



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

*prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg*

Kraków, 08.06.2022 r.

dr hab. inż. Bartosz Mitka, prof. URK  
Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie  
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji  
Katedra Geodezji Rolnej, Katastru i Fotogrametrii  
Al. Mickiewicza 21  
31-120 Kraków

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Pełki

pt. „Automation of the multi-sensor system calibration for mobile robotic applications”  
„Automatyzacja procesu kalibracji system wielosensorycznego dla aplikacji robotyki mobilnej”

### 1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi uchwała nr 30/2021-2022 Rady dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika Politechniki Poznańskiej z dnia 27 kwietnia 2022 roku oraz pismo Przewodniczącego Rady dyscypliny, Pana prof. dr hab. inż. Wojciecha Szelaąga nr DR-012/42/2022 z dnia 05.05.2022 r.

### 2. Przedmiot i zawartość rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Pełki pt. „Automation of the multi-sensor system calibration for mobile robotic applications”. Praca ma charakter teoretyczno-badawczo-wdrożeniowy i składa się z 6 rozdziałów głównych oraz spisu bibliografii obejmującego 138 pozycji, w tym 1 publikacji współautorskiej Doktoranta i 1 jego repozytorium w serwisie GitHub. Tekst rozprawy liczy łącznie 162 strony, w tym 78 rysunków oraz 5 tabel.

Recenzowana rozprawa dotyczy problematyki opracowywania nowych robotycznych systemów mapowania. W swoich badaniach Doktorant skupił się na metodach zautomatyzowania kalibracji różnych sensorów. Treść rozprawy obejmuje podstawy teoretyczne w zakresie projektowania SLAM oraz optymalizacji z wykorzystaniem algebry Lie’go, sformułowanie metodyki dotyczącej automatycznej kalibracji oraz opisy zastosowania zaproponowanej metodyki w rzeczywistych systemach mapujących wraz z analizą uzyskanych wyników.

W rozdziale 1 Doktorant zawarł opis sensorów stosowanych w naziemnych robotycznych systemach mapujących oraz sposoby reprezentacji zarejestrowanej przez system pomiarowy przestrzeni.

W rozdziale 2 przedstawiono sformułowanie problemu badawczego oraz tezę główną i tezy szczegółowe rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 3 zostały przedstawione kluczowe aspekty poruszanej tematyki takie jak problematyka synchronizacji czasu, wyznaczanie trajektorii, podstawy matematyczne proponowanych algorytmów czy też równania obserwacyjne dla sensorów. Zaprezentowano znane metody rozwiązania opisywanego problemu, jak również Doktorant przedstawił propozycję własnej metodyki automatycznej kalibracji sensorów w systemach mapowania przestrzeni.

W rozdziale 4 przedstawiono przykłady użycia metod i narzędzi opisanych w rozdziale 3 w rzeczywistych systemach pomiarowych o różnej konstrukcji i konfiguracji sensorów.

W rozdziale 5 omówiono szczegółowo trzy przypadki testowania robotycznych systemów mapowania przestrzeni, zrealizowane w różnych środowiskach, z wykorzystaniem różnych platform i sensorów oraz różnych algorytmów.

W rozdziale 6 omówiono najważniejsze etapy i wyniki przeprowadzonych badań, odniesiono się do szczegółowych tez rozprawy doktorskiej, przedstawiono dodatkowe korzyści ze zrealizowanych prac oraz wskazano dalsze kierunki badań.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

