

AUTOREFERAT

**Przedstawiający dorobek i osiągnięcie naukowe, w szczególności
określone w art. 16 ust. 2 Ustawy**

dr inż. Grzegorz Józków

Instytut Geodezji i Geoinformatyki
Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław
grzegorz.jozkow@upwr.edu.pl

Wrocław, 2018

1. Imię i nazwisko

Grzegorz Józków

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- **Stopień naukowy doktora nauk technicznych** w dyscyplinie geodezja i kartografia, specjalność fotogrametria i teledetekcja, nadany 17 listopada 2010 r. przez Radę Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu; praca wyróżniona.

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Doskonalenie metod filtracji danych lotniczego skaningu laserowego.*

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Andrzej Borkowski, prof. nadzw.

Recenzenci rozprawy doktorskiej:

- 1) prof. dr hab. inż. Aleksandra Bujakiewicz (Politechnika Warszawska)
- 2) dr hab. inż. Jarosław Bosy, prof. nadzw. (Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu)

- **Tytuł zawodowy magister inżynier** w zakresie geodezji i kartografii, specjalność geodezja gospodarcza i gospodarka nieruchomościami, nadany 8 lipca 2003 r. przez Radę Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej we Wrocławiu; studia ukończone z wynikiem bardzo dobrym z wyróżnieniem.

Tytuł pracy magisterskiej: *Analiza porównawcza treści zdjęć lotniczych i cyfrowych lotniczych obrazów video w podczwierzeni z powodzi w roku 1997 na wybranym odcinku rzeki Odry.*

Promotor pracy magisterskiej: dr hab. inż. Andrzej Świątkiewicz, prof. nadzw.

- **Tytuł zawodowy inżynier** w zakresie geodezji i kartografii nadany 8 lutego 2001 r. przez Radę Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej we Wrocławiu; studia ukończone z wynikiem bardzo dobrym.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu:

- od 01.03.2006 r. do 05.10.2011 r. na stanowisku asystenta,
- od 06.10.2011 r. na stanowisku adiunkta.

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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Rozprawę habilitacyjną pt.: „**Skaning laserowy – akwizycja i kompresja danych**” stanowi cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie.

Przedstawiony poniżej cykl publikacji dotyczy szczegółowych zagadnień w zakresie pozyskiwania danych skaningu laserowego i stanowi osiągnięcie naukowe wynikające 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. Wspólnym mianownikiem przedstawionego cyklu publikacji są skanery laserowe. Przedstawione badania dotyczą efektywnych metod kompresji danych skaningu na poziomie sensora oraz pozyskiwania danych skaningu z wykorzystaniem niskokosztowych skanerów liniowych emitujących wiele wiązek laserowych. W szczególności badania dotyczące kompresji skupiają się na kompresji danych FW (*full-waveform*) skaningu lotniczego oraz kompresji danych skaningu naziemnego bez rejestracji danych FW. Badania dotyczące pozyskiwania danych skaningu skupiają się w szczególności na wykorzystaniu niskokosztowych skanerów laserowych do celów pomiarowych w sposób kinematyczny, kiedy skaner laserowy jest w ruchu (montaż na bezzałogowych statkach powietrznych).

b) Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

1. Toth, C., **Józków, G.**, 2016. Remote sensing platforms and sensors: A survey. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 22-36.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004> (pkt. 45, IF=6.387), udział 45%.
2. **Józków, G.**, Toth, C., Quirk, M., Grejner-Brzezinska, D., 2015. Compression strategies for LiDAR waveform cube. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 99, 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.10.003> (pkt. 45, IF=4.188), udział 60%.
3. **Józków, G.**, Toth, C., Quirk, M., Grejner-Brzezinska, D., 2015. Study on sensor level LiDAR waveform data compression using JPEG-2000 standard multi-component transform. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 2015(3), 201-213.
<https://doi.org/10.1127/pfg/2015/0265> (pkt. 15, IF=0.554), udział 55%.
4. **Józków, G.**, 2017. Terrestrial Laser Scanning Data Compression Using JPEG-2000. PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 85(5), 293-305.
<https://doi.org/10.1007/s41064-017-0027-y> (pkt. 15, IF=1.085), udział 100%.
5. Toth, C., **Jozkow, G.**, Grejner-Brzezinska, D., 2015. Mapping with small UAS: A point cloud accuracy assessment. Journal of Applied Geodesy, 9(4), 213-226.
<https://doi.org/10.1515/jag-2015-0017> (pkt. 15), udział 45%.
6. **Jozkow, G.**, Toth, C., Grejner-Brzezinska, D., 2016. UAS topographic mapping with velodyne LiDAR sensor. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-1, 201-208. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-1-201-2016> (pkt. 15), udział 70%.

7. **Jozkow, G.**, Wieczorek, P., Karpina, M., Walicka, A., Borkowski, A., 2017. Performance Evaluation of sUAS Equipped with Velodyne HDL-32E LiDAR Sensor. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W6, 171-177. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-171-2017> (pkt. 15), udział 70%.

Cztery publikacje opublikowane zostały w czasopiśmie znajdujących się w bazie JCR (*Journal Citation Report*) i na liście A MNiSW; w nawiasie podano liczbę punktów wg MNiSW oraz *Impact Factor* wg JCR na rok opublikowania. Pozostałe trzy publikacje indeksowane są w bazie WoS (*Web of Science*) z czego jedna jest publikacją w czasopiśmie naukowym, a dwie pozostałe są recenzowanymi publikacjami konferencyjnymi; w nawiasie podano liczbę punktów wg MNiSW na rok publikacji. Łączna liczba punktów MNiSW za publikacje stanowiące cykl wynosi 165, a sumaryczny *Impact Factor* jest równy 12.214. Szczegółowy opis wkładu wnioskodawcy w przygotowanie poszczególnych publikacji przedstawiono w załączniku nr 3, część I B).

c) Omówienie celu naukowego prac stanowiących osiągnięcie naukowe i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wprowadzenie

Skaning laserowy jest techniką teledetekcyjną i wykorzystywany jest przede wszystkim do pozyskiwania informacji o geometrii obiektów. W tym zakresie wyróżnić można dwa typowe zastosowania: topograficzne (Shan & Toth, 2008) i nietopograficzne (Son et al., 2002). Obecnie granica pomiędzy teledetekcją, nawigacją i pozycjonowaniem coraz bardziej się zaciera [1] powodując, że skanery laserowe integrowane są z innymi sensorami w celu lokalizacji, nawigacji, czy śledzenia ruchomych obiektów (Bachrach et al., 2009; Yun et al., 2013; Gao et al., 2015; Li et al., 2014; Premebida et al., 2007). W rozwoju technologii skaningu laserowego można wyróżnić dwa główne wątki. Pierwszy związany jest z metodami przetwarzania obserwacji i danych, natomiast drugi dotyczy sensorów. Nowe metody przetwarzania przyczyniają się do zwiększenia wiarygodności pozyskiwanych informacji (Hu et al., 2014; Glira et al., 2016) i nowych zastosowań skaningu laserowego (Toth et al., 2016). W zakresie rozwoju sensorów można natomiast wyróżnić dwa trendy. Pierwszy z nich dotyczy tworzenia nowych sensorów skierowanych do konkretnych typów odbiorców. Tworzone są zarówno sensory profesjonalne, w tym detektory zdolne wykrywać pojedyncze fotony (Natarajan et al., 2012), ale także niewielkie skanery fazowe lub impulsowe (np. Hokuyo UTM-30LX, Velodyne VLP-16) przeznaczone do mniej specjalistycznych zastosowań, np. związanych z autonomiczną nawigacją, oraz proste skanery triangulacyjne dedykowane amatorom i nie przeznaczone do celów pomiarowych (np. Kinect). Drugi trend związany z rozwojem technologicznym sensorów obejmuje zarówno profesjonalne jak i konsumenckie skanery i dotyczy wykorzystania wielu wiązek laserowych o różnej (Bo et al., 2011) lub jednakowej (Glennie & Lichti, 2010) długości fali. Wiele wiązek laserowych o jednakowej długości fali (nawet 128 w Velodyne VLS-128) stosowanych jest coraz częściej w niskokosztowych skanerach. Zatem rozwój technologiczny tego typu skanerów powoduje coraz większą ilość pozyskiwanych danych oraz poszerza zakres zastosowania skaningu laserowego o obszary, gdzie profesjonalne skanery ze względu na koszty nie były stosowane.

W odróżnieniu od profesjonalnych pomiarowych skanerów triangulacyjnych (Eder et al., 2013), konsumenckie skanery tego typu służyły początkowo zabawie, a w szczególności

detekcji ruchu w celu sterowania grami (Lange et al., 2011). Jednak ze względu na ich powszechność i niską cenę, zaczęto je wykorzystywać w innych celach, w tym pomiarowych, gdzie dokładność geometryczna nie była priorytetem. Ponieważ zasięg tego typu skanerów jest ograniczony, wykorzystano je głównie wewnątrz pomieszczeń. Przykładem badań nad nietypowym zastosowaniem tego typu skanerów jest odtwarzanie geometrii wnętrz (tworzenie chmur punktów) (Henry et al., 2014) lub nawigacja (Correa et al., 2012), a także jednoczesna nawigacja i mapowanie SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) (Oliver et al., 2012). Skanery te mogą być wykorzystywane samodzielnie (Li et al., 2013), a także w połączeniu z jedną lub kilkoma kamerami RGB. Kamery te dostarczają nie tylko informacji o składowych kolorów RGB, ale pozyskane przez nie dane mogą być integrowane z danymi pochodzącymi ze skanera triangulacyjnego w celu pozyskania bardziej wiarygodnych danych geometrycznych (Józków et al., 2014). Prowadzone są również eksperymenty z wykorzystaniem tych skanerów na dronach typu wielowirnikowiec. Większość z nich dotyczy wspomagania autonomicznej nawigacji wewnątrz pomieszczeń z wykorzystaniem SLAM (Bachrach et al., 2009). Bardzo rzadko skanery te wykorzystywane są do pozyskiwania danych wyłącznie w celach pomiarowych, szczególnie na zewnątrz pomieszczeń. Powodem tego jest niska dokładność wyznaczenia dłuższych odległości (ponad kilka metrów) przez skanery triangulacyjne o krótkiej bazie (odległość pomiędzy emiterym a detektorem zazwyczaj nie jest dłuższa niż kilka decymetrów). Dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów do celów pomiarowych powinna być większa niż ta, która jest akceptowana w celach nawigacyjnych, szczególnie jeśli nawigacja wspierana jest również danymi pochodzącymi z innych sensorów, np. inercyjnych.

