda SfM opisywana w Autoreferacie przez Kandydata opiera się na założeniu, iż zdjęcia fotogrametryczne są niejako efektem rzutu sceny 3-D na płaszczyznę 2-D (rzutni), a analiza wielu projekcji o różnych współrzędnych XYZ środka rzutu umożliwia odtworzenie tej przestrzennej sceny. Istotą metody SfM jak pisze Kandydat jest wykorzystanie informacji o przemieszczaniu się środka rzutów (kamery) jak i artefaktach (punktach charakterystycznych na obrazach; punktach wiążących; ang. *tie points*), umożliwiających wyznaczenie elementów orientacji wewnętrznej (ang. *IO*; *Internal Orientation*) zdjęcia oraz zewnętrznej (EO) kamer i stereogramu. Procedura SfM składa się z kolejnych etapów takich jak:

- Detekcja punktów charakterystycznych (ang. *key points* lub *tie points*) np. narożników obiektów, ich krawędzi lub innych artefaktów w identyfikacji tych samych punktów na kolejnych analizowanych zdjęciach w obszarze ich wzajemnego pokrycia (ang. *overlap*).
- Przypisanie cech charakterystycznych punktom na podstawie analizy najbliższego otoczenia przy wykorzystaniu deskryptora (ang. *description*) – np. zmiany gradientów stopnia szarości.
- Dopasowanie punktów charakterystycznych (ang. *descriptor matching*).
- Wyznaczenie macierzy orientacji wzajemnej (RO) dla stereopary.

- Wyznaczenie struktury 3-D czyli reprezentacji obiektów na zdjęciach.
- Wyznaczenie zależności pomiędzy modelami w celu celem powiązania wielu zdjęć, oraz
- Wyrównanie metodą niezależnej wiązki przy jednoczesnym minimalizowaniu błędów.

Kandydat w ramach przeprowadzonych przez siebie prac przeanalizował możliwości wykorzystania metody SfM w zakresie orientacji zdjęć fotogrametrycznych pozyskanych z różnych platform i zaproponował jej modyfikację pod kątem przetwarzania archiwalnych zdjęć, danych obrazowych pochodzących z różnych sensorów oraz chmur punktów TLS. Skutkowało to prace powstaniem innowacyjnego autorskiego rozwiązania „TLS-SfM”.

Kandydat w przedłożonym cyklu publikacji (osiągnięcie nr I) proponuje osiągnięcie celów szczegółowych swoich badań, jakimi są:

1. Analiza doboru parametrów orientacji wysokorozdzielczych danych rastrowych pod kątem optymalnej ich orientacji metodą SfM.
2. Modyfikacja sposobu dopasowania zdjęć archiwalnych pozyskiwanych z różnych wysokości przy wykorzystaniu sensora o nieznanych parametrach.
3. Modyfikacja etapu opisu i dopasowania punktów kluczowych w orientacji zdjęć lotniczych i danych pochodzących z lotniczego SAR (*Synthetic Aperture Radar*, sensora aktywnego).
4. Badanie możliwości modyfikacji metody SfM pod kątem orientacji samych danych TLS i chmur punktów wygenerowanych ze zdjęć naziemnych oraz danych TLS.
5. Praktyczne wykorzystanie metody TLS-SfM w orientacji wieloczasowych danych przestrzennych.

Najważniejszym oryginalnym osiągnięciem naukowym Kandydata jest więc propozycja modyfikacji poszczególnych etapów metody SfM (dalej nazywanej „TLS-SfM”) w zautomatyzowanym procesie orientacji wielo-źródłowych i wielo-czasowych geodanych pochodzących z pasywnych oraz aktywnych platform pomiarowych - zaprezentowana jako cykl spójnych tematycznie publikacji pod nazwą „*Metodyka georeferencji danych z aktywnych i pasywnych sensorów pomiarowych przy wykorzystaniu zmodyfikowanej metody Structure-from-Motion*”.

Poniżej recenzent ustosunkował się do poszczególnych publikacji stanowiących cykl zgłoszony przez Kandydata jako osiągnięcie naukowe nr I.

Publikacja I - Analiza doboru parametrów w orientacji zdjęć naziemnych przy wykorzystaniu metody SfM

Wyniki badań dotyczące aspektów doboru parametrów orientacji zdjęć naziemnych przy wykorzystaniu metody SfM, Kandydat zawarł w publikacji nr 1 cyklu - *Quality assessment of the use of a medium format camera in the investigation of wall paintings: an image-based*

approach. Zaprezentowano w nim szereg analiz możliwości implementacji algorytmów SfM i zdjęć z wysokorozdzielczej kamery średnio-formatowej Hasselblad H6D-100 (100 Mpx) celem ustalenia wpływu doboru parametrów metody SfM na dokładność i efektywność orientacji zdjęć przy jednoczesnym skróceniu czasu ich przetwarzania. W analizach Kandydat i inni współautorzy wykorzystali oprogramowanie Agisoft PhotoScan (obecnie Metashape Agisoft) oraz autorską aplikację napisaną w C++ oraz bibliotekę OpenCV. W ramach publikacji analizowano:

- wpływ doboru detektorów (SIFT, SURF, FAST) na liczbę i sposób rozmieszczenia punktów wiążących,
- wpływ rozdzielczości zdjęć (100%, 50%, 25%, 12,5%) na uzyskiwaną jakość ich orientacji,
- dobór sposobu pomiaru osnowy fotogrametrycznej (tj. punktów osnowy i punktów kontrolnych mierzonych metodami geodezyjnymi oraz odcinków skalujących referencyjnych i kontrolnych mierzonych suwmiarką),
- wpływ parametru *gradual selection* w oprogramowaniu Agisoft PhotoScan na wartość błędu orientacji wzajemnej pary zdjęć.

Wyniki wykazały, iż w celu osiągania wyników obarczonych niewielkimi błędami należy stosować pomiary odcinków skalujących stosując suwmiarkę a nie pomiar tachymetryczny (dokładność tachimetrów urządzeń ± 1.5 mm oraz 1'' nie zapewnia odpowiedniej jakości wyznaczania osnowy). Przyczyną takich wyników czego można się było w zasadzie spodziewać była niewielka odległość fotografowania (2,3 m) skutkująca pikselem o wielkości 0,13 mm (GSD). Badania dowiodły, że nie zawsze zalecane jest wykorzystanie detektora SIFT. Większą liczbę poprawnie geometrycznie rozmieszczonych punktów wiążących generowano z użyciem detektorów SURF oraz FAST. Najlepsze wyniki uzyskano stosując detektorów zaimplementowane w komercyjnym oprogramowaniu Agisoft PhotoScan.

Ocena wpływ rozdzielczości zdjęć na proces uzyskiwanej dokładności orientacji i pomiaru na zdjęciach wykazała, że jej zmniejszenie znacząco skraca czas wyszukiwania i dopasowywania punktów wiążących przy jednoczesnym zachowaniu tego samego poziomu błędu orientacji zdjęć.

W Autoreferacie Kandydat może zbyt ogólnie pisać, iż 7 krotne skrócenie czasu opracowania (poprzez zastosowanie 4x zmniejszenia rozdzielczości zdjęcia) przyczyniło się do obniżenia dokładności orientacji (wartości RMSE) na odcinkach skalujących nie więcej niż 0.5 mm. Raczej to 4x zdegradowanie rozdzielczości obrazu przyczyniło się do skrócenia czasu przetworzeń a nie odwrotnie). Kandydat co prawda na początku cyklu wskazuje na komercyjne oprogramowanie (a nie autorskie) jako najlepsze do osiągania niskich wartości RMSE ale był to ważny początek jego drogi badawczej testujący różne detektory i rozdzielczości. Przeprowadzone przez Kandydata badania wykazały duży potencjał wykorzystania

wysokorozdzielczych zdjęć fotogrametrycznych i metody SfM dla celów inwentaryzacji i dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego.

Publikacja II - Możliwości wykorzystania metody SfM w przetwarzaniu archiwalnych zdjęć pozyskiwanych z różnych wysokości.

Modyfikacja sposobu dopasowania zdjęć archiwalnych pozyskiwanych z różnych wysokości przy wykorzystaniu sensora o nieznanych parametrach została opisana w drugim z cyklu publikacji artykule pt. *Development of true orthophotomaps of the fortified settlement at Biskupin, Site 4, based on archival data* przedstawiono koncepcję wykorzystania metody SfM w procesie orientacji niemetrycznych zdjęć historycznych Biskupina wykonywanych w sposób określany jako nefotogrametryczny. Zdjęcia archiwalne na szklanych płytkach, skanowano z rozdzielczością 3200 dpi i poddano korekcji radiometrycznej. Celem badań było odtworzenie przedwojennej dokumentacji archeologicznej z wykorzystaniem zdjęć wykonanych z różnych platform i różnymi kamerami w okresie 1930 – 1939. Zaproponowano odrębne ale logiczne podejścia do rozszerzenia metody SfM w celu orientacji zdjęć archiwalnych poprzez: pogrupowania zdjęć po wysokości AGL (wartości niskie, średnie i wysokie) oraz kątach nachylenia (OFF-NADIR; pionowe lub skośne), zdefiniowanie masek odpowiadających sobie fragmentów obrazów, modyfikację rozdzielczości obrazów na etapie detekcji punktów wiążących, uzupełnienie tych punktów manualnie mierzonymi na obrazach (10 punktów zamiast klasycznych 6-ciu) oraz przeprowadzenie dodatkowej filtracji punktów wiążących uwzględniających nie tylko wartości błędów RO ale także geometrię położenia punktów na stereogramach. Obrazy wymagały także modyfikacji jak np. usunięcia informacji o ramce tłowej czy obiektów ruchomych (np. pracownicy przy odkrywkach archeologicznych). Osnowę fotogrametryczną przygotowano w oparciu o zachowane mapy, jakie powstały prawdopodobnie w wyniku opracowania fotogrametrycznego tych zdjęć w przeszłości. Wybrano fotopunkty naturalne takie jak belki, kamienie, paleniska itp. co umożliwiło założenie osnowy fotogrametrycznej. W ten sposób metoda kombinowaną wykorzystano komercyjne oprogramowanie, które nie było w stanie poradzić sobie z automatycznym dopasowaniem zdjęć. Ingerencja manualna wprowadzająca inicjalne punkty Grubera pozwoliła na wygenerowanie ortofotografii w przyjętym układzie współrzędnych map z wykopalisk w Biskupinie prowadzonych w okresie międzywojennym.

