

01-09-2025

W PŁY N Ę Ł O

Dr hab. inż. Janusz Będkowski

Warszawa, 31.08.2025

Instytut Podstawowych Problemów Techniki

IPPT PAN

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

z up. doc. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

Recenzja rozprawy Pana mgr. inż. Krzysztofa Ćwiana pt.: „Efficient problem representation and computational models for 3D laser-based simultaneous localization and mapping”

Rozprawa Pana mgr. inż. Krzysztofa Ćwiana pt.: „Efficient problem representations and computational models for 3D laser-based simultaneous localization and mapping” w ramach dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w ramach dziedziny nauk: Nauki Inżynieryjno-Techniczne dotyczy wyników badań Autora związanych z rozwojem technik reprezentacji danych z laserowego systemu pomiarowego 3D oraz z rozwojem zagadnienia SLAM (ang. Simultaneous Localization and Mapping).

Recenzję podzieliłem na osiem części. Pierwsze sześć dotyczy poruszonych zagadnień naukowych/badawczych, analizy źródeł literaturowych, oceny przyjętej metodyki badawczej, ocenę samodzielnego dorobku badawczego oraz ocenę sposobu przedstawiania jak i samych wyników przeprowadzonych prac badawczych. Następnie oceniłem przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych. Końcowe dwa akapity dotyczą uwag redakcyjnych oraz krytycznych uwag końcowych na które oczekuje odpowiedzi Autora.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Autor przedstawił zagadnienia badawcze w rozdziale 1, przy czym Autor koncentruje uwagę na skalowalności, efektywności obliczeniowej oraz niezawodności pracy w rzeczywistych warunkach pracy. Autor wskazuje referencyjną metodę ICP (Iterative Closest Point) mającą tendencję do zbieżności w lokalne minima, kumulują dryft, cechując się pogarszającą się skutecznością oraz prędkością działania podczas pracy z coraz dłuższą trajektorią (problem skalowalności). Autor wskazuje, że algorytmy SLAM zależą od sposobu reprezentacji mapy, trafnie wskazuje na konieczność zastosowania odpowiedniego sposobu przechowywania najbardziej istotnych cech aby zagwarantować skalowalność.

Autor trafnie zauważa, że wiele implementacji SLAM nie korzysta z informacji GNSS. Autor podkreśla, że sygnał GNSS obarczony jest błędem, przez co konieczne jest zastosowanie technik skutecznie niwelujących te błędy. Autor trafnie stwierdza, że kluczowe jest odpowiednie zdefiniowanie problemu optymalizacji jak i dobór wag. Autor wskazuje technikę ang. factor graph SLAM, która wymaga zbadania w kontekście zastosowania danych LiDAR.

W pracy przedstawiono następującą tezę badawczą: ang. „It is possible to formulate the problem of estimating the motion of a LiDAR sensor as an optimization problem over the feature-based map representation, including constraints stemming from GNSS measurements, which leads to elimination of the local minima problems commonly observed for the ICP-based SLAM algorithms. This new formulation combined with an efficient map structure that stores only the data that are suitable for localization allows an implementation of SLAM that is scalable to long trajectories.”. W mojej ocenie zagadnienie badawcze zostało zdefiniowane prawidłowo.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

Bibliografia składa się ze 172 pozycji, pozycje literaturowe przypadają na lata 1991 – 2025.

Autor może pochwalić się znaczącym dorobkiem naukowych w ramach wymienionych 4 pozycji z czasopism punktowanych ze znaczącym udziałem własnym. Sumaryczny współczynnik IF jest imponujący. Na wyróżnienie zasługuje fakt zaakceptowanego artykułu w IEEE RAL. Autor przedstawił wyniki na konferencji ICARCV 2022.

Przegląd literatury został przedstawiony w rozdziale drugim „ang. Related Work”. W tym rozdziale przedstawiono zagadnienie SLAM oraz znaczące zdobycze świata naukowego w tym zakresie wliczając: ICP, NDT, MAD-ICP, PointNet, DeepLO, LOAM, LeGO-LOAM oraz wiele innych. W mojej ocenie ta część opisu literatury jest raczej skromna ale wystarczająca.

Brakuje opisu ang. Factor graph oraz sposobu jego rozwiązania.

3. Czy autor rozwiązał podstawowe zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor opisał „ang. Efficient map representation” w rozdziale 3 skupiając się na ang. High-level planar features. W mojej ocenie wybór jest słuszny dwójako, po pierwsze tego rodzaju cechy są efektywne obliczeniowo oraz gwarantują skalowalność. W mojej cenie wątpliwe jest zastosowania w środowisku nieurbanizowanym (np.: las). Autor dodatkowo rozważa cechy linowe, oznacza to, że tak jak winnych znanych algorytmach możliwe jest skonstruowanie skutecznego algorytmu SLAM opartego m.in. na tych cechach. Warto podkreślić, że równania obserwacyjne są „lekkie” obliczeniowo. Dodatkowo zorganizowanie danych w postaci połączonych podobnych cech znacząco zmniejsza złożoność obliczeniową (liczba równań niekoniecznie zostanie ograniczona ale przestrzeń poszukiwania najbliższych sąsiadów ulegnie znaczącej redukcji w liczbie przeszukiwanych cech).