Dużo lepszą dokładność pomiaru większych odległości umożliwiają skanery fazowe i impulsowe. Skanery tego typu można odnaleźć w grupie skanerów półprofesjonalnych, np. Hokuyo UTM-30LX, Velodyne VLP-16, ibeo ScaLa B3.0, SICK LMS100. Głównym obszarem ich wykorzystania jest detekcja obiektów (Xavier et al., 2005; Halterman & Bruch, 2010), gdzie dokładność pomiaru odległości i kierunku do tych obiektów ma zazwyczaj mniejsze znaczenie. Detekcja obiektów może być wykorzystywana w pojazdach w celu ostrzegania o kolizjach z innymi obiektami (MacLachlan & Mertz, 2006) i zapobiegania takimi kolizjom (Mukhtar et al., 2015). W tego typu zastosowaniach skanery laserowe mają przewagę nad systemami bazującymi na kamerach ze względu na szybkość uzyskiwanych informacji, co ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa ruchu tych pojazdów, szczególnie wtedy, gdy uczestnikami tego ruchu są również ludzie. Ze względu na niewielkie rozmiary i wagę oraz stosunkowo niską cenę w porównaniu do skanerów profesjonalnych, podjęto badania nad wykorzystaniem tych skanerów w mapowaniu mobilnym (*Mobile Mapping*) z wykorzystaniem niewielkich platform, w tym bezzałogowych systemów latających (Roca et al., 2014; Tulldahl & Larsson, 2014) oraz systemów plecakowych (Hauser et al., 2016). Głównym problemem, szczególnie dla systemów latających stała się jednak nie dokładność lub zasięg laserowego pomiaru odległości, a rekonstrukcja trajektorii niezbędna do georeferencji chmury punktów skaningu kinematycznego. Systemy nawigacyjne oparte o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) i INS (*Inertial Navigation System*) wykorzystywane na platformach załogowych nie mogły być bezpośrednio adaptowane, głównie ze względu na rozmiar i masę sensorów nawigacyjnych. Oczywiście postęp technologiczny dotyczy również sensorów tego typu. W skutek czego powstały niewielkie odbiorniki GNSS typu OEM klasy geodezyjnej, które mogą być montowane nawet na stosunkowo niewielkich BSP (Bezzałogowy Statek Powietrzny) o napędzie elektrycznym, w tym płatowcach (Rehak & Skaloud, 2017), które zazwyczaj mają mniejszy udźwig niż wielowirnikowce. W przypadku sensorów inercyjnych, klasyfikacja wydajności IMU (*Inertial Measurement*

Unit) nie jest ściśle ustalona, ale można wyróżnić kilka klas: okrętowa (*marine*), lotnicza (*aviation*) nazywana często też nawigacyjną (*navigation*), pośrednia (*intermediate*), taktyczna (*tactical*) i konsumencka (*consumer*) (Groves, 2015). Klasa IMU ustalana jest w zależności od wielkości dryfu pozycji wyznaczonej w określonym przedziale czasu wyłącznie z obserwacji inercyjnych. Większość lotniczych systemów skaningu laserowego opartych na platformach załogowych wykorzystuje IMU klasy taktycznej (Lichti & Sakaloud, 2010). Ze względu na zastosowane technologie budowy żyroskopów (np. laserowe, optyczne) i akcelerometrów (np. *pendular*), miniaturyzacja osiągnęła w praktyce swoje granice, dlatego typowe IMU klasy taktycznej nie mogły być zamontowane na niewielkich BSP. Zmianę tego stanu przyniosła technologia MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), w której zaczęto wytwarzać IMU. Dzięki temu możliwa była znaczna miniaturyzacja sensorów inercyjnych. Jednak początkowo IMU wytwarzane w technologii MEMS charakteryzowały się dużo większym dryfem i szumem niż sensory wykorzystywane na platformach załogowych (El Sheimy, 2009). Kilka lat temu na rynku pojawiły się MEMS IMU klasy taktycznej, które potencjalnie mogą być wykorzystywane w celu georeferencji bezpośredniej danych skaningu pozyskiwanych z wykorzystaniem małych BSP. W praktyce jednak wiele z nich nie zapewniało odpowiedniej jakości danych inercyjnych [6]. Obecnie na rynku dostępne są już systemy nawigacyjne dedykowane georeferencji bezpośredniej BSL, w których IMU wytwarzane są w technologii MEMS (np. Applanix APX-15 UAV). Jednak w literaturze naukowej niewiele jest informacji na temat ich faktycznej dokładności i wpływu na jakość georeferencji punktów skaningu laserowego wykonywanego z wykorzystaniem BSL. W kontekście pozyskiwania danych skaningu z niskiego pułapu należy wspomnieć o ciężkich wielowirnikowcach (>10 kg) (Mandlbürger et al., 2015) oraz samolotach i helikopterach (Nagai et al., 2009) o napędzie spalinowym, które mają stosunkowo duży udźwig i mogą być wyposażone w cięższe, przez co często również dokładniejsze sensory nawigacyjne oraz skanery o większej wydajności. Oczywiście BSP tego typu są dużo droższe, a ich obsługa wymaga lepszego przygotowania i często większego doświadczenia operatorów. Podobnie skanery i sensory nawigacyjne o większej dokładności czy wydajności są dużo bardziej kosztowne niż te przewidziane dla tańszych BSL.

Zarówno skanery profesjonalne jak i wyposażone w wiele diod skanery konsumenckie (np. Velodyne HDL-32E) są obecnie w stanie dostarczyć bardzo dużo informacji w stosunkowo krótkim czasie. Granica jednego miliona punktów pozyskiwanych w ciągu jednej sekundy została znacznie przekroczona dla obu wspomnianych typów skanerów (np. Leica RTC360 3D, Velodyne VLS-128). Poza korzyściami płynącymi z większej liczby informacji, duża liczba pozyskanych punktów stanowi pewne niedogodności. Są nimi głównie problemy związane z przetwarzaniem danych, ale również z ich dystrybucją, szczególnie przez Internet, a także archiwizacją. Wydaje się, że mimo równoczesnego rozwoju technologii informatycznych (oprogramowanie, sprzęt), ich postęp nie jest tak szybki, by problemy powstające wskutek rosnącej ilości danych skaningu mogły być całkowicie wyeliminowane. Z tego powodu należy szukać innych rozwiązań.

Powszechnym sposobem stosowanym w przetwarzaniu dużych ilości danych skaningu jest ich redukcja (Błaszczak-Bąk et al., 2018), gdzie zastosowana metoda redukcji zależy od celu, np. budowy Numerycznego Modelu Terenu (Pradhan et al., 2005). Te same dane mogą być jednak potencjalnie wykorzystane w innym celu, dla którego zastosowana metoda redukcji będzie nieodpowiednia. Z tego powodu, jak również w celach dystrybucji i archiwizacji danych, postanowiono opracować algorytmy kompresji danych skaningu. W większości implementacji, kompresji podlegają chmury punktów zapisane w plikach według standardowych formatów służących wymianie danych skaningu. Kompresowane

są dane zapisane zarówno w formatach otwartych np. LAS – kompresja LASzip (Isenburg, 2013), LASCompression (Mongus & Žalik, 2011) jak i komercyjnych (LizardTech, 2017). Mimo, że kompresja tego typu jest powszechnie stosowana, ma ona pewne ograniczenia. Przede wszystkim kompresji poddawane są dane mocno przetworzone, czyli najczęściej punkty posiadające współrzędne wyrażone w określonym układzie. Poza tym stosowanie powszechnie wykorzystywanej kompresji bezstratnej wydaje się nie być konieczne ponieważ kompresowane dane obarczone są szumem pomiarowym więc w pewnym stopniu są już zniekształcone. Dlatego stosowanie kompresji stratnej dla tego typu danych jest uzasadnione jeśli zniekształcenie danych spowodowane taką kompresją będzie poniżej szumu pomiarowego [2]. Należy zauważyć, że kompresja stratna charakteryzuje się zazwyczaj dużo większym stopniem kompresji niż kompresja bezstratna. Mówiąc o kompresji stratnej trzeba wyjaśnić, że stratność nie oznacza utraty części danych (w takim przypadku lepszym terminem od kompresji jest redukcja danych), a jedynie ich zniekształcenie spowodowane kompresją, gdzie stopień zniekształcenia wzrasta wraz ze wzrostem kompresji. Tym samym w wyniku dekompresji danych skompresowanych w sposób stratny ilość danych będzie taka sama jak przed kompresją, a jedynie informacja zawarta w tych danych może się zmienić w stosunku do oryginalnej. Ostatnim mankamentem stosowania popularnych metod kompresji danych skaningu jest niedostateczne wykorzystanie ich wzajemnej korelacji, w tym przestrzennej. Im bardziej dane są skorelowane tym można je skompresować w większym stopniu. Oczywiście wiele stosowanych metod kompresji w pewnym stopniu odnajduje korelację przestrzenną, np. sąsiednie punkty mają podobne współrzędne, jednak ta informacja wykorzystywana jest często jednowymiarowo i każdy atrybut punktów kompresowany jest oddzielnie, jak np. w LASzip (Isenburg, 2013). Dlatego lepszym rozwiązaniem wydaje się wykorzystanie pełnej korelacji przestrzennej danych, a wzajemne położenie danych w przestrzeni nie musi być opisane współrzędnymi. Ponieważ dane skaningu pozyskiwane są w zorganizowany sposób, można utworzyć z nich regularne struktury nie tylko jednowymiarowe (Laky et al., 2010), ale dwuwymiarowe podobne do obrazów rastrowych [4] i trójwymiarowe [2, 3]. Oczywiście pod pojęciem danych skaningu rozumie się zazwyczaj chmurę punktów, ale mogą to być również dane obserwacyjne (np. odległości, *waveform*), które można przetworzyć do postaci chmury punktów. Podczas takiego przetworzenia może zaistnieć potrzeba wykorzystania dodatkowych informacji, np. trajektorii platformy (skanera), jednak te dodatkowe dane nie wymagają dużej przestrzeni pamięci dyskowej stąd ich kompresja nie jest zazwyczaj konieczna. Najbardziej odpowiednim momentem kompresji nieprzetworzonych danych skaningu wydaje się być moment ich pozyskania (na poziomie sensora). Dzięki temu nieprzetworzone dane mogłyby być w dużo łatwiejszy sposób archiwizowane i dystrybuowane. W tym celu wymagane są wydajne algorytmy kompresji zapewniające duży stopień kompresji ale nie zniekształcające danych w sposób znaczący oraz potrafiące wykonać kompresję dużych ilości danych w krótkim czasie, a najlepiej w czasie rzeczywistym. Dzięki temu dane obserwacyjne mogłyby być archiwizowane na mniejszych przestrzeniach pamięci dyskowej. Obecnie ze względu na ilość pozyskiwanych danych, dane obserwacyjne zazwyczaj nie są archiwizowane. Archiwizacja dużych ilości danych obserwacyjnych może być jednak uzasadniona. Przykładowo dane ze skanerów laserowych montowanych w niektórych seryjnie już produkowanych samochodach (np. Audi A8 D5) opracowywane są w czasie rzeczywistym, gdyż poza sterowaniem pojazdem nie są one wykorzystywane w innych celach. Jednak dane te mogłyby być później przeanalizowane w celu udoskonalenia algorytmów sterowania pojazdem w sytuacjach niebezpiecznych, które jak pokazuje wiele wypadków z udziałem takich pojazdów, wciąż są dalekie od doskonałości. Pierwszym krokiem musi tu być jednak archiwizacja danych skaningu.