Recenzent jest zdania, iż ten artykuł niekoniecznie musiał być wprowadzony do cyklu będącego osiągnięciem naukowym, gdyż nie wnosi w zasadzie nic innowacyjnego do poprawy automatyzacji orientacji zdjęć czy działania samych algorytmów. Zwiększenie poprawności orientacji zewnętrznej do układu przyjętego w mapach i szkicach uzyskano na drodze manualnej wymagającej dużych nakładów czasu i sporych umiejętności operatora. Oczywiście było to cenne doświadczenie dla Kandydata wymagającego niejako „cofnięcia się do klasycznych zasad fotogrametrii” i słusznego nabrania przekonania, że nie zawsze nawet komercyjne oprogramowanie bezkrytycznie pozwala ufać uzyskanym automatycznie wynikom. Dyskusyjne

jednak w tym przypadku jest nazywanie tej kombinowanej metody – modyfikacją procedury SfM. To raczej ułatwienie algorytmom zaimplementowanym w Photoscan Agisoft wykonania właściwej pracy po wstępnej orientacji obrazów na podstawie manualnie wprowadzonych punktów wiążących (Grubera). Cykl na pewno nie straciłby na swej wartości bez tego artykułu, skądinąd bardzo ciekawego historycznie.

Publikacja III - Modyfikacja etapu opisu i dopasowania punktów kluczowych w orientacji zdjęć lotniczych i danych pochodzących z lotniczego SAR (*Synthetic Aperture Radar*, sensora aktywnego).

W kolejnym artykule z cyklu publikacji, pt. „*Geometrical Matching of SAR and Optical Images Utilizing ASIFT Features for SAR-based Navigation Aided Systems*” - Kandydat prezentuje metodykę nadawania georeferencji wprost danym SAR (wizualizacja w postaci rastrowej po ich filtracji) na bazie ortofotomapy lotniczej z nadaną wcześniej georeferencją.

Innowacyjne podejście wyznaczania korekt przybliżonych parametrów georeferencji wprost nadawanej lotniczym zobrazowaniom SAR polega na wykorzystaniu referencyjnej ortofotomapy lotniczej 2-D. Praca została opublikowana jako jeden z efektów większego projektu, w którym kandydat uczestniczył a dotyczył on wykorzystania obrazów lotniczych do poprawy nawigacji opartej na jednostce IMU oraz zobrazowaniach SAR (aktywny sensor mikrofalowy). Specyficzna radiometria obrazów SAR oraz zniekształcenia geometryczne są przyczyną, iż standardowe metody SfM zaimplementowane w komercyjnych oprogramowaniach nie działają poprawnie. Modyfikacja metody zaproponowana przez Kandydata polegała na zastosowaniu rozwiązania afinicznego (algorytmie ASIFT) oraz rezygnację z podejścia deskryptor-dopasowanie deskryptorów na rzecz dopasowania punktów charakterystycznych przy wykorzystaniu zmodyfikowanej metody ICP 2-D.

Główne założenia modyfikacji metody SfM opisane w artykule zakładały następujące kroki:

1. Odpowiedni dobór fragmentu ortofotomapy lotniczej zgodnej z obszarem zobrazowania SAR odpowiednio przygotowanego (np. usunięcie szumów, zastosowania filtrów np. *Multilook 2D*, *Lee*, *Gama MAP* i innych).

2. Detekcja i dopasowywanie (ang. *matching*) punktów charakterystycznych (key-points) przy użyciu algorytmów ASIFT przy uwzględnieniu maksymalnego kąta wychylenia. Algorytm ASIFT wykorzystano do wykrywania punktów charakterystycznych na obrazach SAR (w postaci TIFF) oraz na ortofotomapach lotniczych.

- 2.1. Wykrywanie punktów charakterystycznych na obrazach SAR w pełnej 1/1 oraz 1/2, 1/4 i 1/16 pełnej rozdzielczości obrazu przy wykorzystaniu algorytmu ASIFT w celu eliminacji problemu różnic GSD rastrów SAR i ortofotomap lotniczych.

2.2. Wykrywanie punktów kluczowych (ang. *key points*) w pełnej rozdzielczości oraz na różnych poziomach piramidach ortofotomapy (pełna rozdzielczość, a także 1/2, 1/4 i 1/16 pełnej rozdzielczości rastra) przy wykorzystaniu algorytmu ASIFT.

3. Dopasowywanie punktów charakterystycznych przetworzoną metodą ICP 2D:

3.1. Przybliżona orientacja w oparciu o 20 iteracji i kryterium dokładności dopasowania – wartości linowego błędu RMSE=20 m.

3.2. Usuwanie punktów charakterystycznych wykrytych z ortofotomapy poza obszarem reprezentowanym na SAR.

3.3. Orientacja w oparciu o 20 iteracji i spełnieniu kryterium dokładności dopasowania – wartości linowego błędu RMSE=5 m.

3.4. Usunięcie wartości odstających punktu SAR na podstawie wartości linowej RMSE.

4. Ostateczne wyrównanie danych metodą niezależnej wiązki i wyznaczenie korekt nawigacyjnych poprzez analizę histogramu rozkładu odległości między punktami wiążącymi.

Badania Kandydata dowiodły, że autorska metoda geometrycznego dopasowania obrazów SAR do referencyjnych danych optycznych wykorzystująca algorytm ASIFT jest odpowiednia do obliczania poprawek do parametrów przybliżonej georeferencji wprost dla systemów wspomagania nawigacji opartych na zobrazowaniach SAR. Błędy nadawania georeferencji dla długości geograficznej były niemal 3x większe niż w przypadku szerokości geograficznej, co powodowane było specyfiką geometrii obrazów SAR (boczne wybieranie). Wyznaczenie poprawki jest utrudnione i niejednoznaczne, ale aproksymacja histogramu (za pomocą krzywej Gaussa) i interpolacja danych prowadzi do poprawnego oszacowania korekty nawigacyjnej co może mieć współcześnie niezmiernie duże znaczenie w aspekcie celowego zakłócania sygnałów GNSS będącego wynikiem działań militarnych. Fuzja danych optycznych (pasywnych sensorów) i mikrofalowych (aktywnych sensorów) prowadzi wraz z wykorzystaniem informacji z jednostki IMU do zwiększenia poprawności nawigacji statku powietrznego na podstawie pozyskiwanych danych mikrofalowych i archiwalnych ortofotomap lotniczych (prawdopodobnie też satelitarnych VHRS takich jak np. WordView-3 lub Legion; klasa 30 cm GSD; VHRS, MAXAR).

Mały błąd drukarski wkradł się jednak do publikacji na Rycinie 3 (w artykule w Sensors - Fig. 5), na której niefortunnie zamienione zostały opisy szerokości geograficznej (LAT) z długością geograficzną (LON). Pozostałe ryciny opisano jednak poprawnie.

Publikacja IV - Badanie możliwości modyfikacji metody SfM pod kątem orientacji samych danych TLS i chmur punktów wygenerowanych ze zdjęć naziemnych oraz danych TLS.

Kandydat dokonał oceny wpływu doboru transformacji chmur punktów na dokładność orientacji autorską metodą TLS-SfM. Celem dokonania rzetelnej analizy wykorzystania algorytmów detekcji punktów charakterystycznych na rastrze intensywności (Intensity; TLS LiDAR) i oceny wpływu na dokładność orientacji chmur punktów TLS, dokonano oceny doboru formy jej transformacji, które opisano w artykule pt. „*The Influence of the Cartographic Transformation of TLS Data on the Quality of the Automatic*” (artykuł nr 4 w cyklu publikacji).

W artykule wykorzystano reprezentatywne detektory tzw. *hand-crafted* zaliczane do grupy algorytmów punktowych (tzw. *corner detectors*) – FAST (*Features from Accelerated Segment Test*) oraz powierzchniowych (*blob*) – SURF (*Speeded Up Robust Features*). Dla potrzeb dokonania niezależnej kontroli dokładności orientacji chmur punktów metodą TLS-SfM, wykorzystano znaną metodę bazującą na sygnalizowanych punktach osnowy (ang. *targets*) równomiernie rozmieszczonych w obszarze skanowania.

Dokonane analizy ilości wykrytych punktów charakterystycznych pozwalają na stwierdzenie, iż w przypadku chmur punktów TLS zabytkowych obiektów (pole III i IV) algorytmy FAST i SURF wykryły znaczącą liczbę punktów wiążących w wyniku dopasowania deskryptorów, lecz wiele z tych par było niepoprawnych i zostało usunięte. Oznaczać to może, iż duża liczba dopasowanych punktów wiążących na etapie dopasowania deskryptorów nie zawsze świadczy o lepszym wyniku procesu dopasowywania punktów. W przypadku innych pól testowych (V i VI) o gładkich ścianach pozbawionych detali architektonicznych, liczba wykrytych punktów wiążących była zdecydowanie mniejsza niż w przypadku ww. pól III i IV. Pomimo znacznie mniejszej liczby punktów, większość z nich nie została jednak usunięta w procesie filtracji danych, co świadczy o poprawnym dopasowaniu deskryptorów. Dalsze analizy dotyczyły porównania dokładności dopasowania przetworzonych do formatu rastrowego chmur punktów TLS metodami tradycyjnie stosowanymi czyli *target-based* oraz autorską metodą TLS-SfM wykonując analizę średnich wartości błędów RMSE.

