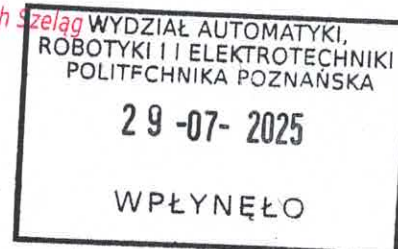


Dr hab. inż. Przemysław Mazurek, prof. ZUT
Wydział Elektryczny
Katedra Przetwarzania Sygnałów i Inżynierii Multimedialnej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg



**Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Poznańskiej**

Tytuł rozprawy: **Efficient problem representations and computational models for 3D laser-based simultaneous localization and mapping**

Autor rozprawy: **mgr inż. Krzysztof Ćwian**

Promotor: **Prof. dr hab. inż. Piotr Skrzypczyński**

Promotor pomocniczy: **Dr hab. inż. Michał Nowicki**

Rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim, a dodatkowo streszczenie pracy jest w języku polskim. Rozprawa zawiera całościowo 118 stron i została podzielona na 7 głównych rozdziałów. Praca zawiera dwa streszczenia (anglojęzyczne i polskojęzyczne), spis skrótów, spis oznaczeń matematycznych oraz spis literatury.

Autor rozprawy brał udział w dwóch projektach:

- „Zaawansowany system wsparcia precyzyjnych manewrów dla kierowców autobusów miejskich jednosegmentowych i przegubowych”, w ramach POIR.04.01.02-00-0081/17-00, realizowanym w okresie 04.2018 – 06.2021;
- „Robotyzacja procesu zwiększania jakości materiału siewnego konopi włóknistej”, w ramach POIR.01.01.01-00-2271/20-00, realizowanym w okresie 09.2021 – 12.2023.

oraz był beneficjentem trzymiesięcznego stażu w Sapienza University of Rome, the RoCoCo (Cognitive Cooperating Robots) Laboratory, Włochy u pana Prof. Griogio Grisettiego w ramach wsparcia NAWA, program STER w okresie 02.2024-05.2024.

Rezultaty prac były częściowo opublikowane w czasopismach:

- Pub1. **K. Ćwian**, M. R. Nowicki, J. Wietrzykowski, and P. Skrzypczyński, “Large-scale lidar slam with factor graph optimization on high-level geometric features” Sensors, vol. 21, no. 10, p. 3445, 2021. IF: 3.847.
- Pub2. I. Esfandiyar, **K. Ćwian**, M. R. Nowicki, and P. Skrzypczyński, "GNSS-Based driver assistance for charging electric city buses: Implementation and lessons learned from field testing" Remote Sensing, vol. 15, no. 11, p. 2938, 2023. IF: 4.2.
- Pub3. M. Nijak, P. Skrzypczyński, **K. Ćwian**, M. Zawada, S. Szymczyk, and J. Wojciechowski, "On the importance of precise positioning in robotised agriculture" Remote Sensing, vol. 16, no. 6, p. 985, 2024. IF: 4.2.

Pub4. **K. Ćwian**, L. Di Giammarino, S. Ferrari, T. Ciarfuglia, G. Grisetti, and P. Skrzypczyński, "MAD-BA: 3D LiDAR bundle adjustment – from uncertainty modelling to structure optimization", IEEE Robotics and Automation Letters, accepted on May 05, 2025.

oraz zaprezentowane na konferencji:

Pub5. **K. Ćwian**, M. R. Nowicki, and P. Skrzypczyński, "GNSS-Augmented LiDAR SLAM for accurate vehicle localization in large scale urban environments" in 17th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), (Singapore), pp. 701–708, 2022.

gdzie Autor rozprawy był współautorem powyższych prac opublikowanych (lub w trakcie procesu publikacji jak Pub4) w ciągu ostatnich czterech lat. Prace mają charakter związany z potrzebami przemysłu (w szczególności firmy Solaris Bus & Coach).

1. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Rozdział 1 pracy to „Introduction” zawierający wprowadzenie do tematyki rozprawy i jej zawartości. W rozdziale tym postawiono tezę naukową oraz zdefiniowane zostały rozpatrywane zagadnienia oraz ogólny kontekst prac. Przedstawiono skrótowo zawartość pracy i powiązane autorskie publikacje.

Rozdział 2 pracy to „Related Work” będący krótkim przeglądem rozwiązań znanych z literatury w szczególności SLAM wykorzystującym LiDAR, grafy czynnikowe, fuzję SLAM z GNSS. Zawarto opis głównych ograniczeń metody SLAM, metody akwizycji za pomocą LiDARa. W zakresie grafów czynnikowych przedstawiono różne metody wykorzystania optymalizacji. Opisano wybrane metody poprawy estymacji położenia dla GNSS i integracji SLAM z GNSS. Rozdział ten ma charakter opisowy i nie wyczerpuje tematu, z uwagi na bardzo szeroki zakres zagadnień.