Autor prawidłowo rozwiązał zagadnienie badawcze definiując ang. Factor graph, równania obserwacyjne wykorzystujące minimalną reprezentację linii oraz płaszczyzny. Pewien niedosyt budzi brak dyskusji zastosowania ang. robust kernel function w ang. loop closure. Nie jest dla mnie zrozumiałe jakim aparatem matematycznym posługuje się Autor biorąc pod uwagę tak wiele rozwiązywanych problemów optymalizacyjnych. Zwracam uwagę, że Autor korzysta z różnych reprezentacji macierzy rotacji. Zastanawiający jest rozdział 3.3 ang. „Bundle adjustment of surfel-based map and poses”. Nie jestem w stanie stwierdzić na podstawie przedstawionego opisu czy mamy do czynienia tylko z równaniami obserwacyjnymi powstałymi bezpośrednio z danych LiDAR. Autor nie przedstawił pełnego ang. Factor graph.

W rozdziale 4 ang. „Efficient use of GNSS data” Autor przedstawił aparat matematyczny dodania tych obserwacji do ang. Factor graph. Pewien niedosyt budzi brak omówienia innych sposobów projekcji. Ten rozdział stanowi rdzeń rozprawy. Autor przedstawia sposób korekty sygnału GNSS stosując technikę ang. Visual Odometry. W mojej ocenie pojawienie się VO powinno być poprzedzone wprowadzeniem metodycznym.

W rozdziale 5 ang. „Experimental evaluation” Autor przedstawia wyniki przeprowadzone w warunkach rzeczywistych. Warsztat badawczy jest imponujący. Złożoność systemów robotycznych z jakimi pracował Autor jest bardzo wysoka. Autor wykazał, że zaproponowana metoda uzyskuje lepsze wyniki w porównaniu do referencyjnej w sensie dokładności oraz złożoności obliczeniowej. W rozdziale 5.2

Autor wykazuje znaczącą poprawę finalnej mapy 3D w porównaniu do metody referencyjnej. W mojej ocenie nie jest to do końca prawidłowe podejście ze względu na fakt, że zaproponowany algorytm działa w trybie off-line a referencyjny w trybie on-line. Algorytm MAD-BA jest zaprojektowany do produkcji mapy 3D a algorytm LOAM do odtwarzania trajektorii i na tej podstawie rekonstrukcji mapy 3D. W mojej ocenie przemilczany charakter finalnej trajektorii uniemożliwia rzetelną ocenę.

W rozdziale 5.3 ang. „Evaluation of LiDAR SLAM with GNSS integration” Autor przedstawił rzetelną analizę przeprowadzonych badań. Słusznie zauważono, że zastosowanie nisko kosztowego odbiornika GNSS bez poprawek RTK ale wykorzystując technikę SLAM umożliwia skuteczną lokalizację.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Autor wskazał pięć pozycji literaturowych bezpośrednio związanych z rozprawą:

1. K. Ćwian et al. „Large-scale lidar slam with factor graph optimization on high-level geometric features”, *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3445, 2021
2. I. Esfandiyar, K. Ćwian et al. “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
3. M. Nijak, P. Skrzypczyński, K. Ćwian et al. „On the importance of precise positioning in robotised agriculture”, *Remote sensing*, vol. 16, no. 6 p. 985, 2024
4. K. Ćwian et al. “MAD-BA: 3D LiDAR bundle adjustment – from uncertainty modelling to structure optimization”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, accepted on May 2025
5. K. Ćwian et al. “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

W mojej ocenie te artykuły pokazują znaczący „impact” Autora w zakresie prowadzonych badań. W związku z tym Autor legitymuje się oryginalnym dorobkiem i pozycjonuje rozprawę na poziomie światowym. Oryginalność rozprawy polega na opracowaniu oraz przeprowadzeniu szeregu eksperymentów usprawnionego systemu SLAM wykorzystującego sygnał GNSS dla różnych urządzeń. Warto podkreślić prace nad skalowalnością opracowanej metody. Na wyróżnienie zasługuje fakt opracowania nowej metody budowy mapy 3D MAD-BA, która może znaleźć zastosowanie w przemyśle.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Autor przedstawił uzyskane wyniki poprawnie i przekonująco. Pewien niedosyt budzi skromny opis zastosowanego aparatu matematycznego w kontekście rozwiązywania problemu optymalizacyjnego. Nie jest dla mnie zrozumiałe kiedy i jak Autor korzysta z różnych reprezentacji rotacji i w jaki sposób dobiera wartości wag dla równań obserwacyjnych w Pose Graph SLAM.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Zadanie SLAM jest fundamentalne w robotyce mobilnej oraz w geodezji. Oceniam przydatność rozprawy pozytywnie także ze względu na fakt znacząco zwiększającej się liczby opracowań literaturowych w tym zakresie. Mimo, że uważa się zadanie SLAM za rozwiązane, to jest jeszcze wiele problemów do rozwiązania w tym, zaadresowane w tej rozprawie zagadnienie skalowalności i niezawodności.

7. Uwagi redakcyjne

W rozdziale 1.4 ang. „Projects and publications” znalazłem brak konsekwencji w przyjętym sposobie redakcji pozycji literaturowych.

8. Krytyczne uwagi końcowe na które oczekuje odpowiedzi Autora

Proszę o przedstawienie ang. Factor graph dla MAD-BA. Jeśli nie ma równań obserwacyjnych dla Pose Graph SLAM proszę o wyjaśnienie co się dzieje z pozami dla których nie mamy żadnych ang. factors.

Proszę o wyjaśnienie reprezentacji rotacji dla problemów optymalizacyjnych omówionych w rozprawie oraz argumentację doboru wartości wag dla rotacji.

Proszę o podanie wartości bazowych dokładności, precyzji, niezawodności, skalowalności oraz końcowych-osiągniętych w ramach realizacji prac badawczych.

9. Ocena końcowa

Rozprawa Pana mgr. inż. Krzysztofa Ćwiana pt.: „Efficient problem representation and computational models for 3D laser-based simultaneous localization and mapping” **spełnia wymagania** określone w art. 187 ust. 1-2 Ustawy, w związku z tym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.