Analizując wyniki uzyskane przez Autorów publikacji można stwierdzić, iż zaproponowana metoda TLS-SfM umożliwia uzyskiwanie lepszych dokładności dla wszystkich stosowanych odwzorowań kartograficznych (*Spherical*, *Orthoimage*, *Mercator*) w przypadku analizowanych obiektów zabytkowych w Wilanowie (charakteryzujących się bardzo dużą liczbą detali architektonicznych oraz zróżnicowaną teksturą) niż przy zastosowaniu podejścia tradycyjnego (*target-based*). W przypadku pola testowego V (pomieszczenie biurowe) wyniki osiągnięte metodą TLS-SfM okazały się gorsze niż dla metody tradycyjnej wykorzystującej sygnalizowane cele (tzw. *targets*), jednak stosując większą ich liczbę można uzyskać prawidłową orientację. W przypadku analizowanego pola testowego IV wyniki uzyskane za pomocą TLS-SfM powinno się traktować jako przybliżenie orientacji wykonanej metodą dopasowania ICP (*Iterative Closest Point*). Wyniki otrzymane w ramach tych badań były przyczynkiem

kontynuacji badań Kandydata nad doбором detektora punktów charakterystycznych oraz wpływu doboru deskryptora na jakość dopasowania.

Istotnym w tego typu badaniach jest wiedza na temat poprawnego rozmieszczenia stanowisk skanera i w zależności od sytuacji odpowiedni dobór metod konwersji chmur punktów XYZI TLS LiDAR do postaci rastrowej (TIFF; ang. *Intensity* – obraz w odcieniach szarości, Intensywność odbicia promienia lasera). Stanowiska skanera mogą być blisko siebie położone przez co powierzchnie mierzone są pod podobnymi kątami co ogranicza powstawanie „zniekształceń” na obrazach sferycznych. W takim przypadku Autorzy artykułu zalecają wykorzystanie obrazów rastrowych TLS (*Intensity*) w odwzorowaniu sferycznym lub Merkatora, przy czym dość istotna jest wysokość głowicy skanującej nad poziomem odniesienia (powyższe odwzorowania proponuje się do skanów pozyskiwanych nisko nad gruntem/podłogą). W przypadku wysoko wysuniętego instrumentu skanującego zaleca się stosowanie odwzorowania Merkatora.

W sytuacji kiedy stanowiska skanera są nieregularnie rozmieszczone powoduje to pomiar pod różnymi kątami i często z różnych odległości tych samych fragmentów obiektów, dlatego w takiej sytuacji Autorzy publikacji zalecają wykorzystanie ortoobrazów co zapobiega pojawianiu się „zniekształceń”. One z kolei powodują trudnościami w jednoznacznej identyfikacji punktów wiążących (*tie-points*) dla każdego algorytmu (detektora).

Publikacja V - Wpływ doboru detektora na dokładność orientacji chmur punktów metodą TLS-SfM

W artykule „*Analysis of the Selection Impact of 2D Detectors on the Accuracy of Image-Based TLS Data Registration of Objects of Cultural Heritage and Interiors of Public Utilities*” (publikacja nr 5 w cyklu) autorzy skupili się na analizach wyników pracy algorytmów (tzw. detektorów) służących detekcji punktów charakterystycznych, które służą wyznaczaniu punktów wiążących (*tie points*). Wybór detektora jest kluczowe dla procesu orientacji chmur punktów wykonywaną metodą SfM a także autorską TLS-SfM. Autorzy publikacji przedstawiają analizę klasycznych detektorów punktowych (tzw. *hand-crafted*) oraz detektorów powierzchniowych (tzw. *blob*). Na bazie dostępnej literatury przeanalizowano wykorzystywanie detektorów *blob* (SURF) oraz punktowego (FAST) a także algorytmy: SIFT (popularny w wyszukiwaniu punktów charakterystycznych), BRISK (rozszerzona wersja algorytmu FAST bazująca na piramidach obrazu) oraz CenSurE (filtry *center-surround*, wykorzystywane do obliczeń w czasie rzeczywistym i skracające czas obliczeń). Dodatkowo Kandydat dokonał sprawdzenia czy wykorzystanie: obrotów, skręceń, pochylenia oraz zmian skali umożliwi znaczącą poprawę w kompletności i dokładności orientacji chmur punktów metodą TLS-SfM przy wykorzystaniu detektora ASIFT.

Publikacja ta jest kontynuacją wcześniej omawianego artykułu nr 4 z cyklu, gdyż analizy prowadzone są na tych samych danych TLS i na tych samych polach testowych w Wilanowie. W prac badawczych skupiono się przede wszystkim na jakości dopasowania parami chmur

punktów bez finalnej oceny dokładności wspólnego wyrównania wszystkich chmur punktów oraz bez uwzględnienia rozkładu punktów wiążących i analizy współczynników niezawodności wewnętrznej sieci geodezyjnych. Być może ten artykuł powinien być zamieniony w kolejności z wcześniej omawianym, gdyż trochę cofa czytelnika w procesie orientacji skanów TLS w formie rastrowej do etapu detekcji punktów charakterystycznych.

Na podstawie opublikowanych wyników Kandydat stwierdza, iż uzyskanych dla wszystkich pól testowych największy odsetek poprawnie dopasowanych punktów charakterystycznych uzyskano stosując detektor BRISK (bazujący na piramidach obrazu), a najmniejszą liczbę w przypadku algorytmu ASIFT. Odwrotna zależność miały miejsce w odniesieniu do samej liczby wykrytych punktów, tj. ASIFT wykrył 5x więcej niż inne algorytmy. Nie zawsze jednak więcej znaczy lepiej czy szybciej szczególnie w dalszych etapach przetwarzania danych.

Oceniając przydatność detektorów i dobór odwzorowania kartograficznego w automatycznej orientacji danych TLS (Kandydat pisze chmur punktów TLS co nie jest tożsame ale pewnym uproszczeniem jak zakłada recenzent) należy zwrócić uwagę na wartości RMSE na sygnalizowanych punktach osnowy fotogrametrycznej służących metodzie *target-based*.

W przypadku danych TLS (pozyskanych przez skaner pierwszej generacji Z + F; pole testowe III) dokładność orientacji (na rastrowych obrazach po projekcji sferycznej) i przy użyciu detektorów była zawsze wyższa niż przy stosowaniu metody *target-based*.

Najmniejsze błędy RMSE uzyskano w przypadku detektora ASIFT, a największe dla detektora BRISK. W przypadku obiektów architektonicznych takich jak Wilanów Kandydat zaleca rastrów Intensity (TLS LiDAR) w odwzorowaniu sferycznym lub w Merkatora, gdyż dokładność ich orientacji (w przypadku detektorów: FAST, CenSurE, SURF i ASIFT) była wyższa niż dokładność metody *target-based*.

Analizując uzyskiwane błędy RMSE orientacji metodą TLS-SfM w przypadku pola testowego V (pomieszczenia biurowe), które pozbawione są zdobień i detalami architektonicznych - można jednoznacznie stwierdzić, że wykorzystanie detektorów nie wpływa na zwiększenie dokładności orientacji danych w porównaniu do metod *target-based*. Zastosowanie detektora ASIFT i ortoobrazów pozwoliło na osiągnięcie podobnej dokładności orientacji, wyższej niż rozdzielczość skanowania. W przypadku powierzchni obiektów skanowanych, które nie mają zróżnicowanej tekstury i charakteryzują się wysokimi gradientami zmian wartości poziomów szarości, najlepsze wyniki uzyskano dla detektora FAST (detektor punktowy) z obrazem rastrowym Intensity w odwzorowaniu sferycznym oraz dla detektora ASIFT (detektor typu *blob* uwzględniający afinizm) z chmurami punktów przetransformowanymi do wszystkich odwzorowań kartograficznych.

Kandydat stwierdził na podstawie wyników iż wyniki uzyskane dla pola testowego VI (pusty sklep w centrum handlowym) dla wszystkich detektorów (z wyjątkiem detektora ASIFT) należy traktować jedynie jako przybliżenie ostatecznego procesu orientacji przy użyciu metody ICP. Wartości błędów orientacji RMSE w przypadku użycia detektora ASIFT i odwzorowań:

Sferycznego i Merkatora są zbliżone do rozdzielczości skanowania TLS, przez co można je uznać za akceptowalne, choć wartości błędów są 3x wyższe niż w sytuacji metody *target-based*.

Rozważając dobór detektora do wykrywania punktów charakterystycznych Kandydat stwierdza, iż zawsze należy uwzględniać charakterystykę skanowanego obiektu. W przypadku przetwarzania obiektów zaliczanych do dziedzictwa kulturowego wykorzystanie detektora ASIFT (ok. 6x dłuższym czasem przetwarzania danych niż inne detektory) nie jest konieczne. Zamiast tego algorytmu zaleca się stosowanie detektorów FAST lub CenSurE, które zwracają podobną liczbę punktów, co przyczynia się do szybszych obliczeń. W przypadku obiektów użyteczności publicznej Kandydat sugeruje stosowanie detektora ASIFT umożliwiającego uzyskanie pełnej orientacji. Wybór innych detektorów wiąże się jednak z koniecznym nad przebiegiem analizy a w niektórych przypadkach należy użyć metod rejestracji ICP.