#### **3.1. Dobór tematu oraz postawionych celów badawczych**

Jednym z pierwszych mobilnych systemów pomiarowych była platforma o nazwie GPS-VanTM, która została opracowana na początku lat 90-tych XX wieku przez naukowców z Uniwersytetu Stanowego w Ohio. Opracowany system składał się z kodowego odbiornika GPS, dwóch kamer cyfrowych, dwóch kolorowych kamer wideo. Zawierał również dodatkowe sensory nawigacyjne w postaci dwóch żyroskopów i odometru. Wszystkie sensory zainstalowano na dachu pojazdu typu Van, poza odometrem, który przymocowano do każdego z przednich kół pojazdu. Odbiornik GPS dostarczał informacji o położeniu systemu pomiarowego. W razie przerw w ciągłości sygnału, miał być wspierany przez sensory nawigacji zliczeniowej, czyli żyroskopy i odometr. Zastosowanie kamer video miało jedynie charakter archiwizacyjny, gdyż ich położenie względem pozostałych sensorów nie było w żaden sposób określone. Zdjęcia z obu kamer cyfrowych wykorzystano do określenia przestrzennej lokalizacji odfotografowanych obiektów.

Pierwsze rozwiązania laserowe pojawiły się dopiero 1996 roku w systemie TruckMAPTM. Jednak ze względu na początkową fazę rozwoju tej technologii pomiaru, stanowiła ona głównie wsparcie dla kamer cyfrowych.

Od tamtych czasów rozwój narzędzi pomiarowych takich jak skanery laserowe, kamery cyfrowe, odbiorniki GNSS czy też pomiarowe jednostki inercyjne, jak również rozwój algorytmów przetwarzania danych pozwolił na tworzenie coraz bardziej zaawansowanych, często autonomicznych zrobotyzowanych systemów pomiarowych.

Warto podkreślić, że w związku z rozwojem wspomnianych powyżej technologii pomiarowych, w tym zrobotyzowanych systemów mapowania mobilnego bardzo istotne jest zagadnienie kalibracji systemów wielosensorowych. Obecnie stosowane rozwiązania oparte na polach kalibracyjnych lub wyznaczaniu nieznanymi elementami kalibracji wewnętrznej i zewnętrznej w procesie wyrównania obserwacji wymagają często specjalnie spreparowanego środowiska testowego, czasu a przede wszystkim wiedzy eksperckiej, które to czynniki w dużej mierze ograniczają możliwość rozpowszechniania się tego rodzaju systemów.

W związku z powyższym stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta temat jest aktualny i oryginalny, a cel i zakres pracy są jasno zdefiniowane zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. Celowym było więc podjęcie przez Doktoranta badań w zakresie dostarczenia kompletnego zestawu metod, który ma umożliwić budowę i automatyczną kalibrację wielosensorowych systemów mobilnych.

#### **3.2. Teza badawcza**

Biorąc pod uwagę główny cel rozprawy jakim było dostarczenie kompletnego zestawu metod, który ma umożliwić budowę i automatyczną kalibrację wielosensorowych systemów mobilnych., Doktorant sformułował główną tezę rozprawy mówiącą, że *„Automatyzacja procesu kalibracji w mobilnym mapowaniu pozwala na uzyskanie dokładniejszych wyników z systemu mapującego, przy jednoczesnym zmniejszeniu wiedzy eksperckiej wymaganej w procesie kalibracji, oraz zwiększeniu autonomii mobilnych robotów przy zastosowaniu tych systemów w terenie.”*

Uściślając tezę główną zdefiniowano również cztery tezy szczegółowe:

- automatyzacja procesu kalibracji redukuje zapotrzebowanie na wiedzę ekspercką niezbędną do dokładnego pomiaru parametrów kalibracji wewnętrznej i zewnętrznej;
- nowa metoda zmiany kształtu pola widzenia nowoczesnych nieruchomych skanerów LIDAR umożliwia dostosowanie zrobotyzowanych systemów mapowania mobilnego do różnych zastosowań;
- wybrana parametryzacja macierzy obrotów umożliwia „mocną” optymalizację parametrów kalibracji;
- automatyczna kalibracja umożliwia mobilnym robotom długotrwałą inspekcję nieznanego środowiska poprzez redukcję mechanicznych problemów związanych z eksploatacją robota.