Cel

Celem cyklu publikacji powiązanych tematycznie i stanowiących osiągnięcie naukowe jest zaproponowanie sposobów zwiększenie efektywności pozyskiwania dużych ilości danych skaningu laserowego. Cele szczegółowe dotyczą:

- opracowania szybkiej metody kompresji danych skaningu na poziomie sensora wykorzystującej Standard JPEG-2000,
- intensyfikacji stopnia kompresji poprzez optymalny sposób dekorelacji danych,
- analizy wpływu kompresji stratnej na zniekształcenie danych skaningu laserowego,
- wykorzystania szybkich skanerów niskobudżetowych,
- analizy jakości danych pochodzących z sensorów nawigacyjnych i ich wpływu na jakość danych skaningu pozyskanych z wykorzystaniem platform BSL.

Efekty tych prac zostały opublikowane w recenzowanych artykułach dotyczących fotogrametrii i teledetekcji, w tym w czasopismach znajdujących się na liście JCR. Większość z tych publikacji powstała w międzynarodowych zespołach badawczych w ramach realizacji projektów badawczych.

Omówienie wyników

Publikacja [1] jest przeglądem aktualnego stanu technologicznego sensorów oraz platform stosowanych w fotogrametrii i teledetekcji a także określa trendy ich rozwoju. Publikacja ta stanowi wstęp do cyklu jako motywacja podjętych badań.

W odniesieniu do osiągnięcia naukowego, stwierdzono tutaj, że wraz z rozwojem sensorów w coraz krótszym czasie gromadzonych jest coraz więcej danych, gdzie największym problemem staje się szybki dostęp do danych pozyskiwanych przez sensor. Stanowiło to argumentację do podjęcia badań związanych z kompresją danych na poziomie sensora.

W części dotyczącej skanerów laserowych zauważono natomiast, że jednym z wyraźnie zarysowanych trendów ich rozwoju jest budowa niewielkich skanerów o wielu wiązkach laserowych (np. Velodyne HDL-32E). Z tego powodu, kolejnym aspektem podjętych badań własnych jest wykorzystanie tych skanerów w celu pozyskiwania danych pomiarowych.

Omawiana publikacja wiele miejsca poświęca teledetekcji wykonywanej z wykorzystaniem BSL. Tworząc systematykę wykorzystywanych w teledetekcji platform zdecydowano się wyróżnić BSP jako osobną, pełnoprawną kategorię platform na równi z satelitami czy załogowymi statkami powietrznymi. Zauważono również, że dominującymi sensorami teledetekcyjnymi wykorzystywanymi w BSL są kamery RGB, natomiast systemy wykorzystujące skanery laserowe są dopiero w fazie rozwoju. Jeden z takich systemów wykorzystujący niskokosztowy skaner laserowy stworzony został przez autorów w osobnym projekcie. W tworzeniu tego systemu mam swój istotny udział, od fazy koncepcyjnej do implementacji.

Poza omówieniem aktualnego stanu i trendów rozwoju platform i sensorów teledetekcyjnych, przeanalizowano również stosowane podejścia do ich georeferencji. Zauważono tu, że coraz większe znaczenie mają sensory wykorzystywane głównie do nawigacji, gdzie na pierwszy plan wychodzą sensory inercyjne. Produkowane IMU są coraz bardziej dokładne, a niewielkie IMU tworzone w technologii MEMS osiągają dokładność klasy taktycznej co potencjalnie może być wykorzystane do georeferencji bezpośredniej BSL, również w odniesieniu do danych skaningu laserowego. Faktyczną

wydajność tego typu IMU w georeferencji danych skaningu BSL omówiono w innych publikacjach włączonych do cyklu.

Publikacja [2] dotyczy kompresji danych FW z wykorzystaniem metod 2D stosowanych do kompresji obrazów. We wcześniejszych badaniach dotyczących kompresji danych FW, każdy rekord danych reprezentujący pojedynczy kształt fali (*waveform*) kompresowany był oddzielnie, stąd była to kompresja jednowymiarowa. W omawianej publikacji zauważono, że ze względu na regularność w sposobie pozyskiwania danych FW (np. z wykorzystaniem skanerów wyposażonych w wirujący wielobok o zwierciadlanych płaszczyznach) można dane te zapisać w regularnej strukturze 3D tzw. *waveform cube*. Struktura ta, mimo że nie jest metryczna, zachowuje jednak przestrzenny porządek pomiędzy poszczególnymi *waveform* – sąsiedztwo w *waveform cube* jest identyczne z tym w przestrzeni. Działanie takie pozwoliło na wykorzystanie, poza korelacją czasową *waveform* (jak podczas kompresji 1D), również korelacji przestrzennej, a dzięki temu zwiększenie stopnia kompresji, gdyż lepsza dekorelacja danych przed kompresją pozwala na uzyskanie większego stopnia kompresji.

Dane 2D ze struktury 3D (*waveform cube*) powstały jako zbiór obrazów powstałych poprzez przecięcie *waveform cube* równoległymi płaszczyznami. Sprawdzono efektywność kompresji dla trzech przypadków – kierunki cięcia były równoległe do trzech różnych ścian *waveform cube* mających wspólny wierzchołek.

W omawianej pracy badano tylko metody kompresji stratnej, ponieważ dane FW obarczone są szumem pomiarowym, stąd perfekcyjna ich rekonstrukcja (dekompresja) nie jest konieczna jeśli stopień zniekształcenia danych po dekompresji będzie poniżej poziomu szumu. Przebadano kilka metod kompresji stratnej 2D, w tym: standardy JPEG i JPEG-2000 stosowane do kompresji rastrów, w tym również do danych teledetekcyjnych (np. obrazów satelitarnych) – zbadano dwie implementacje standardu JPEG-2000, dwa autorskie algorytmy kompresji oparte o PCA (*Principal Component Analysis*) polegające na eliminacji główny składowych o najmniejszej wariancji (zawierające najmniej informacji).

Celem podjętych badań było zbadanie efektywności poszczególnych metod kompresji pod kątem stopnia kompresji, dla którego zniekształcenie danych po dekompresji oceniane poprzez SNR (*Signal to Noise Ratio*) jest akceptowalne, jak również sprawdzono kształt *waveform* po dekompresji. Dokonano również porównania z metodami kompresji bezstratnej pod kątem stopnia kompresji i jej szybkości.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że najefektywniejszą z badanych metod kompresji stratnej jest ta oparta o standard JPEG-2000. Pozwala ona na uzyskanie wysokiego stopnia kompresji z zachowaniem niewielkiego zniekształcenia danych, nie wpływającego istotnie na kształt *waveform*. Poza tym, kompresja ta okazała się również znacznie szybsza od bezstratnych metod kompresji pozwalając na kompresję danych *waveform* w czasie rzeczywistym. Ponadto stwierdzono, że optymalny kierunek tworzenia obrazów z *waveform cube* jest zgodny z kierunkiem pozyskiwania danych, stąd kompresja ta może być realizowana na poziomie sensora podczas pozyskiwania danych.

Publikacja [3] stanowi kontynuację badań nad kompresją danych FW. W szczególności badania dotyczyły dwóch aspektów. Pierwszym z nich było wykorzystanie standardu JPEG-2000, w jego drugiej części dotyczącej transformacji wielokomponentowej (*Multi-Component Transform*) pozwalającej na kompresję danych 3D bez konieczności wydzielania obrazów z *waveform cube*. Drugim była natomiast dodatkowa dekorelacja danych przed kompresją JPEG-2000.

Ponieważ wcześniejsze badania [2] wykazały bardzo dużą wydajność standardu JPEG-2000 (w jego pierwszej części), w pracy tej postanowiono zbadać możliwość intensyfikacji stopnia kompresji JPEG-2000 poprzez wykorzystanie korelacji danych FW w trzech wymiarach (wzdłuż *waveform* – korelacja czasowa, wzdłuż linii skanowania oraz pomiędzy tymi liniami – korelacja przestrzenna). Było to możliwe dzięki rozszerzeniom standardu JPEG-2000 zawartym w jego drugiej części pozwalającym wykonać dekorelację obrazów składających się z wielu kanałów (komponentów). W najprostszym podejściu dekorelacja ta polega na zastosowaniu jednowymiarowej transformacji dekorelującej, np. falkowej DWT (*Discrete Wavelet Transform*), na każdym pikselu obrazu wielokomponentowego wzdłuż trzeciego wymiaru, a następnie wykonaniu dekorelacji poszczególnych komponentów tego obrazu.

W publikacji tej postanowiono również zbadać czy wykorzystując inne niż zastosowane w standardzie JPEG-2000 transformacje dekorelujące można zwiększyć stopień kompresji danych FW nie zwiększając ich zniekształcenia (rozpatrywany był tylko schemat stratnej kompresji JPEG-2000). W szczególności zbadano dwie transformacje: KLT (*Karhunen-Loève-Transformation*) oraz DWT, obie poprzedzone normalizacją danych. Należy zaznaczyć, że obie te transformacje są transformacjami dwuwymiarowymi, stąd *waveform cube* wymagał wcześniejszego rozwinięcia w obraz dwuwymiarowy. Zaproponowano by wierszami takiego obrazu były kolejne próbki poszczególnych *waveform*, a kolumnami kolejne *waveform*. Ponadto, należy zaznaczyć, że mimo wykorzystania tej samej co w standardzie JPEG-2000 falki CDF 5/3, dodatkowa dekorelująca transformacja DWT nie była identyczna z tą zastosowaną podczas właściwej kompresji JPEG-2000 ze względu na rozwinięcie *waveform cube* do jednego obrazu.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono, że dla identycznego stopnia kompresji, zastosowanie stratnej kompresji 3D pozwoliło na nieznaczne zmniejszenie zniekształcenia danych w stosunku do badanej wcześniej kompresji 2D, chociaż kompresja 3D była istotnie wolniejsza od kompresji 2D. Największą jednak zaletą kompresji 3D jest jej większa elastyczność, gdyż można dowolnie sterować stopniem kompresji uzyskując dla niewielkich stopni kompresji niemal brak zniekształcenia. W przypadku kompresji 2D zakres ten był znacznie ograniczony i pewne zniekształcenie, mimo że akceptowalne, pojawiało się zawsze. Zastosowanie transformacji KLT również przyniosło nieznaczne zmniejszenie zniekształcenia danych FW w stosunku do kompresji bez tej transformacji, szczególnie dla dużych stopni kompresji. Jednakże wykorzystanie tej transformacji jest obliczeniowo kosztowne, co obniża jej atrakcyjność w aspekcie zastosowań praktycznych. Ze względu na zastosowanie liniowego kwantyzatora danych po wykonaniu dekorelacji z zastosowaniem DWT, transformacja ta spowodowała zwiększenie dystorsji w stosunku do transformacji 3D bez dodatkowej dekorelacji danych. Mimo spadku szybkości kompresji 3D w stosunku do kompresji 2D, nie należy jej eliminować z zastosowania, gdyż posiada większą dynamikę. Pozwala to na wybranie optymalnego sposobu kompresji w zależności od zastosowania. Ponadto wykorzystanie jednego standardu (JPEG-2000) pozwala na zastosowanie tych samych narzędzi (oprogramowania) dla obu wariantów kompresji w zależności od mocy obliczeniowej dostępnej na poziomie sensora.