Ponadto zastosowanie detektora ASIFT i obrazów rastrowych TLS w odwzorowaniu Sferycznym lub w Merkator - umożliwiło pełną orientację chmur punktów TLS. Użycie detektorów BRISK oraz CenSurE oraz wykorzystanie odwzorowania ortoobrazu zwiększyło dokładność procesu orientacji w porównaniu z odwzorowaniami Sferycznym i Merkator dla pola testowego III i IV.

W przypadku przetwarzania obiektów o słabej teksturze (pole testowe V i VI), użycie detektora ASIFT umożliwiło pełną orientację wszystkich chmur punktów TLS, a użycie detektorów FAST i SURF pozwoliło na orientację tylko wybranych, często posiadających duże pokrycie. Detektory BRISK i CenSurE charakteryzują się niższą stabilnością, dlatego wg Kandydata dodatkowa rejestracja przy użyciu metody ICP może okazać się konieczna.

Podsumowując Kandydat stwierdza, iż algorytm ASIFT pozwolił na uzyskanie dokładności zbliżonych do metody *target-based* oraz gorszych niż rozdzielczość skanowania i kompletność procesu orientacji danych dla wszystkich pól testowych, z wykorzystaniem odwzorowania sferycznego i Merkatora. Pomimo wymienionych zalet algorytm ASIFT jest znacznie wolniejszy niż inne analizowane algorytmy: BRISK, FAST, SURF oraz CenSurE, co należy wziąć pod uwagę na etapie wyboru detektora. W ramach przeprowadzonych badań Kandydat udowodnił, iż wykorzystanie ortoobrazów Intensity (TLS; TIFF) pozwala na wykrycie większej liczby punktów wiążących i zwiększa dokładność rejestracji skanów.

Publikacja VI - Analiza możliwości wykorzystania detektorów afinicznych w orientacji chmur punktów metodą TLS-SfM

Celem artykułu było przedstawienie możliwości wykorzystania detektorów afinicznych (*BRISK*, *FAST*, *SURF* oraz *CenSurE*) w procesie orientacji chmur punktów oraz ocena wpływu wyboru detektora na dokładność i kompletność procesu TLS-SfM. W ramach tego artykułu Kandydat analizował czas przetwarzania danych (na procesorze CPU) na poszczególnych etapach metody TLS-SfM oceniając: (1) konwersję chmur punktów z formatu binarnego skanera do formatu tekstowego; (2) konwersję chmur punktów TLS (pts) do formatu rastrowego w odwzorowaniu sferycznym; (3) import chmur punktów w formacie pts do oprogramowania

CloudCompare; (4) czas przetwarzania metodą TLS-SfM oraz (5) czas przetwarzania metodą ICP *target-based*.

Kandydat dowodzi, iż czas konwersji binarnych chmur punktów TLS do formatu *.pts zależy od liczby przetwarzanych chmur punktów co z góry w zasadzie jest wiadome. Porównując czas wymagany na konwersję chmur punktów TLS do formy obrazu rastrowego Intensywności z czasem potrzebnym na import chmur punktów do oprogramowania CloudCompare, który był stosowany do pomiaru punktów wiążących metodą *target-based* lub ICP - można zauważyć że są one podobne, a maksymalna różnica dla pola testowego IV wynosi tylko 4 minuty i 40 sekund.

Porównując czasy przetwarzania przy użyciu klasycznych detektorów i detektorów afinicznych Kandydat zauważa, znaczącą różnicę w całkowitym czasie przetwarzania co jest powodowane wprowadzaniem afinizmu dla poszczególnego obrazu, czasem detekcji pojedynczego punktu kluczowego (key-point) oraz liczbą wykrytych punktów charakterystycznych. Analizy wykazały, iż najkrótszy czas orientacji (bez uwzględniania konwersji binarnej chmury punktów do formatu *.pts i *.TIFF) uzyskano dla detektora BRISK, a najdłuższy czas w przypadku wszystkich pól testowych dla detektora ASURF.

Różne czasy metodą TLS-SfM wynikają również z charakterystyki obiektów skanowanych. W przypadku pól testowych I i II czas przetwarzania danych był najdłuższy, gdyż algorytmy wykrywały znacznie większą liczbę punktów niż w przypadku innych pól testowych, dla których czasy były zbliżone.

Habilitant porównując wyniki uzyskane autorską metodą TLS-SfM z metodą *target-based* oraz ICP zwraca uwagę czytelnika, że (1) najkrótszy czas łączenia danych uzyskał przy użyciu wszystkich detektorów na wszystkich polach testowych. Wyjątek stanowią detektory SURF i FAST użyte na polu testowym I. Wystąpiły też skrajne przypadki kiedy użycie algorytmu ASURF dla wszystkich pól testowych, a także ASIFT i AFAST (dla pól testowych I i II) powodowało że czasy nie były zbliżone. Autor publikacji zauważa, iż jeśli konieczne jest skrócenie czasu przetwarzania danych, zaleca on wykorzystanie klasycznych detektorów, z tym że proces musi być nadzorowany więc nie przebiega on automatycznie. Stosowanie detektorów afinicznych przekłada się w zasadzie na w pełni zautomatyzowane podejście, ale może ono skutkować znacznie dłuższym czasem przetwarzania danych.

Kandydat ocenił też poprawność i kompletność dopasowania par skanów dla wszystkich analizowanych pól testowych i stwierdził, iż detektory afiniczne gwarantują poprawną orientację wielostanowiskowych chmur punktów TLS przy wykorzystaniu metody autorskiej TLS-SfM. Jedynie dla pola testowego nr I wykorzystanie detektora ACenSurE nie doprowadziło do uzyskania poprawnej orientacji metodą autorską TLS-SfM.

Dla pól testowych II – V wykorzystanie detektorów afinicznych umożliwiło globalną orientację chmur punktów TLS korzystając ze wszystkich algorytmów. Najgorsze wyniki uzyskano dla pola testowego VI (podobnie jak w przypadku klasycznych detektorów), ale możliwe było przeprowadzenie pełnej rejestracji jedynie za pomocą detektorów *ASIFT* i *AFAST*.

Podsumowując publikację nr 6, Kandydat zauważa, iż:

- Wybór odpowiedniego detektora powinien być determinowany przez rodzaj skanowanego obiektu, gdyż w przypadku pomieszczeń o dobrej teksturze, złożonej geometrii i dużej liczbie detali architektonicznych - możliwe jest stosowanie detektorów: FAST, SURF i SIFT oraz ich odpowiedników afinicznych. Stosując autorską metodę TLS-SfM w obiektach architektonicznych pozbawionych tekstury o niskim stopniu skomplikowania geometrii wnętrza zaleca on detektory AFAST lub ASIFT.

- Uwzględnienie afinizmu w działaniu detektorów pozwala na znaczące zwiększenie dokładności orientacji par skanów oraz kompletności orientacji wszystkich skanów w procesie wyrównania łącznego. Stwierdzono poprawę orientacji chmur punktów w przypadku detektorów ACenSurE i ABRISK dla pól testowych I-V. Wykorzystanie detektorów AFAST i ASIFT umożliwiło łączną orientację wszystkich pozyskanych skanów.

- Użycie detektorów punktów powoduje dłuższe wykrywanie punktów charakterystycznych niż w sytuacji detektorów powierzchniowych. Najmniejsze różnice zaobserwowano dla detektorów *ASIFT* i *ASURF*. Czas wyszukiwania pojedynczych punktów charakterystycznych w przypadku detektora *ASURF* był krótszy niż dla stosowania detektorów *CenSurE* i *SIFT*.

- Wykorzystanie detektorów afinicznych pozwala na detekcję dużej liczby punktów charakterystycznych oraz zwiększa dokładność i kompletność procesu rejestracji danych TLS.

- Liczba wykrywanych punktów charakterystycznych w przypadku detektorów punktowych (*ABRISK* i *AFAST*) wzrosła około 8-12x, a dla detektorów powierzchniowych (*ACenSurE*, *ASURF* i *ASIFT*) niemal 10-24x w porównaniu z klasycznymi detektorami.

- Ocena dokładności orientacji chmur punktów metodą target-based wykazała, że mniejsze wartości błędów RMSE można uzyskać stosując afiniczne detektory powierzchniowe niż klasyczne. Większe wartości RMSE uzyskano dla detektorów punktowych i ich odpowiedników afinicznych (<4 mm; średnio 2 mm). Średnie wartości RMSE dla powierzchniowych detektorów afinicznych i klasycznych były podobne i mniejsze dla detektora FAST.

- Wewnętrzne wskaźniki niezawodności pozwalają na szybką weryfikację liczby i rozkładu geometrycznego punktów. Jeżeli wartość współczynnika jest równa 0 to punkt wiążący jest niekontrolowalny, a jeśli wartość jest równa 1 to punkt jest w pełni kontrolowalny względem innych punktów sieci geodezyjnej.

- Porównując wyniki uzyskane za pomocą metody TLS-SfM z wartościami z *target-based* można jednoznacznie stwierdzić, że dla pola testowego I wartość współczynnika niezawodności sieci wynosiła od 0,91 do 0,99, podczas gdy dla metody opartej na punktach osnowy średnia wynosiła 0,67.