Odpowiedzi na przedstawioną przez Doktoranta tezę główną, jak również tezy szczegółowe, zostały zawarte w poszczególnych rozdziałach jak również zestawione syntetycznie we wnioskach z przeprowadzonych badań.

### **3.3. Ocena wartości naukowej rozprawy**

Analizując przedstawione w rozprawie doktorskiej zagadnienia za oryginalne, najważniejsze osiągnięcia naukowe Doktoranta uznają:

1. Wnikliwe przeanalizowanie literatury naukowej z teoretycznymi i praktycznymi zagadnieniami dotyczącymi problematyki poruszanej w rozprawie doktorskiej. Przeprowadzone badania literaturowe przyczyniły się do sformułowania własnego problemu badawczego, celu, tezy i zakresu rozprawy.
2. Opracowanie metodyki kalibracji sensorów w oparciu o algebrę Lie’go i z wykorzystaniem linii Plücker’a, która następnie została zweryfikowana eksperymentalnie.
3. Osiągnięcie aplikacyjnego celu rozprawy, jakim jest określenie metodyki automatyzacji kalibracji systemów wielosensorowych dla robotów mobilnych. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant określił a następnie praktycznie zweryfikował na rzeczywistych, różniących się między sobą, systemach pomiarowych opracowane rozwiązanie w zakresie automatyzacji kalibracji wewnętrznej i zewnętrznej sensorów, jak również ocenił osiągnięte wyniki.
4. Zaprojektowanie, badania i wdrożenia mobilnych systemów mapowania z wykorzystaniem różnych sensorów i z uwzględnieniem wymagań i ograniczeń jakie nakłada konkretne środowisko w którym realizowane są pomiary (np. szyb górniczy). Świadczy to o skuteczności opracowanej w ramach rozprawy doktorskiej metodyki, jej skalowalności i uniwersalności w przypadku wielosensorowych systemów pomiarowych.

## **4. Uwagi krytyczne**

### **4.1. Uwagi merytoryczne**

W wyniku przeanalizowania treści przedstawionej rozprawy można wskazać następujące krytyczne uwagi:

1. Rozdział 1.2.1 LiDAR, str. 2 (20) Doktorant definiuje LiDAR jako metodę pomiarową implementującą technologię impulsową (Time of Flight, ToF). Jednak technologia nie jest

jedyną, która kwalifikuje się do definicji LiDAR. Nie wspomniano w rozprawie o technologii fazowej (continuous wave, CW) powszechnie stosowanej w skanerach naziemnych, czy też technologii triangulacyjnej zarówno światła laserowego jak i strukturalnego. Uważam, że w rozprawie, w części dotyczącej sensorów LiDAR, powinien znaleźć się opis tych technologii.