Publikacja [4] dotyczy również kompresji danych skaningu na poziomie sensora z wykorzystaniem standardu JPEG-2000. W odróżnieniu od poprzednich publikacji, tutaj zajęto się problemem kompresji danych pozyskanych naziemnym skanerem laserowym nie zapisującym danych FW. Ze względu na zorganizowany sposób pozyskiwania danych naziemnym skanerem laserowym zauważono, że nie ma konieczności zapisu współrzędnych kartezjańskich, gdyż odtworzyć je można na podstawie odległości oraz

znajomości kilku wartości zapisywanych jako metadane [4]. Zaproponowano zatem, by dane pozyskiwane przez skaner zapisywać w postaci kilkukomponentowego rastra zawierającego odległość, intensywność odbicia oraz opcjonalnie trzy komponenty kolorów w przypadku gdy wykonywane są zdjęcia RGB i kolorowanie punktów odbywa się w ramach oprogramowania skanera. Przeanalizowano w kilku wariantach efektywność kompresji stratnej i bezstratnej wykorzystującej standard JPEG-2000. Warianty kompresji różniły się liczbą kompresowanych jednocześnie komponentów utworzonego rastra. Wykonano testy kompresji każdego komponentu osobno oraz jednoczesnej kompresji kilku komponentów rastra z wykorzystaniem transformacji wielokomponentowej.

W pierwszym etapie badań określono jak silnej kompresji stratnej można użyć by zadane, akceptowalne progi zniekształcenia danych nie były przekroczone. Testy wykonano dla trzech wariantów tworzenia rastrów z danymi: wszystkie komponenty zawarte w jednym rastrze, komponent zawierający odległości stanowił osobny raster, osobne rastry dla odległości, intensywności oraz danych RGB. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów ustalono, że trzeci sposób tworzenia rastrów pozwala na największy stopień kompresji. Dzięki temu po skompresowaniu informację o odległości, intensywności oraz kolorach RGB dla jednego piksela można zapisać wykorzystując średnio około 32 bity pamięci.

Kolejna część badań dotyczyła analizy wielkości danych skaningu naziemnego zapisanych w różnych formatach, w tym powszechnie stosowanym formacie skompresowanym LAZ oraz plikach powstałych w wyniku stratnej oraz bezstratnej kompresji JPEG-2000 według zaproponowanego w tej pracy algorytmu. Oba warianty kompresji JPEG-2000 zapewniły najlepszy stopień kompresji, a różnica na korzyść kompresji bezstratnej była niewielka i wynikała z przyjęcia bardzo rygorystycznych progów akceptowalnego zniekształcenia danych.

W ostatniej części pracy zbadano szybkość kompresji danych do danego formatu oraz ich dekompresji do formatu wyjściowego. Eksperymenty przeprowadzono dla czterech formatów. Pod względem szybkości kompresji oraz dekompresji danych zaproponowany algorytm również okazał się najlepszy, z tym że schemat stratny JPEG-2000 w obu zadaniach (kompresji oraz dekompresji) był z reguły nieco wolniejszy od schematu bezstratnego. Zaproponowany algorytm pozwolił w ciągu jednej sekundy skompresować dane skaningu naziemnego dla ponad sześciu milionów punktów. Zatem jest on wystarczająco szybki do kompresji danych w czasie rzeczywistym w momencie ich pozyskiwania (na poziomie skanera).

Przeprowadzone badania pokazały przydatność standardu JPEG-2000 do kompresji danych skaningu naziemnego na poziomie sensora. Poza dużym stopniem kompresji oraz szybkością, standard ten daje użytkownikowi dużą elastyczność w doborze schematu kompresji bezstratnej oraz stratnej, a także decydowaniu o stopniu kompresji i zniekształceniu danych w przypadku wyboru schematu stratnego.

Publikacja [5] jest pierwszą z cyklu publikacji, której część dotyczy pozyskania danych skaningu z wykorzystaniem niskobudżetowych skanerów zamontowanych na niewielkich BSP. W odniesieniu do osiągnięcia naukowego, celem tej publikacji była wstępna ocena jakości chmur punktów pozyskanych przez prototypowy BSL wyposażony w skaner laserowy Velodyne HDL-32E w porównaniu z chmurami punktów powstałymi z gęstego dopasowania obrazów (*dense image matching*).

Ponieważ kluczowym zagadnieniem podczas georeferencji danych skaningu jest wiarygodna rekonstrukcja trajektorii, zbadano faktyczną dokładność pozycjonowania BSP

z wykorzystaniem różnej klasy odbiorników GNSS, w tym odbiornika klasy geodezyjnej NovAtel OEM615, który stanowił jeden z komponentów zbudowanego systemu skanowania BSL. Dokładność georeferencji bezpośredniej została określona na podstawie porównania współrzędnych środków rzutów zdjęć wyznaczonych za pomocą tych odbiorników ze współrzędnymi środków rzutów tych zdjęć, ale wyznaczonymi w drodze georeferencji pośredniej, ponieważ jest ona dokładniejsza niż georeferencja bezpośrednia [1]. Dokładność wyżej wymienionego odbiornika oszacowana została na około 2 i 4 cm, odpowiednio dla składowej poziomej i wysokościowej. Zatem jego dokładność jest wystarczająca do georeferencji danych skaningu BSP.

W porównaniu do chmur punktów uzyskanych z gęstego dopasowania obrazów, mimo niskiej wysokości lotu oraz pokrycia pomiędzy pasami skanowania powyżej 50%, chmura punktów uzyskana z wykorzystaniem skanera Velodyne HDL-32E miała znacznie mniejszą gęstość. Uzyskana średnia gęstość punktów była jednak kilkudziesięciokrotnie większa niż w przypadku typowego lotniczego skaningu laserowego. Ze względu na szумы oraz obserwacje odstające zawarte w danych pozyskanych obydwoma testowanymi IMU, dokładność określenia orientacji kątovej platformy była niska, co w konsekwencji negatywnie wpłynęło na jakość chmury punktów. Z tego powodu dokładność wysokościową chmury punktów oceniono w sposób przybliżony poprzez odnalezienie punktów najbliższych do kilkunastu punktów pomierzonych bezpośrednio w terenie techniką GNSS-RTK. Dokładność tę określono na 0.49 m, co znacznie odbiega od dokładności danych skaningu lotniczego. Dalszą szczegółową analizę danych IMU pozyskanych podczas lotu BSP przeprowadzono w ramach badań, w kolejnej pracy [6]. Zauważono bowiem, że dane pozyskiwane tymi samymi MEMS IMU, ale zamontowanymi na platformie naziemnej (m.in. samochodzie) nie wykazywały anomalii wpływających negatywnie na trajektorię (Grejner-Brzezinska et al., 2015).

Publikacja [6] powstała w konsekwencji i jako kontynuacja publikacji [5]. Dotyczy ona analizy komponentów zbudowanego BSL skaningu laserowego, a w szczególności testowanych IMU i niskiej jakości pozyskanych przez nie danych inercyjnych.

Zbudowany prototypowy BSL skaningu laserowego wyposażony został w dwa sensory IMU w celu określenia ich faktycznej wydajności w kontekście georeferencji pozyskanych danych. Oba sensory wytworzone zostały w technologii MEMS, a ich waga pozwalała na zamontowanie ich na niewielkim BSP. Pierwszy z nich (Epson M-G362PDC1) może być zaliczony do klasy taktycznych IMU ze względu na stosunkowo niewielki dryf żyroskopów wynoszący $3^\circ/\text{h}$. Natomiast drugi z nich (MicroStrain 3DM-GX3-35) można zaliczyć do niższej klasy konsumenckich IMU (dryf $18^\circ/\text{h}$), jednak posiadał on dokładniejsze akcelerometry niż Epson M-G362PDC1 [6]. Podczas testów terenowych oba IMU jednocześnie pozyskiwały dane dzięki czemu można było wykonać ich wzajemne porównanie, a sposób montażu w bezpośrednim sąsiedztwie [6] minimalizował wpływ różnych offsetów do anteny GNSS i skanera.

W pierwszej kolejności przeanalizowano przyspieszenia liniowe. Ponieważ faktyczna dynamika BSP podczas lotu była nieznana i niemożliwe byłoby odróżnienie błędnych i poprawnych odczytów, postanowiono przeanalizować dane, które pozyskane zostały podczas testu systemu przed startem BSP. Z pozyskanych danych statycznych wydzielono dwie części: przed uruchomieniem oraz po uruchomieniu silników BSP. Po obliczeniu średnich odczytów akcelerometrów dla obu części stwierdzono, że po uruchomieniu silników uzyskane wartości przyspieszeń średnich znacząco się różniły od wartości uzyskanych dla danych pozyskanych podczas wyłączonych silników, a także wartości te były różne dla obu IMU. Pozwoliło to stwierdzić, że wibracje pochodzące od silników

wielowirnikowca negatywnie i w sposób istotny wpłynęły na dokładność rekonstrukcji trajektorii. W celu zmniejszenia wpływu błędnych odczytów akcelerometrów w algorytmie (filtr Kalmana) integrującym dane GNSS i INS zwiększone zostały wartości szumów akcelerometrów. Dzięki temu współrzędne trajektorii lotu uzyskane ze zintegrowanych danych GNSS i INS były niemal identyczne z tymi pochodzącymi tylko z danych GNSS.

Wpływ danych pochodzących z żyroskopów na jakość elementów kątowych odtworzonej trajektorii postanowiono określić poprzez porównanie kątów Eulera uzyskanych z integracji danych GNSS i INS z tymi uzyskanymi z wyrównania bloku zdjęć – podczas testów wykonano również loty z kamerą (lustrzanka cyfrowa) z jednoczesną rejestracją danych GNSS oraz IMU i synchronizacją czasową wykonanych zdjęć. W wyniku porównania uzyskanych kątów stwierdzono, że wibracje silników mają negatywny wpływ również na dane pochodzące z żyroskopów IMU. Zdecydowanie większy wpływ zaobserwowano dla nominalnie dokładniejszych żyroskopów Epson M-G362PDC1, dla których kąty Eulera różniły się nawet o 50°. W przypadku MicroStrain 3DM-GX3-35 różnice te były znacznie mniejsze (kilka stopni kątowych) i dotyczyły głównie kąta przechylenia (*roll*) i pochylenia (*pitch*). Wartości te są jednak wciąż zbyt duże i potwierdzają, że, dane inercyjne pozyskane testowanymi IMU zamontowanymi na testowym BSP są zdecydowanie zbyt niskiej jakości by wykonać georeferencję danych skaningu BSL z dokładnością porównywalną do tej jaką uzyskuje się w przypadku lotniczego skaningu laserowego.

W publikacji wskazano również działania jakie można podjąć w celu zwiększenia dokładności danych skaningu uzyskanych tym lub podobnymi BSL skaningu laserowego. Pierwszy z nich to rozwiązanie sprzętowe polegające na odpowiednim tłumieniu drgań spowodowanych silnikami BSP poprzez lepsze odseparowanie IMU od ramy BSP i zastosowanie amortyzatorów. Pozostałe dwa rozwiązania algorytmiczne proponują wprowadzenie dodatkowych danych do procesu rekonstrukcji trajektorii. Pierwsze z nich pochodzić mogą z dopasowywania profili skanowania pozyskanych przez wiele diod laserowych dla kolejnych obrotów skanera. Drugie z nich uwzględnia wyniki wyrównania bloku zdjęć pozyskanych podczas wykonywania skaningu, jednak wymaga to platformy o większym udźwigu.