- Zastosowanie metody TLS-SfM umożliwia orientację chmury punktów TLS z dokładnością zbliżoną do powszechnie stosowanych metod tj. *target-based* lub ICP. Kandydat

podkreśla, że przedstawiona metoda oparta na detektorach afinicznych nie wymaga żadnych wcześniejszych założeń dotyczących wstępnej rejestracji chmury punktów TLS, co jest kluczowe w przypadku metody ICP.

Publikacja VII - Wykorzystanie metod uczenia maszynowego w detekcji punktów wiążących w metodzie TLS-SfM

Kolejną publikacją z przedłożonego cyklu jest *The evaluation of hand-crafted and learned-based features in Terrestrial Laser Scanning-Structure-from-Motion (TLS-SfM) indoor point cloud registration: the case study of cultural heritage objects and public interiors*, która dotyczy oceny przydatności metod detekcji punktów wiążących opartych na uczeniu maszynowym (na sieciach neuronowych). Zakres tematyczny tej publikacji odpowiada w zasadzie przedłożonemu projektowi przedwdrożeniowemu (osiągnięcie nr II) *Technologia integracji wielosensorowych danych geoprzestrzennych wykorzystywanych do generowania wysokorozdzielczej dokumentacji architektonicznej* (Inkubator Innowacyjności 4.0).

Kandydat wykorzystywał algorytmy SuperGlue (typu: *detect-&-describe*), LoFTR (typ: *describe-to-detect*) oraz porównał otrzymane wyniki z tymi zwróconymi przez algorytmy wcześniej stosowane tj.: AFAST, ASURF, ASIFT (typ: *hand-crafted detect-then-describe*) oraz KeyNet detektor + AffNet + HardNet deskryptor (typ: *learned-based detect-then-describe* w publikacji jako KeyNetAffine). Analizy Kandydat przeprowadzał na wszystkich wcześniej opisanych polach testowych, a wyniki porównał z dokładnościami orientacji otrzymanymi metodą *target-based* oraz ICP.

Okazało się, że tylko w sytuacji stosowania detektorów AFAST i ASIFT możliwe było przeprowadzenie całościowej orientacji chmur punktów autorską metodą TLS-SfM dla wszystkich analizowanych pól testowych. Analiza poprawności dla każdego pola testowego wykonana została oddzielnie. Kandydat oceniając uzyskane wyniki dla algorytmu *LoFTR* (typ: *describe-to-detect*) stwierdził najgorsze wyniki. Autor oceniając całościowy proces orientacji chmur punktów metodą TLS-SfM (orientację wielostanowiskowych skanów) istotna była nie tylko procentowa liczba poprawnie zorientowanych par chmur punktów, ale także dobór par skanów umożliwiających globalną orientację wszystkich możliwych chmur punktów:

- Metoda *LoFTR* uniemożliwiła poprawną orientację chmur punktów pozyskanych pod ostrymi kątami względem normalnej do powierzchni mierzonego fragmentu obiektu i w znacznie różnych odległościach od lustra skanera co powodowało „zniekształcenia” na rastrach w odwzorowaniu sferycznym.
- Metody typu *hand-crafted* umożliwiły wykrycie większej liczby poprawnych punktów wiążących (w porównaniu do metod *learned-based*), co przełożyło się na zwiększenie liczby poprawnie zorientowanych par chmur punktów.
- Zastosowanie wersji afinicznej detektorów przyczyniło się znacząco do poprawy jakości i dokładności orientacji metodą TLS-SfM. Wykorzystanie algorytmów *ASIFT* i *AFAST*

pozwoлиło na orientację par chmur punktów niezbędną do ostatecznej globalnej orientacji w sytuacji wszystkich analizowanych pól testowych.

- Podobne jak ww. wyniki zaobserwowano w przypadku metody nazwanej *KeyNetAffine*. W porównaniu z innymi metodami opartymi na algorytmach *learned-based*, możliwe było zorientowanie większej liczby par skanów ze znacząco oddalonych stanowisk skanera. W sytuacji orientacji par skanów o niewielkiej odległości pomiędzy sobą ale charakteryzujących się dużym zniekształceniem (pola III i V) znacznie lepsze wyniki uzyskano stosując podejście *SuperGlue* niż *KeyNetAffine* czy też *LoFTR*.

Kandydat analizując pozostałe aspekty związane z dokładnością orientacji chmur punktów metodą TLS-SfM oraz algorytmami *learned-based* i *hand-crafted* wyciągnął następujące wnioski:

- Detektor powinien być dobierany do charakterystyki pola testowego. W przypadku wnętrza z dobrą teksturą i dużą ilością zdobień można korzystać z detektorów *hand-crafted* tj.: AFAST, ASURF, ASIFT, jak również na detektorach typu *learned-based*: *SuperGlue* i *LoFTR*. W sytuacji nieskomplikowanych pomieszczeń (prosta geometria) Kandydat zaleca stosowanie detektorów AFAST lub ASIFT.

- Afiniczne detektory typu *hand-crafted* wykrywają duże ilości punktów wiążących, co skutkuje wysoką dokładnością i kompletnością procesu orientacji chmury punktów TLS w porównaniu do wyników opartych na metodach *learned-based*. Liczba wykrytych tie points w przypadku zabytków była o 21–91x, a budynków użyteczności publicznej o około 2,8–5x większa stosując detektory typu *hand-crafted*.

W przypadku zabytków uzyskiwano 2x mniejsze wartości błędów liniowych (RMSE) dla metod *hand-crafted* niż stosując metodę *target-based*. Zastosowanie metody *learned-based* pozwoliło na uzyskanie podobnych zbliżonych wartości RMSE jak dla metody *target-based*. Wykorzystanie afinicznych detektorów *hand-crafted* do orientacji chmury punktów jest poprawne i uzasadnione.

- Analiza wskaźników wewnętrznej niezawodności sieci geodezyjnych wykazała, że afinicznych detektorów *hand-crafted* zwiększają odporność sieci geodezyjnej i ułatwiają wykrywanie wartości odstających.

- Orientacja chmur punktów autorską metodą TLS-SfM na obrazach rastrowych intensywności TLS (wraz z mapą głębokości; ang. depth map) i detektorach afinicznych pozwala na uzyskanie podobnych wyników jak metodach *target-based* czy też ICP. Zaletą jednak autorskiego podejścia do orientacji chmury punktów jest wykorzystanie większej liczby automatycznie wykrytych punktów wiążących (kilka razy Kandydat używa chyba błędnie słowa „wiązanych”) co umożliwia poprawniejszy rozkład przestrzenny i wykrywanie odstających wartości. Do orientacji chmur punktów metodą ICP chmury muszą być wstępnie zorientowane a w podejściu opartym na detektorach afinicznych taki warunek nie jest wymagany. Wybór i filtracja punktów wiążących w tym przypadku jest wykonywana w procesie dwuetapowym

bazującym na dopasowaniu deskryptorów i weryfikacji geometrycznej opartej na algorytmie RANSAC.

- Wyniki orientacji metodą TLS-SfM oparte na zastosowaniu metodach *learned-based* wykorzystujących głębokie sieci neuronowe wytrenowane na obrazach świadczą o wysokiej wydajności i zasadności zastosowania w orientacji danych. Celem zwiększania i poprawy dokładności oraz kompletności orientacji skanów obiektów o nieskomplikowanej teksturze a tym samym mniejszej liczbie detali architektonicznych Kandydat zaleca trening sieci neuronowej na zestawie danych uczących opartych na rastrach intensywności wygenerowanych na podstawie chmur punktów TLS.

Publikacja VIII - Praktyczne zastosowanie metody TLS-SfM w integracji danych fotogrametrycznych i pozyskanych sensorem elektromagnetycznym

Kandydat w ostatniej ósmej publikacji cyklu „*Non-destructive system for in-wall moisture assessment of cultural heritage buildings*” (artykuł nr 8) prezentuje wykorzystanie metody TLS-SfM do implementacji z danymi z sensora elektromagnetycznego (Liverpool John Moores University) w analizie wilgotności ścian Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie. Uzyskane dane elektromagnetyczne nie były zapisywane i przetwarzane przez urządzenie do postaci rastrowej, przez co zaproponowano niestandardowe podejście do ich orientacji. Kandydat zastosował metodykę pozyskiwania i przetwarzania danych:

- Tachimetryczny pomiar punktów osnowy fotogrametrycznej (detale malowideł ściennych) metodą kąтового przestrzennego wcięcia w przód. Dodatkowo przeprowadzono pomiar punktów na ramie sensora elektromagnetycznego na różnych stanowiskach w celu oceny dokładności wyznaczenia jego położenia autorską metodą TLS-SfM.

- Pozyskanie chmur punktów TLS LiDAR (Z=F 5006h) .

- Wykonanie serii zdjęć aparatem Canon EOS 5D przy czym jedna seria zdjęć została wykorzystana do wygenerowania referencyjnego ortoobrazu wraz z mapą głębi, który wykorzystano do orientacji chmur punktów metodą TLS-SfM oraz orientacji chmur punktów obrazujących poszczególne stanowiska sensora elektromagnetycznego. Zdjęcia a lustrzanki zostały przetworzone w komercyjnym oprogramowaniu Agisoft Metashape. Otrzymano gęstą chmurę punktów, NMPT obiektu oraz ortoobraz RGB wraz z mapą głębi. Do przeprowadzenia EO wykorzystano punkty osnowy fotogrametrycznej pomierzone tachimetrycznie. Druga seria zdjęć Canon EOS wykonana została niezależnie dla każdej pozycji sensora pomiaru wilgotności ściany. Na podstawie drugiej serii wygenerowano gęste chmury punktów i zorientowano je metodą TLS-SfM do przyjętego systemu odniesienia.