Rozdział 3 pracy to „Efficient map representations” w którym przedstawiono jedno z głównych ograniczeń metody SLAM z użyciem danych LiDARowych jakim jest rosnący koszt przechowywania i przetwarzania danych pomiarowych. W tym rozdziale zaproponowano metodę PlaneLOAM wykorzystującą cechy wysokopoziomowe. W drugiej części rozdziału zaproponowano metodę bazującą na surfelach – MAD-BA. Rozdział ten przedstawia zaproponowane algorytmy nie tylko do strony opisowej, ale zwłaszcza ukazuje je od strony algorytmicznej wspartej stosownymi formułami matematycznymi.

Rozdział 4 pracy to „Efficient use of GNSS data” gdzie rozpatrywana jest integracja danych GNSS o LiDAR SLAM. Przedstawiono opracowany framework GLAS wykorzystujący istniejącą bibliotekę g²o do optymalizacji grafu czynnikowego. W drugiej części rozdziału rozpatrywana jest możliwość integracji GNSS z wizyjnej odometrii, gdzie również zastosowano optymalizację grafu czynnikowego.

Rozdział 5 pracy to „Experimental evaluation” dotyczący testów LiDAR SLAM z cechami wysokopoziomowymi, z wykorzystaniem dwóch publicznych zbiorów danych (KITTI i Mulran) i metod LOAM (referencyjnej) oraz PlaneLOAM (zaproponowanej). W dalszej części rozdziału zbadano metodę MAD-BA (zaproponowaną) w dwóch wariantach względem rozwiązań: BALM2, HBA, Pose-only, dla baz NC, VBR o KITTI. W końcowej części dla SLAM porównano PlaneLOAM z MAD-BA. Druga część rozdziału dotyczy badań integracji LiDAR SLAM z GNSS z wykorzystaniem bazy UrbanNav w dwóch konfiguracjach odbiorników dla LOAM, RTKLIB, GALS (zaproponowane).

Rozdział 6 pracy to „Practical applications of GNSS”, przedstawiający budowę systemu lokalizacji autobusu przegubowego z użyciem dwóch odbiorników GNSS RTK wraz w wynikami oraz system lokalizacji dla robota dla rolnictwa precyzyjnego wykorzystującego GNSS RTK oraz optyczną odometrię (ORB-SLAM3).

Rozdział 7 pracy to „Conclusions” gdzie zawarto podsumowanie całej rozprawy oraz określono dalszy zakres prac.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Praca zawiera spis literatury, sumarycznie są to 172 pozycje - artykuły z czasopism i konferencji międzynarodowych z tematyki pracy, w większości z ostatniej dekady, w tym także prace z 2025 roku. Praca wpisuje się w postęp naukowy i techniczny.

Autocytowania są to 4 pozycje [35, 53, 89, 160]. Nie są jednak cytowane publikacje Pub2, Pub3 i Pub4 pomimo że Autor podaje, iż jest powiązanie między rozprawą a tym publikacjami, co jest niezbyt zrozumiałe.

Odnosińki internetowe w ramach spisu literatury to 2 pozycje do biblioteki *gtsam* [56] i dokumentacji modułu GNSS [165]. Odnosińki internetowe poza spisem literatury to 6 pozycji do bibliotek programistycznych wykorzystanych w pracy.

Literatura jest anglojęzyczna, co jest zrozumiałe z uwagi na charakter prac.

Literatura nie zawiera patentów.

3. Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydata do stopnia doktora

Celem naukowym pracy było zbadanie, czy możliwe jest sformułowanie problemu estymacji ruchu czujnika LiDAR jako problemu optymalizacji, opartego na reprezentacji mapowej opartej na cechach, uwzględniającego ograniczenia wynikające z pomiarów GNSS, co prowadzić może do wyeliminowania problemów z minimami lokalnymi, powszechnie obserwowanych w algorytmach SLAM opartych na ICP (Iterative Closest Point). Dzięki temu, w połączeniu z wydajną strukturą mapy, możliwa będzie implementacja SLAM skalowalna dla długich trajektorii.

Cel naukowy jest podporządkowany celowemu praktycznemu, jakim jest możliwość implementacji tego typu rozwiązań na potrzeby precyzyjnej lokalizacji i orientacji pojazdów, co ma znaczenie w planowaniu trasy, analizie kontekstu otoczenia oraz ułatwienia realizacji systemów komunikacji człowieka-maszyna, także w nieznanym uprzednio otoczeniu.