Publikacja [7] dotyczy również badań nad BSL skaningu laserowego, gdzie analizy dotyczyły głównie dokładności uzyskanej chmury punktów oraz czynników mających na to wpływ. W odróżnieniu od poprzednich dwóch omawianych publikacji, tutaj analizie poddane zostały dane pozyskane nieco innym BSL skaningu laserowego. System ten zbudowany został przez komercyjną firmę, jednak według indywidualnej konfiguracji sensorów, jako system prototypowy. W porównaniu do poprzedniego prototypowego systemu [6], posiadał on dokładniejszy sensor IMU Sensoror STIM300, szczególnie pod względem żyroskopów (dryf 0,5°/h), ale również wytworzony został w technologii MEMS. Sposób jego montażu na BSP zapewniał natomiast lepsze tłumienie drgań niż w przypadku wcześniejszego prototypowego BSL. Zarówno skaner jak i odbiornik GNSS zamontowane w tym systemie były identyczne z tymi z wcześniejszego systemu prototypowego. W przypadku skanera jedyną różnicą była niewielka zmiana orientacji skanera. W obu systemach skaner zorientowany był tak, że oś obrotu skanera był równoległa do osi przód-tył BSP, z tym że w prototypowym systemie spód skanera zorientowany był w kierunku do przodu BSP, a w drugim w kierunku do tyłu BSP. Spowodowało to nieco inne kąty widzenia w kierunkach przód i tył, jednak nie mające istotnego znaczenia w kontekście badań ze względu na to, że oba systemy zbudowane zostały w oparciu o

wielowirnikowce, które mogą poruszać się w dowolnym kierunku względem swej osi przód-tył.

W kontekście oceny dokładności chmury punktów pozyskanej opisanym wyżej BSL skaningu laserowego, przeanalizowane zostały cztery aspekty: łączny wpływ dokładności wykorzystanych sensorów (IMU, odbiornik i antena GNSS, skaner laserowy) na teoretyczną dokładność chmury punktów, jakość rekonstrukcji trajektorii z danych GNSS i INS, dokładność wewnętrzna chmury punktów, dokładność bezwzględna chmury punktów.

Dokładność teoretyczną określono jako błąd 3D położenia punktów w śladzie wiązek laserowych powstałym na poziomej powierzchni zeskanowanej z wysokości 25 m dla kąta widzenia skanera 120°. Błąd ten obliczono poprzez zastosowania prawa propagacji kowariancji dla równania georeferencji chmur punktów gdzie wariancje poszczególnych parametrów przyjęto zgodnie ze specyfikacjami producentów sensorów. Pozostałe nieznanne wariancje oraz parametry (np. offsety liniowe pomiędzy skanerem i IMU) przyjęto jako zerowe. Obliczone błędy 3D punktów wynoszące od około 30 mm (w nadirze) do około 35 mm (na skraju pasa skanowania w tylnej jego części) pokazują jaki rząd dokładności można osiągnąć stosując te sensory w warunkach idealnych. Należy się spodziewać, że faktyczna dokładność będzie niższa ze względu na wpływ innych czynników.

Jakość rekonstrukcji trajektorii określono jako różnicę współrzędnych punktów trajektorii oraz kątów Eulera uzyskanych z wyników integracji danych GNSS i INS powstałych poprzez zastosowanie filtru Kalmana zgodnie z kolejnością pozyskiwanych danych oraz w kierunku przeciwnym. Parametry te często wykorzystywane są do określenia dokładności rekonstrukcji trajektorii. Obliczone bezwzględne różnice współrzędnych pomiędzy punktami trajektorii nie przekraczały z reguły 2 cm (z wyjątkiem kilku punktów jednej z trajektorii, dla których różnice wynosiły kilkanaście centymetrów). Bezwzględne różnice kątów Eulera z reguły nie przekraczały 0,15° dla kątów przechylenia i pochylenia oraz 0,5° dla kąta skręcenia. Pozwala to stwierdzić, że dużo większy wpływ na dokładność współrzędnych punktów skaningu mają wyznaczone kąty Eulera niż współrzędne trajektorii. Zatem dużo większy wpływ ma dokładność zastosowanego IMU niż sensora GNSS.

By scharakteryzować spójność geometryczną powstałej chmury punktów zaproponowano obliczenie tzw. dokładności wewnętrznej, czyli odstępstwa punktów od skanowanej powierzchni. Jako powierzchnie testowe przyjęto powierzchnie płaskie, dla których wydzielono przynależne im punkty skaningu. Następnie w punkty te metodą odporną MSAC (*M-estimator SAmple Consensus*) (Torr and Zisserman, 2000) wpasowano płaszczyzny. Na podstawie odległości punktów do przynależnych im płaszczyzn obliczono dokładność wewnętrzną pozyskanych danych, która wynosiła około 5-7 cm w zależności od sposobu wydzielania punktów dla powierzchni testowych [7].

Dokładność bezwzględną określono w podobny sposób jak dokładność wewnętrzną, z tym, że płaszczyzny referencyjne do których obliczano odległości punktów skaningu wyznaczono na podstawie dużo dokładniejszych danych naziemnego skaningu laserowego. Ponieważ powierzchnie testowe nie były idealnymi płaszczyznami, dlatego uzyskane wyniki zweryfikowano poprzez obliczenie odległości pomiędzy punktami pozyskanymi z wykorzystaniem BSL skaningu laserowego a punktami pozyskanymi techniką naziemnego skaningu laserowego. W obu przypadkach uzyskano zgodność wartości dokładności bezwzględnej wynoszącej około 7 i 9 cm w zależności od danych testowych.

Omawiana praca pokazuje jak istotny wpływ na dokładność chmury punktów mają zastosowane sensory, a w szczególności IMU. Mimo wykonania skaningu BSL z dużo niższego pułapu niż skaningu lotniczego, dokładności współrzędnych punktów są porównywalne.

Podsumowanie cyklu

W pracach stanowiących cykl publikacji zaproponowano oryginalne rozwiązania zwiększające skuteczność pozyskiwania dużych ilości danych skaningu laserowego. Zwiększenie skuteczności kompresji danych skaningu na poziomie sensora zostało potwierdzone eksperymentami numerycznymi, natomiast skuteczność pozyskiwania danych do zadań pomiarowych z wykorzystaniem niskokosztowych skanerów laserowych potwierdzono empirycznie. Za moje najważniejsze osiągnięcia w cyklu publikacji uważam:

- opracowanie szybkiej metody kompresji danych FW na poziomie sensora wykorzystującej Standard JPEG-2000,
- opracowania szybkiej metody kompresji danych naziemnego skaningu laserowego na poziomie sensora wykorzystującej Standard JPEG-2000,
- udowodnienie, że odpowiednia organizacja danych skaningu w struktury 2D, a w przypadku danych FW w struktury 3D pozwala zwiększyć stopień kompresji,
- analizę zniekształcenia danych skaningu laserowego spowodowanego kompresją stratną,
- określenie dopuszczalnego stopnia kompresji stratnej nie powodującego istotnego zniekształcenia danych skaningu,
- ocenę wpływu sensorów, a w szczególności IMU, na dokładność danych skaningu BSL pozyskanych z wykorzystaniem niskobudżetowych skanerów laserowych.

Powyższe osiągnięcia stanowią istotny wkład w rozwój technologii skaningu laserowego, a proponowane rozwiązania mają praktyczne zastosowania.

Literatura

- Bachrach, A., He, R., Roy, N., 2009. Autonomous flight in unknown indoor environments. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 1(4), pp. 217-228.
- Błaszczak-Bąk, W., Koppányi, Z., Toth, C., 2018. Reduction Method for Mobile Laser Scanning Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7), 285.
- Bo, Z., Wei, G., Shuo, S., Shalei, S., 2011. A multi-wavelength canopy LiDAR for vegetation monitoring: System implementation and laboratory-based tests. *Procedia Environmental Sciences*, 10, pp. 2775-2782.
- Correa, D. S. O., Sciotti, D. F., Prado, M. G., Sales, D. O., Wolf, D. F., Osorio, F. S., 2012. Mobile Robots Navigation in Indoor Environments Using Kinect Sensor. In: *Critical Embedded Systems (CBSEC), 2012 Second Brazilian Conference*, pp. 36-41.
- Eder, M., Brockmann, G., Zimmermann, A., Papadopoulos, M. A., Schwenzer-Zimmerer, K., Zeilhofer, H. F., ... Kovacs, L., 2013. Evaluation of precision and accuracy assessment of different 3-D surface imaging systems for biomedical purposes. *Journal of digital imaging*, 26(2), pp. 163-172.
- El-Sheimy, N., 2009. Emerging MEMS IMU and its impact on mapping applications. *Proceedings of the Photogrammetric Week 2009*, pp. 203-216.
- Gao, Y., Liu, S., Atia, M. M., & Noureldin, A. 2015. INS/GPS/LiDAR integrated navigation system for urban and indoor environments using hybrid scan matching algorithm. *Sensors*, 15(9), pp. 23286-23302.
- Glennie, C., Lichti, D. D., 2010. Static calibration and analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for high accuracy mobile scanning. *Remote Sensing*, 2(6), pp. 1610-1624.