- Przetwarzanie chmur punktów TLS w kierunku generowania ortoobrazów GSD 2 mm oraz mapy głębi (oprogramowanie LupoScan). Normalizacja Intensywności punktów TLS (kąt i odległość).

- RO (Relative Orientation) chmur punktów TLS z IPC (Image Point Cloud) w oparciu o metodę TLS-SfM - ortoobrazy i detektor SURF.

- Określenie położenia sensora elektromagnetycznego z wykorzystaniem Agisoft Metashape (matching, gęsta IPC, DSM, true ortho RGB + mapa głębi) oraz autorskiej metody TLS-SfM celem orientacja wzajemna (RO) względem zdjęć referencyjnych (ortoobrazy i detektor SURF). Położenie anten urządzenia określano na podstawie GCP sygnalizowanych na obudowie sensora.

Kandydat nie opisuje szczegółowo wszystkich wyników osiągniętych w zakresie tej publikacji a jedynie te odnoszące się do użycia metody TLS-SfM, gdyż jak zauważa bezpośrednio nie odnoszą się one do przedstawionego osiągnięcia naukowego w ramach rozprawy habilitacyjnej. Opisuje za to możliwości praktycznego wykorzystania metody TLS-SfM w architektonicznej inwentaryzacji płaskich fragmentów ścian. Autorska metoda TLS-SfM pozwoliła na wykrycie i wygenerowanie dużej a nawet nadmiarowej liczby punktów wiążących, co Habilitant wykorzystał jako punkty osnowy (*control points*) oraz punkty kontrolne do oceny dokładności (*check points*) czyli tak jak w procesie fotogrametrycznego opracowania.

Dalej Kandydat przedstawia wyniki błędów orientacji jakie uzyskał w przypadku naturalnych punktów osnowy i na punktach kontrolnych, które w obydwu przypadkach nie przekraczały ± 10 mm (X, Y i Z). Podobne wyniki uzyskał Kandydat w przypadku pola testowego II jednak napotkał wartości odstające w zbiorze danych. Najmniejsze błędy uzyskano dla współrzędnej X, tj. na kierunku prostopadłym do płaszczyzny analizowanej ściany. Pomimo występowania błędów systematycznych proces orientacji został wykonany poprawnie szczególnie iż wartość GSD ortoobrazu wynosiła zaledwie 2 mm.

Ważnym efektem praktycznego zastosowania metody TLS-SfM było określenie położenia sensora elektromagnetycznego do pomiaru wilgotności ściany na podstawie serii zdjęć. W tym celu wykorzystano referencyjne sygnalizowane GCP na obudowie sensora elektromagnetycznego pomierzone tachimetrem. Wykorzystano je także jako punkty kontrolne (*control points*) dla określenia błędów orientacji oraz poszukiwania wartości odstających (analiza SMAD; Sigma Median Absolute Deviation). Kandydat uzyskał bardzo dobre wyniki orientacji gdyż wartość RMSE $< 0,5$ oczka rastra (wartość średnia oraz mediana RMSE $< 0,4$ piksela; Std. dev RMSE oraz SMAD były zbliżone dla obu pól testowych). W zasadzie nie było wartości odstających na punktach kontrolnych jakie wykorzystano do EO.

Dokładność EO bazująca na zdjęciach wykorzystanych do orientacji sensora elektromagnetycznego dla obu pól testowych była jednak zróżnicowana i wahała się od 3,0 mm dla pola testowego I do 1,8 mm dla pola testowego II. Wartości mediany i średniej były podobne dla wszystkich współrzędnych XYZ dla wszystkich pól testowych. Kandydat uzyskując niewielkie różnice pomiędzy RMSE i SMAD ($< 0,3$ mm) dowiódł, iż orientacja obrazów została wykonana poprawnie, tak więc proponowana autorska metoda pozycjonowania sensora w przestrzeni zakończyła się dokładnym wyznaczeniem jego pozycji. Wartości maksymalnych

odchylek na punktach kontrolnych były $< 4,3$ mm i 3x niższe od RMSE wyznaczonych tachimetrycznie.

Błędy względne RMSE określone na podstawie wymiarów anteny i odległości między anteną a mierzonym obiektem pozwoliły na stwierdzenie, iż dokładność określenia poziomego środka anteny wyniosła ok 1,4% - 1.5 % w skali do szerokości dla pola testowego I a jej pionowego położenia 0,7% do 1,2% dla pola testowego II.

Kandydat wynikami jednoznacznie wykazał wysoką przydatność praktycznego wykorzystania metody TLS-SfM w orientacji sensorów aktywnych. Dużą zaletą metody jest automatyzacja procesu przetwarzania danych oraz wysoka osiągnięta dokładność orientacji danych przez co produkty przetwarzania danych z sensora mogą być integrowane w systemach GIS.

Oryginalne osiągnięcie projektowe (osiągnięcie naukowe II) – Technologia integracji wielosensorowych danych geoprzestrzennych wykorzystywanych do generowania wysokorozdzielczej dokumentacji architektonicznej (Inkubator innowacyjności 4.0)

W zaprezentowanym osiągnięciu naukowym nr II - zdefiniowanym jako oryginalne osiągnięcie projektowe Kandydat zaprezentował praktyczne wdrożenie metody TLS-SfM a także algorytmów tzw. *hand-crafted* i *learned-based* w pracach przedwdrożeniowych w ramach projektu „Inkubator innowacyjności 4.0. W ramach tego projektu przetestowano autorską metodę TLS-SfM w procesie nadawania orientacji wielo-czasowym i wielo-źródłowym zbiorom chmur punktów pozyskiwanych podczas prac archeologicznych na Zamku Królewskim w Warszawie. Kandydat przetestował możliwości algorytmów *hand-crafted* i *learned-based* w procesie wykrywania punktów wiążących na parach chmur punktów z wykorzystaniem algorytmu SIFT oraz deskryptorów takich jak: *MKDDescriptor*, *Tfeat*, *HardNet*, *HardNet8*, *HyNet* oraz *SoSNet* do opisu wybranych cech z wykorzystaniem metody *detect-then-describe*. Kandydat przetestował też odpowiedniki afiniczne algorytmów w celu wygenerowania większej nadmiarowej ilości punktów wiążących służących poprawy jakości ich równomiernego przestrzennego rozmieszczenia. Kandydat dokonywał analizy wartości liniowego błędu RMSE celem oceny geometrycznej poprawności dopasowania par chmur punktów. W celu oceny dokładności orientacji w obrębie całej chmury punktów badano odległość między parami chmur punktów w oprogramowaniu CloudCompare. Czynnikiem decydującym o poprawności orientacji chmur punktów była także możliwość orientacji chmur punktów TLS pozyskanych z różnych stanowisk.

Kandydat dokonał orientacji chmur punktów TLS przed rozpoczęciem prac archeologicznych, w trakcie ich trwania i po ich oraz integracji danych TLS z dwóch okresów, a także ze zdjęciami naziemnymi.

Kandydat prezentuje w raporcie projektowym różnego typu wyniki analiz dokładności dopasowania do siebie (orientacji) chmur punktów pochodzących z różnych platform pozyskiwania danych. Najlepsze wyniki poprawnie dopasowanych par chmur punktów TLS Kandydat uzyskał stosując deskryptory: *MKDDescriptor*, *HardNet*, *HardNet8* oraz *SoSNet*.

Jedynie one umożliwiły przeprowadzenie orientacji wszystkich par skanów. Kolejno omawiane są analizy dokładności dopasowania chmur punktów w oparciu o mapy odstępstw pomiędzy chmurami punktów (CloudCompare) oraz prezentowane wartości odchyłek na punktach GCP. Rozbieżności czyli odległości pomiędzy punktami na chmurach nie przekracza w zasadzie 1 – 2 cm. Większe odchyłki stwierdzone zostały przez Kandydata w górnych częściach obiektu na Zamku Królewskim w Warszawie. Wynika to nie tylko z jakości wykrywanych punktów wiążących, ale także błędów instrumentu wraz z odległością. Różne osiągane dokładności powodowane były m.in. wpływem różnego rozmieszczenia stanowisk skanera TLS, zastosowaną rozdzielczością skanowania oraz błędami instrumentalnymi. Analizując dokładność łączenia chmur punktów należy analizować fragmenty skanowane pod podobnym kątem i na podobnej odległości.

Kandydat w osiągnięciu nr II dowiódł, iż wykorzystanie metod *learned-based*, w przeciwieństwie do *hand-crafted*, pozwala na generowanie znacznie większej liczby punktów, które mogą być zakwalifikowane jako wiążące. Dodatkowo dokładności dopasowania punktów charakterystycznych były bardzo podobne do tych uzyskiwanych tradycyjną metodą *target-based*. To dzięki detekcji przez algorytm większej ilości punktów można dobrać właściwe równomierne ich rozmieszczenie przez co z kolei można wykrywać wewnętrzną niespójność chmur punktów i eliminować ją poprzez procedurę kalibracji. Wyniki wdrożonego projektu pozwoliły Kandydatowi na sformułowanie zaleceń wyboru detektora SIFT oraz deskryptora MKDDDescriptor (z odpowiednio dobranymi parametrami 32_concat_pcawt_liberty)/SoSNet lub HardNet8 w przypadku chmur punktów pochodzących z jednego sensora oraz detektora SIFT z deskryptorem SoSNet/HyNet (z dobranym parametrem True) dla chmur punktów pochodzących ze zdjęć cyfrowych oraz skanowania TLS. Wykorzystanie algorytmów bazujących na metodzie afinicznej pozwoliło uzyskać większą ilość punktów wiążących, co jednak na skutek większej liczby iteracji przełożyło się na dłuższy czas opracowania. Dalsze zalecenia jakie formułuje Kandydat dotyczą:

- Minimalizacji procesu wyszukiwania punktów charakterystycznych przy wykorzystaniu metod *learned-based* (bez opcji afinizimu) w sytuacji uzyskania zakładanej dokładności opracowania (zależy od rozdzielczości chmury punktów lub zdefiniowania przez odbiorcę projektu);
- W sytuacji niespełnienia ww. założeń trzeba stosować podejście *affine learned-based* wykorzystując do dopasowania chmur punktów elementy orientacji uzyskane z poprzedniego etapu.
- W przypadku niemożności przeprowadzenia orientacji chmur punktów należy wykorzystać metodę ICP (Iterative Closest Point). Jako parametry startowe należy wykorzystać przybliżone elementy RO par chmur punktów uzyskanych przy wykorzystaniu metody *learned-based*.