Cele pracy koncentrują się wokół algorytmów SLAM z wykorzystaniem czujników LiDARowych, które wydają się optymalnym rozwiązaniem w tego typu zadaniach. W przeciwieństwie do metod bazujących na estymacji głębi za pomocą przykładowo stereowizji, która jest pasywna i silnie uzależniona od oświetlenia (zarówno pory dnia, orientacji kamery względem słońca, itp.), możliwe jest wyznaczenie mapy głębokości w sposób aktywny za pomocą ruchomej wiązki lasera, co pozwala na uzyskanie dużej wiarygodności pomiaru. Główny problem badawczy jest wyraźnie zaakceptowany w pracy – konieczność łączenia poszczególnych pomiarów do budowania sceny 3D, także w warunkach zmiennego otoczenia i podczas jazdy pojazdu. Wykorzystanie algorytmów SLAM prowadzi do szybkiej degradacji estymacji położenia i orientacji pojazdu wraz z poruszaniem się pojazdu. Ważnym problemem jest też łączenie uzyskanych map w przypadku ponownego przecięcia z już przebytą drogą lub dla jazdy w przeciwną stronę. W przypadku otoczenia miejskiego istnieje wiele stałych cech (zwłaszcza budynki), które mogą być wykorzystane do nawigacji, jednak istnieją także obiekty o charakterze zmiennym (inne pojazdy, czy ruszające się na wietrze drzewa).

Poważnym ograniczeniem algorytmów SLAM jest znaczny koszt obliczeniowy wynikający z ciągłego rozrostu danych wraz z poruszaniem się pojazdu. Dane te nie tylko są przechowywane, ale i muszą być przetwarzane w sposób efektywny w czasie rzeczywistym, co jest jedną z motywacji prac Autora.

Cele pracy zostały określone w stosunku do prac innych badaczy z uwzględnieniem aktualnego stanu techniki. Realizacja badań w tym zakresie jest ważna zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i wdrożeniowego, co jest istotnym walorem zadania badawczego.

4. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych oraz ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Tematyka pracy związana jest z systemami LiRADowymi i metodą SLAM. Nie istnieje jedno słuszne podejście dla wykorzystania danych LiDARowych i metody SLAM, dlatego na przestrzeni ostatnich lat wraz z popularyzacją czujników LiDARowych (zmniejszeniem kosztu, poprawą rozdzielczości przestrzennej, szybkości rejestracji danych otoczenia) rośnie liczba publikacji mających na celu zwiększenie efektywności tego typu systemów na potrzeby nawigacji pojazdów autonomicznych lub wspomagania kierowcy. Ważne jest także to, że użycie czujników LiDARowych jest rozwiązaniem skutecznym w kontekście warunków pogodowych w Europie.

Najbardziej wartościowymi i głównym elementami pracy są opracowane algorytmy PlaneLOAM, MAD-BA oraz framework GALS wykorzystujący grafy czynnikowe. Optymalizacja danych na potrzeby SLAM jest kluczowa dla wydajności metody a fuzja danych pozwala na wprowadzenie dodatkowych danych z innych systemów, przykładowo GNSS, czy IMU do procesu optymalizacji. Prace zostały przeprowadzone w sposób poprawy i zweryfikowano działanie algorytmów oraz porównano z innymi pracami oraz między sobą (PlaneLOAM z MAD-BA).

Ocena algorytmów wykonana została według kryteriów obiektywnych (wyniki numeryczne przedstawione w tabelach) oraz w postaci bardziej czytelnej w postaci estymowanych trajektorii pokazanej na rysunkach. Oczywiście zwiększenie rozmiaru baz danych lub uwzględnienie bardziej specyficznych scenariuszy pozwoliłoby na lepszą ewaluację rozwiązań, ale każda praca, w tym naukowa, wiąże się z ograniczeniami czasowymi jej realizacji i dostępnością zasobów do ewaluacji. Uzyskane wyniki zostały też poddane ocenie opisowej i wyciągnięto wnioski szczegółowe dla każdej z metod.

5. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników badań jest wyraźnie widoczne w przedstawionej Rozprawie. Rozwiązania algorytmiczne są użyte w dwóch rozdziałach – nr 5 (badania symulacyjne) i nr 6 (praktyczna implementacja). Oczywiście nie wszystkie metody są wykorzystane w praktycznej implementacji (rozdział 6 dotyczy zasadniczo GNSS) i przykładowo brakuje w nim wyników dla PlaneLOAM, jednak nie powoduje to umniejszenia wartości pracy. Droga od pomysłu do implementacji przetestowanej w warunkach rzeczywistych jest zwykle bardzo długa i nie można oczekiwać by osiągnięte zostały wszystkie poziomy gotowości technologicznej, bo nie taki jest cel pracy naukowej. I tak w przypadku PlaneLOAM przeprowadzono badania w Poznaniu na danych rzeczywistych (rozdział 5) w celu weryfikacji metody oraz określenia czasów obliczeń. Główną wartością pracy jest część algorytmiczna i dotycząca pomysłów na rozwiązanie rzeczywistych problemów. Implementacja ma charakter dodatkowy, ponieważ szybki postęp techniki powoduje zmiany zarówno w rejestracji danych LiDARowych (lepsze LiDARy) oraz obliczeniowej (szybsze komputery).