- Glira, P., Pfeifer, N., Mandlbürger, G., 2016. Rigorous Strip adjustment of UAV-based laserscanning data including time-dependent correction of trajectory errors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 82(12), pp. 945-954.
- Grejner-Brzezinska, D., Toth, C., Józków, G., 2015. On Sensor Georeferencing and Point Cloud Generation with sUAS. *Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting*, pp. 839-848.
- Groves, P. D., 2015. Navigation using inertial sensors [Tutorial]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 30(2), pp. 42-69.
- Halterman, R., Bruch, M., 2010. Velodyne HDL-64E lidar for unmanned surface vehicle obstacle detection. *Proc. SPIE 7692, Unmanned Systems Technology XII*, 76920D.
- Hauser, D., Glennie, C., Brooks, B., 2016. Calibration and accuracy analysis of a low-cost mapping-grade mobile laser scanning system. *Journal of Surveying Engineering*, 142(4), 04016011.
- Henry, P., Krainin, M., Herbst, E., Ren, X., Fox, D., 2014. RGB-D mapping: Using depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments. In: *Experimental robotics*, pp. 477-491.
- Hu, B., Li, J., Jing, L., Judah, A., 2014. Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, pp. 145-155.
- Isenburg, M., 2013. LASzip: lossless compression of LiDAR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 79(2), pp. 209-217.
- Józków, G., Toth, C., Koppányi, Z., Grejner-Brzezinska, D., 2014. Combined Matching of 2D and 3D Kinect™ Data to support Indoor Mapping and Navigation. In: *Proceedings of Annual Conference of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, online.
- Laky, S., Zaletnyik, P., Toth, C., 2010. Land classification of wavelet-compressed fullwaveform LiDAR data. *Int. Arch. Photogram., Rem. Sens. Spatial Inform. Sci.* 38 (Part 3A), pp. 115-119.
- Lange, B., Chang, C. Y., Suma, E., Newman, B., Rizzo, A. S., Bolas, M., 2011. Development and evaluation of low cost game-based balance rehabilitation tool using the Microsoft Kinect sensor. In *Engineering in medicine and biology society, EMBC, 2011 annual international conference of the IEEE*, pp. 1831-1834.
- Li, M., Lin, R., Wang, H., Xu, H., 2013. An efficient SLAM system only using RGBD sensors. In: *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013 IEEE International Conference*, pp. 1653-1658.
- Li, Q., Chen, L., Li, M., Shaw, S. L., Nüchter, A., 2014. A sensor-fusion drivable-region and lane-detection system for autonomous vehicle navigation in challenging road scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(2), pp. 540-555.
- Lichti, D., Sakaloud, J., 2010. Registration and calibration. In *Vosselman, G., Maas, H.-G., (Eds.) Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing.
- LizardTech, 2017. U.S. Patent for LiDAR Point Cloud Compression. Online, dostęp 26.11.2018 r. (<https://www.extensis.com/newsroom/lizardtech-awarded-us-patent-for-lidar-point-cloud-compression>).
- MacLachlan, R., Mertz, C., 2006. Tracking of moving objects from a moving vehicle using a scanning laser rangefinder. In *Proceedings of Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE*, pp. 301-306.
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Riegl, U., Haring, A., Wieser, M., Glira, P., Winiwarter, L., 2015. Complementing airborne laser bathymetry with UAV-based lidar for capturing alluvial landscapes. *Proceedings of SPIE 9637, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII*, 96370A, pp. 1-14.
- Mongus, D., Žalik, B., 2011. Efficient method for lossless LIDAR data compression. – *International Journal of Remote Sensing* 32 (9), pp. 2507-2518.
- Mukhtar, A., Xia, L., Tang, T. B., 2015. Vehicle Detection Techniques for Collision Avoidance Systems: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), pp. 2318-2338.
- Nagai, M., Chen, T., Shibasaki, R., Kumagai, H., Ahmed, A., 2009. UAV-borne 3-D mapping system by multisensor integration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), pp. 701-708.
- Natarajan, C. M., Tanner, M. G., Hadfield, R. H., 2012. Superconducting nanowire single-photon

- detectors: physics and applications. *Superconductor science and technology*, 25(6), 063001.
- Oliver, A., Kang, S., Wünsche, B. C., MacDonald, B., 2012. Using the Kinect as a navigation sensor for mobile robotics. In: *Proceedings of the 27th conference on image and vision computing New Zealand*, pp. 509-514.
- Pradhan, B., Kumar, S., Mansor, S., Ramli, A.R., Sharif, A.R.B.M., 2005. Light detection and ranging (LIDAR) data compression. – *KMITL Science and Technology Journal* 5 (3), pp. 515–523.
- Premebida, C., Monteiro, G., Nunes, U., & Peixoto, P., 2007. A Lidar and Vision-based Approach for Pedestrian and Vehicle Detection and Tracking. A LIDAR and vision-based approach for pedestrian and vehicle detection and tracking. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (2007)*, pp. 1044-1049.
- Rehak, M., Skaloud, J., 2017. Performance assessment of integrated sensor orientation with a low-cost GNSS receiver. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. IV-2/W, pp. 75-80.
- Roca, D., Armesto, J., Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., 2014. Lidar-equipped uav for building information modelling. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 523-527.
- Shan, J., Toth, C. K., 2008. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.
- Son, S., Park, H., Lee, K. H., 2002. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(8), pp. 889-897.
- Torr, P.H., Zisserman, A., 2000. MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry. *Computer Vision and Image Understanding*, 78(1), pp. 138-156.
- Toth, C., Jozkova, G., Koppányi, Z., Young, S., Grejner-Brzezinska, D., 2016. Monitoring Aircraft Motion at Airports by LiDAR. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-1, pp. 159-165.
- Tuldahl, H. M., Larsson, H., 2014. Lidar on small UAV for 3D mapping. *Proc. SPIE 9250, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VIII; and Military Applications in Hyperspectral Imaging and High Spatial Resolution Sensing II*, 925009.
- Yun, S., Lee, Y. J., Sung, S., 2013. IMU/Vision/Lidar integrated navigation system in GNSS denied environments. In: *Aerospace Conference, 2013 IEEE*, pp. 1-10.
- Xavier, J., Pacheco, M., Castro, D., Ruano, A., Nunes, U., 2005. Fast line, arc/circle and leg detection from laser scan data in a player driver. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3930-3935.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

a) Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, technologiczne i konstrukcyjne

Do moich najważniejszych osiągnięć technologicznych zaliczam:

- **Opracowanie technologii tworzenia modeli 3D zabudowy z danych naziemnego i lotniczego skaningu laserowego na potrzeby projektu „Opolskie w Internecie – system informacji przestrzennej i portal informacyjno-promocyjny Województwa Opolskiego”, 2010-2011 r.**

Jednym z zadań realizowanych w ramach projektu „Opolskie w Internecie – system informacji przestrzennej i portal informacyjno – promocyjny Województwa Opolskiego” (<http://maps.opolskie.pl/start/>) było utworzenie teksturowanych modeli 3D wybranych obiektów architektonicznych („Opolskie perełki 3D”) na podstawie danych naziemnego i lotniczego skaningu laserowego oraz zdjęć cyfrowych. Ze względu na zachowanie dużej szczegółowości i dokładności modeli (CityGML LoD3) dla nawet bardzo skomplikowanych obiektów (np. zamek w Mosznej) z jednoczesną minimalizacją ilości zajmowanego na dysku miejsca (modele prezentowane online) należało opracować odpowiednią

technologię zarówno pozyskiwania danych naziemnego skaningu laserowego jak i tworzenia modeli płaszczyznowych z zachowaną topologią i georeferencją. Dzięki opracowanej technologii z danych naziemnego i lotniczego skaningu utworzonych zostało 21 modeli obiektów architektonicznych (w Opolu, Nysie, Brzegu, Mosznej), a z danych lotniczego skaningu laserowego opracowano modele 4 fortów ziemnych (w Nysie) oraz zabudowy starówki Opolu. Mój udział procentowy w opracowaniu technologii szacuję na 80%.

- **Opracowanie koncepcji modernizacji systemu kontrolno-pomiarowego KWB Turów, 2017-2018 r.**

Jednym z elementów modernizacji systemu kontrolno-pomiarowego wykorzystywanego w KWB Turów w celu monitorowania deformacji powierzchni terenu jest modernizacja technologiczna zakładająca wykorzystanie nowoczesnych technik pomiarowych. Zaproponowano wykorzystanie m.in. dwóch technologii umożliwiających monitoring powierzchniowy wybranych części obszaru KWB Turów. W szczególności technologie te opierały się na wykorzystaniu naziemnego skanera laserowego dalekiego zasięgu oraz fotogrametrii BSL. Wszystkie zaproponowane technologie pomiarowe zostały z powodzeniem przetestowane w praktyce na terenie KWB Turów i są sukcesywnie wdrażane. Wyniki testów wraz ze szczegółowym raportem opisującym całą koncepcję modernizacji systemu kontrolno-pomiarowego przekazane zostały zamawiającemu. Opisywane prace są zastrzeżone przez zamawiającego i nie są opublikowane. Mój udział procentowy w całości prac nad koncepcją szacuję na 50%.

b) Wykaz pozostałych wybranych osiągnięć

- Autorstwo bądź współautorstwo 122 prac twórczych (w tym 90 po uzyskaniu stopnia doktora):
 - 3 artykuły w czasopismach z listy JCR (w tym 3 po uzyskaniu stopnia doktora)¹,
 - 1 monografia (w tym 1 po uzyskaniu stopnia doktora)
 - 12 artykułów w czasopismach z listy „B” MNiSW (w tym 2 po uzyskaniu stopnia doktora),
 - 10 recenzowanych artykułów konferencyjnych indeksowanych w WoS (w tym 10 po uzyskaniu stopnia doktora)²,
 - 10 artykułów opublikowanych w materiałach konferencyjnych (w tym 9 po uzyskaniu stopnia doktora),
 - 1 artykuł w czasopiśmie branżowym spoza listy MNiSW (w tym 1 po uzyskaniu stopnia doktora),
 - 78 opublikowane abstrakty w materiałach konferencyjnych (57 po uzyskaniu stopnia doktora),
 - 7 niepublikowanych ekspertyz i raportów (7 po uzyskaniu stopnia doktora).

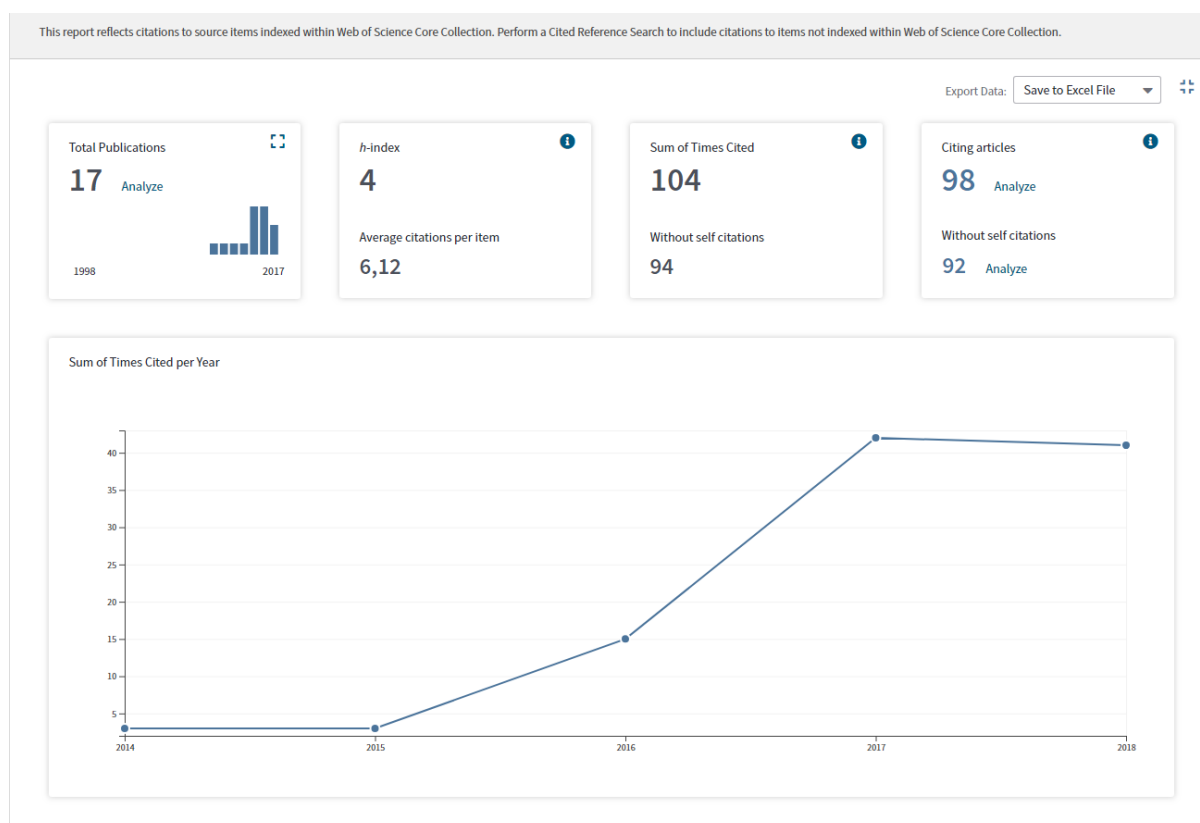
Sumaryczna liczba punktów MNiSW za publikacje (łącznie z publikacjami stanowiącymi osiągnięcie naukowe): 460 (w tym 398 po uzyskaniu stopnia doktora)³; sumaryczny *Impact Factor*: 15.775 (w tym 15.775 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora)⁴; cytowania według WoS: 104 (w tym 104 po uzyskaniu stopnia doktora).