Kandydat we wnioskach projektowych zauważa iż wykorzystanie metod *learned-based* poprawiło dokładność orientacji w porównaniu z metodą *hand-crafted*, jednak w niektórych

skrajnych przypadkach nie była ona w 100% skuteczna. Należałoby też rozważyć odpowiednio przygotowanie zbioru uczącego i walidacyjnego dedykowanego procesowi orientacji chmur punktów pozyskiwanych z danych wielo-źródłowych (-sensorowych) co może przyczynić się do rozwiązywania problemów orientacji silnie zdeformowanych rastrowych obrazów sferycznych i poprawić jakość a także kompletność dopasowania geodanych.

Recenzent w tym miejscu ma pewien niedosyt co do dokumentacji w postaci załączonego Raportu (Umowa nr 19/2023 zawarta w dniu 14-08-2023) projektu wykonanego w ramach Inkubator przedsiębiorczości 4.0 - gdyż w dokumencie na stronie tytułowej nie zdefiniowano: kto był kierownikiem projektu czy jego głównym Wykonawcą a podano jedynie dwóch wykonawców (jedno nazwisko z oczywistą omyłką drukarską brzmi Jakub Markiewicz a nie Jakub Markiewicz). Brak też daty złożenia raportu oraz szczegółowych informacji w Autoreferacie o procentowym udziale poszczególnych jego autorów więc recenzent przyjmuje deklarację Kandydata, który pisze że był pomysłodawcą, kierownikiem i głównym wykonawcą projektu. W rzeczywistości w raporcie wykorzystywane są praktycznie osiągnięcia i wiedza zdobyta podczas pisania publikacji stanowiących przedłożony cykl co oczywiście dokumentuje wysoki udział autorski Kandydata, który jak wynika z dokumentacji jest też promotorem pomocniczym dysertacji drugiego wykonawcy raportu (Artur Karwel).

Pomimo zawartych w mojej recenzji pewnych uwag, z których część ma oczywiście charakter polemiczny, należy stwierdzić, że w przedłożonych osiągnięciach znalazły się wszystkie elementy niezbędne do pozytywnej ich oceny, a mianowicie: przegląd i prezentacja nowych rozwiązań naukowych, głęboka analiza wyników własnych badań wraz z ich częściową oceną oraz rekomendacje przyszłych uzupełniających badań w tym zakresie rozwijających dyscyplinę naukową Habilitanta. Badania Kandydata uzupełniły pewne luki bądź niejasności i niepewności w zakresie metod orientacji geodanych przestrzennych co stanowi znaczny wkład w rozwój dyscypliny: inżynieria lądowa, geodezja i transport. **Moja ogólna ocena merytoryczna osiągnięć naukowych na tym etapie jest pozytywna.**

W ramach prowadzonych przez Kandydata badań naukowych bezpośrednio przed i po uzyskaniu stopnia naukowego doktora wyniki pozostałych prac powiązanych z osiągnięciem naukowym nr I, tj. metodyką TLS-SfM były publikowane w materiałach konferencyjnych a także w postaci rozdziałów w monografiach naukowych. Dodatkowo prezentowane były na licznych krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych jako referaty głoszone lub prezentacje na sesjach posterowych. W tabeli 13 Autoreferatu Kandydat bardzo szczegółowo zaprezentował 14 najważniejszych wystąpień mających bezpośredni związek z osiągnięciem nr I.

W Autoreferacie, w rozdziale 6. Kandydat przedstawia szereg projektów naukowych, w których wykorzystywał autorską metodykę „TLS-SfM” dla procesu orientacji chmur punktów pochodzących z naziemnego skaningu laserowego oraz IPC (Image Point Cloud – oznaczenie recenzenta). Łącznie zaprezentowano 5 projektów finansowanych zarówno ze środków MNiSW jak również własnych (PW) czy innych źródeł co świadczy o wysokim poziomie sukcesu

wniosków projektowych przygotowywanych przez Kandydata. Godny uwagi jest fakt, iż w przypadku omawianych projektów podawane są także związane z nimi publikacje w czasopismach naukowych, materiałach konferencyjnych i rozdziałach w monografiach. Niezmiernie bogata dokumentacja załączona przez Kandydata do Wniosku świadczy o jego szerokiej współpracy krajowej z ośrodkami muzealnymi jak również międzynarodowej z ośrodkami naukowymi.

Pozostałe kierunki i osiągnięcia naukowo-badawcze

Poza oceną osiągnięć naukowych I oraz II Habilitanta, w Autoreferacie Kandydat przytacza kolejno 7 innych zakresów tematycznych jego badań jakimi były:

1. Analiza możliwości wykorzystania metody SfM w orientacji zdjęć naziemnych, zdjęć wieloczasowych i archiwalnych
2. Rozwijanie i testowanie metod wykorzystywanych do generowania gęstych chmur punktów.
3. Wykorzystanie naziemnego skaningu laserowego w inwentaryzacji i generowaniu dokumentacji architektoniczno-archeologicznej
4. Integracja wieloczasowych i wielosensorowych danych przestrzennych
5. Przygotowanie symulatora zdjęć bazującego na chmurach punktów
6. Współtworzenie bezinwazyjnego system pomiarowego opartego na sensorach fotogrametrycznych i elektromagnetycznych oraz
7. Geodezyjne wsparcie misji archeologicznej w Gruzji

Do każdego przedstawionego zakresu tematycznego badań czy realizacji prac pomiarowych (jak na misji w Gruzji) Kandydat zamieszcza w Autoreferacie łącznie 13 publikacji po 2 artykuły (poza wsparciem misji w Gruzji) oraz po 2 wystąpienia konferencyjne - co dokumentuje jego bardzo duży dorobek naukowy i zdobyte doświadczenie samodzielnego badacza w różnych obszarach nauki poza osiągnięciami I oraz II choć blisko z nimi powiązanymi.

W omawianym zakresie działalności naukowej poza zaprezentowanymi osiągnięciami, Kandydat przedkłada swa działalność w zakresie projektu CENAGIS, tj. przygotowania i realizacji koncepcji budowy laboratorium kalibracji sensorów laserowych i kamer cyfrowych na Politechnice Warszawskiej. Kandydat zaprojektował i zrealizował w ramach projektu pole do kalibracji aktywnych systemów pomiarowych (systemów wykorzystujących skanery laserowe) oraz pole do kalibracji kamer i pasywnych sensorów pomiarowych. Należy uznać wysiłki Kandydata dla realizacji bazy dla przyszłych badań naukowych jednak recenzent zaliczyłby te działania do organizacyjnych a nie badawczych, choć noszą w sobie znaczący pierwiastek innowacyjności.

Ocena współpracy krajowej i międzynarodowej

Kandydat od roku 2103 wykazywał się współpracą o szerokim spektrum projektowo-organizacyjno-publikacyjnym w licznych krajowych instytucjach kultury i nauki w tym: Zamkiem Królewskim w Warszawie, Muzeum Narodowym w Warszawie, Muzeum Króla Jana

III w Wilanowie, Muzeum Archeologiczne w Biskupinie, Instytutem Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk, Instytutem Informatyki na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym (Szkola Nauk Ścisłych Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie), Instytutem Archeologii na Wydziale Historycznym Uniwersytetu Warszawskiego, Katedrą i Zakładem Medycyny Sądowej Wydziału Lekarskiego Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego, STARS Impresariatem Filmowym SA oraz wewnętrzną współpracą z Wydziałem Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

Habilitant wykazuje też w Autoreferacie współpracę z jednostkami zagranicznymi takimi jak: Department of Civil Engineering (Liverpool John Moores University), Digital Technologies in Heritage Conservation (Otto-Friedrich-Universität Bamberg), Forest Resources Management (Institute of Terrestrial Ecosystems, Department of Environmental Systems Science, ETH Zurich) oraz The Krukowski Georgian - Polish Interdisciplinary Research Center (Tbilisi, Gruzja).

Wykazana współpraca miała charakter zarówno organizacyjny w zakresie wspólnych konferencji jak i wystąpień (prezentacji, referatów), organizacji warsztatów, sesji na konferencjach, pracach w Komitetach Konferencyjnych. Są to także bardzo dobre przykłady popularyzacji zagadnień badawczych kandydata i samej Uczelni (Politechnika Warszawska).

Kandydat zalicza też do współpracy swoje godne uznania aktywności związane z udziałem w pracach redakcyjnych czasopism naukowych takich jak:

- Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji,
- Sensors and Machine Learning Applications oraz
- Journal of Modern Technologies for Cultural Heritage Preservation.

Kandydat wymienia też 16 czasopism lub wydawnictw konferencyjnych, dla których wykonał 52 recenzje artykułów naukowych co z pewnością wymagało dużego zaangażowania się w proces recenzenta.