2. Rozdział 1.2.1 LiDAR, str. 2 zostały użyte określenia Digital Terrain Model (DTM) i Digital Elevation Model (DEM) bez szczegółowego objaśnienia tych produktów. W wielu krajach te dwa sformułowania używane są zamiennie. Proszę o wyjaśnienie przez Doktoranta jaka jest różnica pomiędzy jednym a drugim produktem.
3. Rozdział 1.2.2 Cameras str. 5 i 6 oraz wzory 1.5 i 1.6 brakuje rysunku lub opisu wyjaśniającego definicję trójwymiarowych prostokątnych układów współrzędnych: zewnętrznego i lokalnego kamer (układ i kierunki osi). W nawiązaniu do tego proszę wyjaśnić różnicę w postaci wzorów 1.5 i 1.6 tj. zamianę równań pomiędzy współzrędnymi  $x$  i  $y$ .
4. Rozdział 1.2.5 GNSS str. 13 W pracy znajduje się stwierdzenie „odbiornik GNSS otrzymuje sygnał ze znacznikiem czasu z kilku satelitów geostacjonarnych”. Orbity satelitów globalnych systemów pozycjonowania nie są w większości orbitami geostacjonarnymi. Orbity geosynchroniczne i geostacjonarne są charakterystyczne dla regionalnych systemów nawigacji satelitarnej o ograniczonej ilości satelitów, w celu zapewnienia operacyjności systemu na wybranym obszarze. Wyjątkiem jest tu Chiński system BeiDou w wersji 3 (BDS-3), w którym nominalna konstelacja zawiera 3 satelity geostacjonarne (GEO), 3 satelity geosynchroniczne (IGSO) oraz 24 satelity na średniej orbicie okołoziemskiej (MEO) o inklinacji  $55^\circ$ .
5. Rozdział 1.2.5 GNSS str. 13 Opis technologii pozycjonowania RTK i DGPS. Literatura na której oparł się Doktorant, jest dosyć stara (pozycje z 2008 i 2009 roku). Stąd też używanie starszej nazwy technologii DGPS (Differential Global Positioning System) odnoszącej się do systemu GPS, zamiast obecnie funkcjonującej DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System) i brak wzmianki na temat technologii RTN.
6. Rozdział 3.3.6 Ground truth data sources – Real data, str. 48. Podana przez Doktoranta wartość 1 mm jako precyzja skanera laserowego Z+F Imager 5010 jest błędna. Zgodnie ze specyfikacją techniczną instrumentu jest to precyzja pomiaru odległości dla dalmierza w tym instrumencie. Mówiąc o precyzji instrumentu wykonującego pomiar metodą biegunową należy jeszcze uwzględnić precyzję pomiaru kątów poziomego i pionowego. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że pojęcie precyzji nie jest w metrologii tożsame z pojęciem dokładności. W kontekście rozprawy dotyczącej kalibracji sensorów i mapowania jest to zagadnienie istotne. Proszę więc o wyjaśnienie przez Doktoranta różnicy w pojęciach precyzja i dokładność odnoszących się do systemów pomiarowych.
7. Rozdział 3.4 Camera observation equations, str. 54 i następne. Rozdział opisuje autorskie podejście Doktoranta do kalibracji kamer sferycznych i kadrowych w oparciu o elementy liniowe identyfikowane na obrazach i chmurze punktów. Jednakże w pracy nie zdefiniowano minimalnych warunków dla proponowanego rozwiązania, które muszą być spełnione, aby otrzymane wyniki kalibracji były prawidłowe.

W związku z tym proszę Doktoranta o odniesienie się do następujących kwestii:

- jaka jest minimalna liczba elementów liniowych koniecznych do włączenia do obliczeń;

- czy wzajemne zależności pomiędzy elementami (np. ortogonalność, równoległość) mają wpływ na otrzymywane wyniki;
  - czy występują przypadki szczególne dla których otrzymane rozwiązanie jest niejednoznaczne, lub zagadnienie w ogóle nie ma rozwiązania.
8. Rozdział 4.1 Modeling a mechanical design as a factor graph, str. 66. W rozprawie użyto określenia „Silniki elektryczne poruszają przegubami, a ich aktualna pozycja jest mierzona z wystarczającą precyzją. Jest to więc nieistotne/pomijalne w zagadnieniu optymalizacji.” Określenie wystarczająca precyzja bez podparcia tego stwierdzenia wartościami liczbowymi – w jaki sposób błąd pomiaru tej pozycji przekłada się na wynik wyniki kalibracji nie jest podejściem prawidłowym. Należałoby określić najpierw zakładane/możliwe do osiągnięcia dokładności, a dopiero później określać czynniki istotne i nieistotne na podstawie analizy błędów przez nie generowanych.
9. Rozdział 4.2 Geometry of reflected ray, str. 77. Proszę o wyjaśnienie rysunku 4.12 w zakresie rozrysowania wektorów po dwóch stronach powierzchni lustrzanej.