¹ Jeden z nich nie został jeszcze zaindeksowany w bazie WoS. Obecnie artykuł opublikowany jest jedynie online bez nadanego ostatecznego wolumenu, numeru i stron.

² Dwa z nich nie zostały jeszcze zaindeksowane w bazie WoS.

³ Podane wartości uwzględniają punkty za trzy artykuły oczekujące na zaindeksowanie w bazie WoS.

⁴ Podane wartości uwzględniają *Impact Factor* za pracę oczekującą na zaindeksowanie w bazie WoS.



Rysunek 1. Raport cytowań według Web of Science (cz. 1)

		2015	2016	2017	2018	2019	Total	Average Citations per Year
Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report								
or restrict to items published between 1900 and 2019 Go								
<input type="checkbox"/>	1. Remote sensing platforms and sensors: A survey By: Toth, Charles; Jozkow, Grzegorz ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING Volume: 115 Pages: 22-36 Published: MAY 2016	3	15	42	41	0	104	20.80
<input type="checkbox"/>	2. LANDSLIDES MAPPING IN ROZNOW LAKE VICINITY, POLAND USING AIRBORNE LASER SCANNING DATA By: Borkowski, Andrzej; Perski, Zbigniew; Wojciechowski, Tomasz; et al. Conference: 11th Czech-Polish Workshop on Recent Geodynamics of the Sudeten and Adjacent Areas Location: Trest, CZECH REPUBLIC Date: NOV 04-06, 2010 Sponsor(s): Polish Acad Sci, Sect Geodynam Comm Geodesy, Acad Sci Czech Republic, Inst Rock Struct & Mech, Czech Ctr Earth Dynam Res; Wroclaw Univ Environm & Life Sci, Inst Geodesy & Geoinformat ACTA GEODYNAMICA ET GEOMATERIALIA Volume: 8 Issue: 3 Pages: 325-333 Published: 2011	0	11	22	29	0	62	20.67
<input type="checkbox"/>	3. UAS TOPOGRAPHIC MAPPING WITH VELODYNE LIDAR SENSOR By: Jozkow, G.; Toth, C.; Grejner-Brzezinska, D. Conference: 23rd ISPRS Congress Location: Prague, CZECH REPUBLIC Date: JUL 12-19, 2016 Sponsor(s): Int Soc Photogrammetry & Remote Sensing XXIII ISPRS CONGRESS, COMMISSION I Book Series: International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences Volume: 3 Issue: 1 Pages: 201-208 Published: 2016	1	1	4	3	0	12	1.50
<input type="checkbox"/>	4. Compression strategies for LIDAR waveform cube By: Jozkow, Grzegorz; Toth, Charles; Quirk, Mihaela; et al. ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING Volume: 99 Pages: 1-13 Published: JAN 2015	0	0	6	4	0	10	3.33
<input type="checkbox"/>	5. UWB for Navigation in GNSS Compromised Environments By: Dierenbach, Kai; Ostrowski, Steve; Jozkow, Grzegorz; et al. Conference: 28th International Technical Meeting of The Satellite-Division-of-the-Institute-of-Navigation (ION GNSS+) Location: Tampa, FL Date: SEP 14-18, 2015 Sponsor(s): Inst Navigat, Satellite Div PROCEEDINGS OF THE 28TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS+ 2015) Book Series: Institute of Navigation Satellite Division Proceedings of the International Technical Meeting Pages: 2380-2389 Published: 2015	1	1	2	0	0	4	1.00
<input type="checkbox"/>	6. On Sensor Georeferencing and Point Cloud Generation with sUAS By: Grejner-Brzezinska, Dorota A.; Toth, Charles K.; Jozkow, Grzegorz Conference: Pacific PNT Meeting Location: Honolulu, HI Date: APR 20-23, 2015 PROCEEDINGS OF THE ION 2015 PACIFIC PNT MEETING Book Series: Proceedings of the Institute of Navigation Pacific PNT Meeting Pages: 839-848 Published: 2015	0	0	1	2	0	3	0.75
<input type="checkbox"/>	7. ACCURACY ASSESSMENT OF BUILDING MODELS CREATED FROM LASER SCANNING DATA By: Borkowski, A.; Jozkow, G. Conference: 22nd Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Location: Melbourne, AUSTRALIA Date: AUG 25-SEP 01, 2012 Sponsor(s): Int Soc Photogrammetry & Remote Sensing; Hexagon; ESRI; RMIT Univ, Sch Math Geospatial Sci XXIII ISPRS CONGRESS, TECHNICAL COMMISSION III Book Series: International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences Volume: 39-B3 Pages: 253-258 Published: 2012	1	1	1	0	0	3	0.75
<input type="checkbox"/>	8. Positioning Slow-Moving Platforms by UWB Technology in GPS-Challenged Areas By: Toth, Charles K.; Jozkow, Grzegorz; Koppányi, Zoltan; et al. JOURNAL OF SURVEYING ENGINEERING Volume: 143 Issue: 4 Article Number: 04017011 Published: NOV 2017	0	1	2	0	0	3	0.43
<input type="checkbox"/>	9. Performance Analysis of UWB Technology for Indoor Positioning By: Koppányi, Zoltan; Toth, Charles K.; Grejner-Brzezinska, Dorota A.; et al. Conference: International Technical Meeting of the Institute-of-Navigation Location: San Diego, CA Date: JAN 27-29, 2014 Sponsor(s): Inst Navigat PROCEEDINGS OF THE 2014 INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION Book Series: Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation Pages: 154-165 Published: 2014	0	0	0	2	0	2	1.00
<input type="checkbox"/>	10. PERFORMANCE EVALUATION OF sUAS EQUIPPED WITH VELODYNE HDL-32E LIDAR SENSOR By: Jozkow, G.; Wiczorek, P.; Karpina, M.; et al. Conference: International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics Location: Bonn, GERMANY Date: SEP 04-07, 2017 Sponsor(s): Int Soc Photogrammetry & Remote Sensing INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AERIAL VEHICLES IN GEOMATICS (VOLUME XLII-2/W6) Book Series: International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences Volume: 42-2 Issue: W6 Pages: 171-177 Published: 2017	0	0	2	0	0	2	0.40
		0	0	0	1	0	1	0.50

Rysunek 2. Raport cytowani wg Web of Science (cz. 2)

	2015	2016	2017	2018	2019	Total	Average Citations per Year
Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report							
or restrict to items published between 1900 and 2019 Go							
<input type="checkbox"/> 11. Mapping with Small UAS: A Point Cloud Accuracy Assessment By: Toth, Charles; Jozkow, Grzegorz; Grejner-Brzezinska, Dorota JOURNAL OF APPLIED GEODESY Volume: 9 Issue: 4 Pages: 213-226 Published: DEC 2015	0	0	1	0	0	1	0.25
<input type="checkbox"/> 12. Study on Sensor Level LIDAR Waveform Data Compression Using JPEG-2000 Standard Multi-Component Transform By: Jozkow, Grzegorz; Toth, Charles; Quirk, Mihaela; et al. PHOTOGRAMMETRIE FERNERKUNDUNG GEOINFORMATION Issue: 3 Pages: 201-213 Published: 2015	0	0	1	0	0	1	0.25
<input type="checkbox"/> 13. Terrestrial Laser Scanning Data Compression Using JPEG-2000 By: Jozkow, Grzegorz PFG-JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND GEOINFORMATION SCIENCE Volume: 85 Issue: 5 Pages: 293-305 Published: DEC 2017	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 14. MONITORING OF FLUVIAL TRANSPORT IN THE MOUNTAIN RIVER BED USING TERRESTRIAL LASER SCANNING By: Jozkow, G.; Borkowski, A.; Kasprzak, M. Conference: 23rd Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Location: Prague, CZECH REPUBLIC Date: JUL 12-19, 2016 Sponsor(s): Int Soc Photogrammetry & Remote Sensing XXIII ISPRS CONGRESS, COMMISSION VII Book Series: International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences Volume: 41 Issue: B7 Pages: 523-528 Published: 2016	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 15. Collaborative Monocular SLAM with Crowd-Sourced Data By: Huai, Jianzhu; Jozkow, Grzegorz; Toth, Charles; et al. Conference: 29th International Technical Meeting of The Satellite-Division-of-the-Institute-of-Navigation (ION GNSS+) Location: Portland, OR Date: SEP 12-16, 2016 Sponsor(s): Inst Navigat, Satellite Div PROCEEDINGS OF THE 29TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS+ 2016) Book Series: Institute of Navigation Satellite Division Proceedings of the International Technical Meeting Pages: 1064-1079 Published: 2016	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 16. MONITORING AIRCRAFT MOTION AT AIRPORTS BY LIDAR By: Toth, C.; Jozkow, G.; Koppányi, Z.; et al. Conference: 23rd ISPRS Congress Location: Prague, CZECH REPUBLIC Date: JUL 12-19, 2016 Sponsor(s): Int Soc Photogrammetry & Remote Sensing XXIII ISPRS CONGRESS, COMMISSION I Book Series: International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences Volume: 3 Issue: 1 Pages: 159-165 Published: 2016	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 17. Performance Analysis of the Kinect Sensor Trajectory Reconstruction By: Toth, Charles K.; Jozkow, Grzegorz; Koppányi, Zoltan; et al. Conference: ION Pacific PNT Meeting Location: Honolulu, HI Date: APR 23-25, 2013 Sponsor(s): Inst Nav PROCEEDINGS OF THE ION 2013 PACIFIC PNT MEETING Book Series: Proceedings of the Institute of Navigation Pacific PNT Meeting Pages: 542-550 Published: 2013	0	0	0	0	0	0	0.00

Rysunek 3. Raport cytowani wg Web of Science (cz. 3)

<input type="checkbox"/> 1. Remote sensing platforms and sensors: A survey By: Toth, Charles; Jozkow, Grzegorz ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING Volume: 115 Pages: 22-36 Published: MAY 2016 View Abstract ▾	Times Cited: 62 (from Web of Science Core Collection) Highly Cited Paper Usage Count ▾
<input type="checkbox"/> 2. LANDSLIDES MAPPING IN ROZNOW LAKE VICINITY, POLAND By: Borkowski, Andrzej; Perski, Zbigniew; Wojciechowski, Tomasz Conference: 11th Czech-Polish Workshop on Recent Geodynamical Processes CZECH REPUBLIC Date: NOV 04-06, 2010 Sponsor(s): Polish Acad Sci, Sect Geodynam Comm Geodesy; Acta Geod Et Geomat ACTA GEODYNAMICA ET GEOMATERIALIA Volume: 8 Issue: 3 Pages: 229-239 Published: 2011 View Abstract ▾	Times Cited: 12 (from Web of Science Core Collection) Usage Count ▾

As of July/August 2018, this highly cited paper received enough citations to place it in the top 1% of the academic field of Geosciences based on a highly cited threshold for the field and publication year.