Kandydat był też zaangażowany w prace organizacji i stowarzyszeń krajowych i międzynarodowych w tym: Stowarzyszenia Geodetów Polskich (SGP), Polskiego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji (PTFiT; 2017 – 2021 członek Zarządu), Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology – Poland (CAA Poland), Comité International de la Photogrammétrie Architecturale (CIPA) Heritage Documentation – Icomos a także The International Society for Optics and Photonics (SPIE).

Poza ścisłą działalnością naukową Kandydat wymienia też współpracę z firmami komercyjnymi takimi jak: European Rehabilitation Clinic Sp. z o.o (zlecenie: Integracja modułów programistycznych oraz opracowanie dokumentacji technicznej dla oprogramowania VB_CLINIC w ramach projektu STRATEGMED) oraz STAR Impresariat Filmowy SA (projekty finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju: BIOMETRICS oraz MNEMOSIS).

Ocena aktywności naukowej Kandydata realizowanej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej.

Kandydat uczestniczył w 6 krótkoterminowych wizytach i stażach naukowych i naukowo-dydaktycznych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Fundusze Europejskie oraz środki uniwersytetów zapraszających. Do 1-miesięcznych staży zaliczyć należy pobyty w Liverpool John Moores University w 2019 oraz 2020 roku. W roku 2023 i 2024 uczestniczył w krótkich wymianach kadry w ramach Programu Erasmus+ na Uniwersytecie w Bambergu w Niemczech oraz w na Politechnice w Mediolanie.

Opinia o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.

Pan dr inż. Jakub Markiewicz był silnie zaangażowany w przygotowanie lub modernizację licznych kursów na studiach I i II stopnia na kierunkach Geodezja i Kartografia oraz Geoinformatyka na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej. Samodzielnie przygotował m.in. sylabusy do: Podstaw cyfrowego przetwarzania obrazów oraz Automatyzacji procesów fotogrametrycznych i widzenia maszynowego i współuczestniczył w opracowaniu wielu innych. Pracował też w zespole opracowującym nowy kierunek studiów anglojęzycznych Mobile Mapping and Navigation Systems (projekt NERW PW) w tym kursy: Image recognition and deep machine learning (współprzygotowanie) oraz Computer Vision and 3D data processing. Opracowywał i prowadził kurs Wizyjne techniki skanowania i przetwarzania danych 3D - dla Uczestników Szkoły Doktorskiej Politechniki Warszawskiej.

Łącznie kandydat wykładał na 7 kursach i prowadził 16 różnych ćwiczeń w tym 2 w języku angielskim.

Kandydat był promotorem 11 prac inżynierskich i magisterskich i jest promotorem pomocniczym w dwóch przewodach doktorskich na Politechnice Warszawskiej: mgr inż. Piotra Forsysia z Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej pt. *„Metoda automatycznej rekonstrukcji trójwymiarowej geometrii obiektu dziedzictwa kulturowego na podstawie wielu pomiarów kierunkowych”* oraz mgr inż. Artura Karwela z Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej pt. *„Orientacja wieloczasowych zdjęć lotniczych metodami widzenia maszynowego”*.

Habilitant był zaangażowany w przygotowanie i prowadzenie Międzynarodowych Szkół Letnich z zakresu Geoinformatyki w latach 2022, 2023 oraz 2024, które z pewnością są świetnym przykładem popularyzowania technologii geoinformatycznych jak i samego kierunku studiów i Politechniki Warszawskiej jako Uczelni.

Poza działalnością dydaktyczną ze studentami angażował ich bezpośrednio w badania w zakresie ich prac dyplomowych ale też publikował z nimi wspólnie uzyskane wyniki. W Autoreferacie wymienia aż 9 pozycji opublikowanych prac ze studentami co niewątpliwie ma wysokie znaczenie w obecnym systemie oceny poziomu kształcenia i akredytacji.

Od 2012 roku kandydat pracował w wydziałowych komisjach ds.: Promocji, Programów Kształcenia i Współpracy Międzynarodowej czy też pełnił funkcję pełnomocnika ds. Wdrożenia loga HR Excellence in Research (HRS4R) na wydziale Geodezji i Kartografii PW.

Z 6-cioma krajowymi i zagranicznymi ośrodkami kultury czy nauki Kandydat zainicjalizował i doprowadził do podpisania umów o wzajemnej współpracy. Brał udział i uzyskał certyfikaty kursów z zakresu oprogramowania komercyjnego GIS, CAD, BIM, LiDAR i wielu innych co znacząco podniosło jego warsztat badacza ale też i dydaktyka.

Podsumowanie

Cały dorobek naukowy Pana dr inż. Jakuba Markiewicza bardzo oceniam pozytywnie. Stanowi on **istotny wkład w dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport**. Kandydat jest dojrzałym naukowcem o jasno sprecyzowanych zainteresowaniach naukowych od samego początku swej kariery badawczej i znaczących dokonaniach w swojej dyscyplinie, posiadającym autorski warsztat badawczy i bezsprzecznie rokuje dalszy rozwój naukowy w obszarze krajowym ale też międzynarodowym.

Na podstawie przeprowadzonych przez Kandydata licznych badań zaprezentowanych w przedłożonym spójnym cyklu publikacji oraz dodatkowo osiągnięciu w postaci raportu z projektu wdrożeniowego - można jednoznacznie stwierdzić, iż dokonał on zaimplementowania autorskiej metodyki bazującej na zmodyfikowanym algorytmie SfM dla potrzeb procesu automatycznej orientacji wielo-źródłowych i wielo-czasowych geodanych z aktywnych i pasywnych sensorów. Konkludując, do najistotniejszych elementów osiągnięcia naukowego nazwanego „*Metodyka georeferencji danych z aktywnych i pasywnych sensorów pomiarowych przy wykorzystaniu zmodyfikowanej metody Structure-from-Motion*” można z pewnością zaliczyć:

1. Opracowanie i wdrożenie zautomatyzowanej metody służącej orientacji przetworzonych chmur punktów pozyskiwanych różnymi systemami pomiarowymi.
2. Oprogramowanie rozwiązania jakie można dostosować do konkretnych sensorów i potrzeb.
3. Implementację rozwiązań badania niezawodności sieci geodezyjnych w przetwarzaniu i orientacji chmur punktów TLS oraz dopasowania zdjęć naziemnych.
4. Przygotowanie algorytmu do orientacji lotniczych danych mikrofalowych (SAR) i naziemnych sensorów z platform „aktywnych systemów pomiarowych”.
5. Opracowanie algorytmów do półautomatycznej orientacji skanów archiwalnych zdjęć lotniczych i naziemnych.
6. Przeprowadzenie analizy rozwoju metod *learned-based* i *hand-crafted* w orientacji danych w postaci rastrowej jak i chmur punktów.

Bardzo dużą zaletą autorskiego opracowania metodyki TLS-SfM jest fakt możliwości jej implementacji na zestawach chmur punktów z wartością Intensity lub RGB i osiąganie wysokiej dokładności orientacji co znacząco przyczynia się do dalszego rozwoju dyscypliny naukowej Habilitanta (Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport). Kandydat prezentując swoje osiągnięcie zaproponował uzyskiwanie większych poprawności i poprawę kompletności orientacji chmur punktów i ich przetworzeń z wykorzystaniem algorytmów i metod tzw. *learned-based* sugerując dalsze prace rozwojowe szczególnie w zakresie wykorzystania ML przez kolekcjonowanie nowych zbiorów uczących w odwzorowaniu sferycznym. Wzmocniło by to wg. Kandydata

proces uczenia się sieci neuronowych i w efekcie prowadziło do znacznie większej ilości poprawnie wykrytych punktów wiążących.

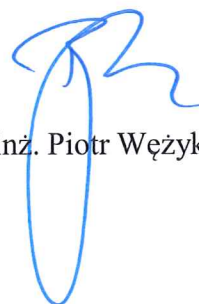
Konkluzja

Stwierdzam, iż **dorobek naukowy i działalność naukowa Pana dr inż. Jakuba Markiewicza stanowi niezmierzenie wartościowy wkład w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.**

Habilitant krok po kroku, konsekwentnie zdobywał doświadczenie w zakresie swoich zainteresowań naukowych dotyczących przede wszystkim analiz dopasowania obrazów cyfrowych i algorytmów związanych z metoda Structure from Motion, ale także fuzji danych wielo-źródłowych pochodzących z pasywnych (np. kamery cyfrowe) czy aktywnych (np. TLS LiADR) sensorów - wzbogacając je o wiedzę zdobytą na stażach w zagranicznych w Uczelniach oraz z szeroko prowadzonej naukowej współpracy krajowej (np. Zamek Królewski w Warszawie) i międzynarodowej.

Jednocześnie Kandydat potwierdził bezsprzecznie dojrzałość w swojej pracy naukowej i zaprezentował gotowość do samodzielnej pracy naukowej i budowania własnych zespołów badawczych.

Na podstawie pozytywnej oceny zarówno osiągnięć naukowych nr I oraz nr II i całego dorobku naukowego Habilitanta, a także uwzględniając jego udokumentowaną pozostałą aktywność zawodową (w tym dydaktyczną i organizacyjną) stwierdzam jednoznacznie, iż **Pan dr inż. Jakub Markiewicz spełnia ustawowe wymogi stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego** (art. 219 ust. 1, pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce), w tym również wymogu związanego z istotnością jego aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej. W związku powyższym stwierdzam, iż **wniosek o nadanie dr inż. Jakubowi Markiewiczowi stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport - za w pełni zasadny, stąd wnoszę o dopuszczenie Kandydata do dalszego procedowania postępowania zgodnie z obowiązującą Ustawą.**


dr hab. inż. Piotr Wężyk, prof. URK