6. Informacja o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

- N1: W pracy określono ograniczenia metod pomiarowych w różnych rozdziałach, jednak brak wyraźnego podkreślenia kontekstu problemu w odniesieniu do znanego problemu generałów bizantyjskich. W przypadku wykorzystania dwóch metod realizujących podobne zadanie (nawigacja) i fuzji danych z dwóch źródeł pojawia się bowiem problem, które źródło danych jest bardziej wiarygodne i czy nie pojawi się problem, że jedno z nich będzie wręcz zakłócanie przez drugie w określonych warunkach. Warto wyjaśnić na jakiej zasadzie fuzja różnego rodzaju danych pozwala na poprawę estymacji położenia.
- N2: W badaniach empirycznych wykorzystano zbiory danych zawierające zróżnicowane ilościowo scenariusze. Z tego powodu pojawia się pytanie na ile można uogólniać wyniki, określające przewagę zaproponowanych metod względem innych prac przy niewielkich zbiorach danych.
- N3: W pracy założono możliwość wykorzystania GNSS jako źródła danych w fuzji danych do wspomagania SLAM lub też jako głównego źródła danych, które jest wspomagane przez SLAM (zastosowania w rolnictwie precyzyjnym). Jest to założenie bardzo optymistyczne, ponieważ sygnał GNSS ma bardzo małą moc, bardzo łatwo jest go zakłócić oraz jest podatny na spoofing. Brak jest w pracy bardziej krytycznego podejścia w tym zakresie, przykładowo w kontekście metod współcześnie stosowanych do efektywnej redukcji tego problemu, jak odbiorniki z DoA/AoA.
- N4: W przypadku wykorzystania GNSS na potrzeby rolnictwa precyzyjnego założono wykorzystanie systemu RTK z danymi z systemu ASG-Eupos. W przypadku Polskiej stacji referencyjnej są w średniej odległości 70km względem siebie. Jak zatem wpływa odległość od najbliższej stacji na błąd pomiaru położenia i jaka była ta odległość dla rozpatrywanego scenariusza? Warto zauważyć że komercyjne systemy przeznaczone na potrzeby rolnictwa precyzyjnego zalecają stosowanie stacjonarnych modułów RTK bezpośrednio w pobliżu miejsca prac polowych.
- N5: Na rys. 6.9 i 6.10 pokazano błąd ATE między referencją a badanym odbiornikiem. Czy w badaniach uwzględniono kompensację terenu (GNSS Terrain Compensation) ?
- N6: W pracy brak jest odniesień do patentów związanych z tematyką Rozprawy.
- N7: Brak jest informacji o zgłoszeniach patentowych Doktoranta.
- N8: Błędy językowe: w pracy wielokrotnie użyto oznaczenia „Topcon ASG-2”, podczas gdy poprawny symbol to „Topcon AGS-2”; tytuł rozdziału 6.2.3 jest z błędem.

7. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Praca jest rozwiązaniem oryginalnego problemu naukowego, w szczególności zaproponowane rozwiązania: PlaneLOAM, MAD-BA oraz GALS spełniają te wymagania. Problemy naukowe zostały zdefiniowane, przedstawiono ich analizę i zaproponowano rozwiązania algorytmiczne. Przeprowadzono badania empiryczne, i na tyle ile to możliwe, badania empiryczne implementacji z uwzględnieniem analizy wyników. Walidacja wyników została przeprowadzona w stosunku do innych metod zaproponowanych przez innych badaczy na podstawie publicznie dostępnych baz danych.

8. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Praca ma walory naukowe, jak i praktyczne, czego dowodem są publikacje naukowe oraz udział w grantach związanych z tematyką rozprawy. Rozprawa jednoznacznie pokazuje umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Publikacje Autora są w czasopismach związanych bezpośrednio z dyscypliną.

Praca zarówno w zakresie teoretycznym jak i wdrożeniowym, wpasowuje się w dyscyplinę Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

9. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę rangę uzyskanych wyników, poziom naukowy i wdrożeniowy rozprawy doktorskiej, jak i dojrzałość naukową Doktoranta, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Ćwiana spełnia kryteria określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571). Zgodnie z obowiązującymi przepisami prawnymi dotyczącymi szczegółowego trybu przeprowadzenia czynności w przewodach doktorskich, składam formalny wniosek do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej o jej **przyjęcie i dopuszczenie** mgr inż. Krzysztofa Ćwiana do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Przemysław Marzech