Data from **Essential Science Indicators**

Close Window

Rysunek 4. Publikacja znajdująca się wśród 1% najczęściej cytowanych artykułów wg Web of Science

- Zagraniczne staże naukowe: 36 miesięcy;
- Recenzje artykułów naukowych: 32 (w tym 11 dla czasopismach wyróżnionych w JCR);
- Członkostwo w międzynarodowych organizacjach naukowych: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS);
- Wystąpienia na konferencjach naukowych (postery i referaty): 78 (w tym 25 referatów wygłoszonych osobiście);

- Uczestnictwo w zagranicznych, europejskich i międzynarodowych projektach badawczych: 5;
- Uczestnictwo w krajowych projektach badawczych: 3;
- Krajowe nagrody za działalność naukową: 3;
- Promotorstwo prac dyplomowych: 32 (9 magisterskich, 23 inżynierskich);
- Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego: 3 doktorantów,
- Opieka naukowa nad studentami z zagranicy przyjeżdżającymi na staż: 2 studentów (łącznie 14 miesięcy).

Szczegółowy opis powyższych osiągnięć znajduje się w załączniku 3, część II i III.

c) Wykaz pozostałych publikacji niewchodzących w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych:

1. Huai, J., Jozkow, G., Toth, C., Grejner-Brzezinska, D., 2018. Collaborative Monocular SLAM with Crowdsourced Data. Navigation-Journal of the Institute of Navigation, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/navi.266>, (pkt. 25, IF=1.322)⁵.
2. Hadaś, E., Józków, G., Walicka, A., Borkowski, A., 2018. Determining Geometric Parameters of Agricultural Trees from Laser Scanning Data Obtained with Unmanned Aerial Vehicle. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2, 407-410, (pkt. 15)⁶.
3. Walicka, A., Józków, G., Borkowski, A., 2018. Individual Rocks Segmentation in Terrestrial Laser Scanning Point Cloud using Iterative DbSCAN Algorithm. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2, 1157-1161, (pkt. 15)⁷.
4. Toth, C. K., Jozkow, G., Koppányi, Z., Grejner-Brzezinska, D., 2017. Positioning Slow-Moving Platforms by UWB Technology in GPS-Challenged Areas. Journal of Surveying Engineering, 143(4), 04017011, (pkt. 25, IF=1.709).
5. Huai, J., Józków, G., Toth, C., Grejner-Brzezinska, D., 2016. Collaborative Monocular SLAM with Crowd Sourced Data. Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), 1064-1079, (pkt. 15).
6. Jozkow, G., Borkowski, A., Kasprzak, M., 2016. Monitoring of Fluvial Transport in the Mountain River Bed Using Terrestrial Laser Scanning. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLI-B7, 523-528, (pkt. 15).
7. Toth, C., Jozkow, G., Koppányi, Z., Young, S., Grejner-Brzezinska, D., 2016. Monitoring Aircraft Motion at Airports by LiDAR. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-1, 159-165, (pkt. 15).
8. Józków, G., 2015. Doskonalenie metod filtracji danych lotniczego skaningu laserowego. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, (pkt. 20).

⁵ Wolumen, numer i strony nie zostały jeszcze nadane – obecnie praca opublikowana jest jedynie online. Praca nie została jeszcze zaindeksowana w bazie WoS.

⁶ Praca nie została jeszcze zaindeksowana w bazie WoS.

⁷ Praca nie została jeszcze zaindeksowana w bazie WoS.

9. Lewandowski, P., Gołuch, P., Józków, G., Borsuk, E., Dymarska, N., Podhorecki, D., Siekanko, B., Rohm, W., 2015. Ocena dokładności geodezyjnych pomiarów fotogrametrycznych w obszarze zurbanizowanym z wykorzystaniem bezzałogowych systemów latających (BSL). *Magazyn Geoinformacyjny Geodeta*, Nr 8 (243), 14-21, (pkt. 0).
10. Grejner-Brzezinska, D., Toth, C., Józków, G., 2015. On Sensor Georeferencing and Point Cloud Generation with sUAS. *Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting*, 839-848, (pkt. 15).
11. Dierenbach, K., Ostrowski, S., Józków, G., Toth, C., Grejner-Brzezinska, D., Koppanyi, Z., 2015. UWB for Navigation in GNSS Compromised Environments. *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015)*, 2380-2389, (pkt. 15).
12. Józków, G., Vander Jagt, B., Toth, C., 2015. Experiments with UAS imagery for the automatic modeling of power lines 3D geometry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W4, 403-409, (pkt. 0).
13. Toth, C., Jozkow, G., Ostrowski, S., Grejner-Brzezinska, D., 2015. Positioning Slow Moving Platforms by UWB technology in GPS-Challenged Areas. *Proceedings of the 9th International Symposium on Mobile Mapping Technology MMT2015*, 9-11 December 2015, Sydney, Australia, CD, (pkt. 0).
14. Jozkow, G., Toth, C., Grejner-Brzezinska, D., 2015. Initial Performance Evaluation of UAS Deployed LiDAR. *Proceedings of the 9th International Symposium on Mobile Mapping Technology MMT2015*, 9-11 December 2015, Sydney, Australia, CD, (pkt. 0).
15. Koppanyi, Z., Toth, C., Grejner-Brzezinska, D., Józków, G., 2014. Performance Analysis of UWB Technology for Indoor Positioning. *Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 154-165, (pkt. 15).
16. Ostrowski, S., Józków, G., Toth, C., Vander Jagt, B., 2014. Analysis of point cloud generation from UAS images. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. II-1, 45-51, (pkt. 0).
17. Józków, G., Toth, C., 2014. Georeferencing experiments with UAS imagery. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. II-1, 25-29, (pkt. 0).
18. Toth, C., Koppanyi, Z., Grejner-Brzezinska, D., Józków G., 2014. Spatial spectrum analysis of various digital elevation models. *Proceedings of the ASPRS 2014 Annual Conference & co-located JACIE Workshop, Geospatial Power in Our Pockets*, March 23-28, 2014, Louisville, Kentucky, USA, online, (pkt. 0).
19. Józków, G., Toth, C., Koppanyi, Z., Grejner-Brzezinska, D., 2014. Combined matching of 2D and 3D Kinect™ data to support indoor mapping and navigation. *Proceedings of the ASPRS 2014 Annual Conference & co-located JACIE Workshop, Geospatial Power in Our Pockets*, March 23-28, 2014, Louisville, Kentucky, USA, online, (pkt. 0).
20. Borkowski, A., Józków, G., Ziaja, M., Bęcek, K., 2014. Accuracy of 3D Building Models Created Using Terrestrial and Airborne Laser Scanning Data. *Proceedings of the XXV FIG Congress 2014 "Engaging the Challenges - Enhancing the Relevance"*, Kuala Lumpur, Malaysia, 16-21 June 2014, CD, (pkt. 0).

21. Toth, C., Józków, G., Koppányi, Z., Grejner-Brzezinska, D., 2013. Performance Analysis of Kinect Sensor Trajectory Reconstruction. Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting, 542-550, (pkt. 15).
22. Borkowski, A., Jarząbek-Rychard, M., Tymków, P., Józków, G., 2013. Wykorzystanie danych skaningu laserowego do modelowania 3D fortów obronnych na przykładzie Fortu Prusy w Nysie. Architektura Krajobrazu, Vol. 41, 30-41, (pkt. 4).
23. Toth, C., Józków, G., Quirk, M., Grejner-Brzezinska, D., 2013. Applying 2D compression methods to LiDAR waveform cubes. Proceedings of the CaGIS/ASPRS 2013 Specialty Conference, Imaging and Mapping for Disaster Management: From the Individual to the Global Community, October 27 – 30, 2013, San Antonio, Texas, USA, online, (pkt. 0).
24. Borkowski, A., Józków, G., 2012. Accuracy Assessment of Building Models Created from Laser Scanning Data. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B3, 253-258, (pkt. 10).
25. Borkowski, A., Józków, G., 2012. Ocena dokładności modelu 3D zbudowanego na podstawie danych skaningu laserowego - przykład zamku Piastów Śląskich w Brzegu. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 23, 37-47, (pkt. 4).
26. Borkowski, A., Perski, Z., Wojciechowski, T., Józków, G., Wojcik, A., 2011. Landslides mapping in Roznow Lake vicinity, Poland using airborne laser scanning data. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 8(3), 325-333, (pkt. 20, IF=0.530).

Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych:

27. Niemiec, M., Józków, G., Borkowski, A., 2009. Monitorowanie zmian ukształtowania powierzchni terenu spowodowanych erozją wodną z wykorzystaniem skanowania laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 19, 333-342, (pkt. 6).
28. Gołuch, P., Borkowski, A., Józków, G., Tymków, P., Mokwa, M., 2009. Application of Digital Terrain Model generated from Airborne Laser Scanning data in Hydrodynamic Modelling. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXXI No. 3, 61-72, (pkt. 6).
29. Borkowski, A., Józków, G., 2008. Filtracja danych lotniczego skaningu laserowego metodą ruchomych powierzchni wielomianowych - weryfikacja metody. Acta Scientiarum Polonorum, s. Geodesia et Dercriptio Terrarum, Vol. 7 No. 2, 15-27, (pkt. 6).
30. Gołuch, P., Borkowski, A., Józków, G., 2008. Badanie dokładności NMT interpolowanego na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. Acta Scientiarum Polonorum, s. Geodesia et Dercriptio Terrarum, Vol. 7 No. 2, 37-47, (pkt. 6).
31. Borkowski, A., Józków, G., 2008. Aproksymacja powierzchni terenu na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego z wykorzystaniem metody aktywnych powierzchni. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 18, 21-30, (pkt. 6).
32. Gołuch, P., Józków, G., 2008. Ocena dokładności NMT interpolowanego na podstawie danych pozyskanych metodami fotogrametryczną i GPS-RTK. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 18, 141-150, (pkt. 6).
33. Borkowski, A., Józków, G., 2008. Airborne Laser Scanning Data Filtering Using Flakes. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII No. B3b, 179-184, (pkt. 2).

34. Borkowski, A., Józków, G., 2007. Ocena poprawności filtracji danych lotniczego skaningu laserowego metodą aktywnych powierzchni. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 17A, 83-92, (pkt. 6).
35. Gołuch, P., Borkowski, A., Józków, G., 2007. Ocena dokładności danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 17A, 251-260, (pkt. 6).
36. Borkowski, A., Józków, G., 2006. Wykorzystanie wielomianowych powierzchni ruchomych w procesie filtracji danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 16, 63-73, (pkt. 6).
37. Józków, G., 2005. Potencjał kartograficzny lotniczych obrazów video. Acta Scientiarum Polonorum, s. Geodesia et Descriptio Terrarum, Vol. 4 No. 2, 79-90, (pkt. 6).

Gregorz Józków