#### 4.2. Uwagi redakcyjne, edytorskie i językowe

Rozprawa jest napisana poprawnie z prawidłowym układem tekstu, na dobrym poziomie językowym i edytorskim. W tekście rozprawy recenzent doszukał się kilku nieścisłości i drobnych błędów:

1. W spisie rysunków brakuje trzech pozycji, które również nie mają podpisów w tekście rozprawy: 4.14, 4.36, 4.37.
2. Rysunek 4.1 na stronie 64 jest niekompletny.
3. Rysunek nr 4.14?, str. 80, brak podpisu rysunku, brak opisu osi współrzędnych na rysunku pozwalających określić czy mamy do czynienia z rzutem czy z przekrojem.
4. Rysunek 4.15, str. 81. W legendzie ilość miejsc dziesiętnych powinna być ograniczona tylko do wartości znaczących.
5. Rysunek 4.19, str. 86. W legendzie ilość miejsc dziesiętnych powinna być ograniczona tylko do wartości znaczących, brak opisu osi współrzędnych na rysunku z przekrojem.
6. Rysunek 4.24, str. 93. Na rysunku występuje dwukrotnie opis „Capture side „B” zamiast raz A i raz B.
7. Rozdział 4.5 Calibration of a mobile backpack mapping system, str. 97. Błędne odwołanie do rysunku 4.7 – powinno być 4.28
8. Rysunek 4.27, str. 98. Błędy w numeracji elementów w opisie rysunku.
9. Rozdział 4.5 Calibration of a mobile backpack mapping system, str. 101. Błędne odwołanie do rysunku 4.28 – powinno być 4.29
10. Rozdział 4.6.1 Comparison of the equirectangular and perspective model, str. 109 – brak podpisu rysunku 4.36?
11. Rozdział 4.6.1 Comparison of the equirectangular and perspective model, str. 110 – brak podpisu rysunku 4.37?

#### 5. Wnioski

W recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Michał Pełka zaproponował nowe autorskie podejście do problemu automatyzacji procesu kalibracji wielosensorowego mobilnego systemu mapowania. Dodatkowym osiągnięciem aplikacyjnym jest skuteczne zastosowanie proponowanej metodyki w rzeczywistych systemach pomiarowych. Doktorant wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami rozwiązywania problemów

teoretycznych oraz planowania i prowadzenia badań na obiektach rzeczywistych. Doktorant uzyskał oryginalne wyniki badań oraz wykazał, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski.

Należy podkreślić, że Doktorant widzi również kierunki dalszych badań, co świadczy o Jego odpowiednim przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Oceniam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza, że Doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa jest opracowana na dobrym poziomie naukowym i redakcyjnym oraz wnosi wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, a także ma znaczenie praktyczne.

Uwagi krytyczne wymienione w punkcie 4 nie obniżają dobrego, moim zdaniem, poziomu merytorycznego i ogólnej wysokiej oceny dysertacji. Uwagi dotyczą przede wszystkim styku dyscypliny w której specjalizuje się Doktorant z zagadnieniami z szeroko pojętej dziedziny geodezji i mam nadzieję, że przynajmniej w części będą pomocne Doktorantowi podczas przygotowywania prac naukowych w przyszłości.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Michała Pełki pt. „Automatyzacja procesu kalibracji systemu wielosensorycznego dla aplikacji robotyki mobilnej” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018, poz. 1668 z późn. zm.). W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie przedłożonej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę poziom merytoryczny recenzowanej rozprawy doktorskiej oraz wysoką aplikacyjność zaproponowanej metodyki, zweryfikowaną na różnych systemach wielosensorycznych w rzeczywistych warunkach pomiarowych, w tym w skrajnie trudnych warunkach szybu górniczego wnioskuję, aby zgodnie z Regulaminem Rady dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika przyjętym Uchwałą nr 23/2021-2022 z dnia 23 lutego 2022 r. powołana komisja doktorska sformułowała wniosek do Rady dyscypliny o wyróżnienie rozprawy doktorskiej

dr hab. inż. Bartosz Mitka, prof. URK