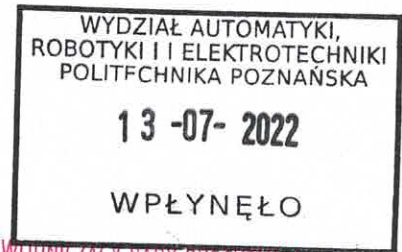


Kraków, 05.07.2022

dr hab. inż. Paweł Piątek, prof. uczelni
Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
30-59 Kraków, Al. A. Mickiewicza 30
e-mail: ppi@agh.edu.pl



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Michała Pełki
„Automation of the multi-sensor system calibration for mobile robotic applications –
Automatyzacja procesu kalibracji systemu wielosensorycznego dla aplikacji robotyki
mobilnej”

Niniejsza recenzja została sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej, pismo DR-012/42/2022 z dnia 5 maja 2022 roku.

Tematyka i tezy pracy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Pełki dotyczy automatycznej kalibracji wieloczujnikowych systemów mapowania przeznaczonych dla robotów mobilnych. Systemy takie są wykorzystywane do mapowania przestrzeni oraz nawigacji robotów. Doktorant wskazał główną tezę pracy brzmiącą w oryginale: „**Automation of the calibration process of the mobile mapping allows to obtain more accurate results from the mapping system, while reducing the expert knowledge required in the calibration process and increasing the autonomy needed by applying those systems in the field using mobile robots**”. Dodatkowo autor przedstawił cztery tezy szczegółowe brzmiące następująco:

- *automation of the calibration process reduces the need for expert knowledge required for accurate measurement of intrinsic and extrinsic calibration parameters,*
- *the new method for reshaping the field of view of modern Solid State LiDARs enables customizing the robotic mobile mapping systems for various applications,*
- *the chosen rotation matrix parametrization enables robust optimization of the calibration parameters,*
- *automatic calibration enables long term autonomous mobile robot inspection of the unknown environment by reducing mechanical issues related to the robot's exploitation.*

Zarówno teza główna, jak i tezy szczegółowe są sformułowane jasno i spójnie.

Zagadnienia takie jak projektowanie, budowanie, eksploatacja, a także kalibracja wielosensorowych systemów mapowania i nawigacji są obecnie tematyką intensywnych badań na całym świecie. Systemy takie są wykorzystywane w pracach nad rozwojem robotyki mobilnej, samochodów autonomicznych, czy też bezzałogowych statków powietrznych. Znaczenie tych rozwiązań rośnie bardzo szybko w gospodarce oraz obronności. Już dzisiaj można powiedzieć, że w najbliższej przyszłości badania w tym zakresie będą prowadzone z dużą intensywnością, a ich wyniki będą miały bardzo duży wpływ na rozwój całych gałęzi gospodarki. Aktywne prowadzenie badań dotyczących mobilnych systemów mapowania jest bardzo istotne dla poszczególnych naukowców i inżynierów, ale także dla całych krajów. Prowadzenie badań nad systemami mapowania oraz ich rozwój są trudne i złożone. Wymagają wiedzy z różnych dziedzin nauki i techniki takich jak: fotogrametria, miernictwo, robotyka, elektronika, modelowanie czy optymalizacja. To co jest największą trudnością takich badań, czyli interdyscyplinarność, jest jednocześnie największą ich zaletą. Są to zagadnienia niezwykle interesujące z naukowego i technicznego punktu widzenia. Prowadzenie tego typu badań oraz wdrażanie ich do praktycznych rozwiązań bez wątplenia jest realizacją idei budowy gospodarki opartej na wiedzy.

Niezwykle istotny aspekt badań nad systemami mapowania to prace nad automatyzacją procesów związanych z pozyskiwaniem danych, ich przetwarzaniem oraz interpretacją. Badania nad automatyzacją kalibracji mobilnych systemów mapowania, które są przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej bardzo dobrze wpisują się w popularne obecnie kierunki badań, ale także w zapotrzebowanie w wielu gałęziach gospodarki.

Struktura pracy

Praca została napisana w języku angielskim i składa się z sześciu rozdziałów oraz streszczenia w języku angielskim, streszczenia w języku polskim, spisu rysunków, spisu tabel, listy skrótów i spisu literatury.

Rozdział pierwszy jest rozbudowanym wprowadzaniem w tematykę będącą przedmiotem pracy. Autor rozpoczyna od ogólnego wprowadzenia w zagadnienia kalibracji systemów mapowania. Następnie przedstawia strukturę pracy. Kolejny podrozdział zawiera opisy sensorów wykorzystywanych w systemach mapowania, czyli: systemów LiDAR, kamer (ze szczególnym uwzględnieniem kamer sferycznych), modułów nawigacji inercyjnej (IMU), systemów odometrii, systemów lokalizacji satelitarnej (GNSS). Rozdział kończy się ogólnym przedstawieniem sposobów reprezentacji map.

Rozdział drugi autor rozpoczyna od sformułowania wymagań dla zrobotyzowanych systemów mapowania. Opisuje, z jakich elementów składowych są zwykle zbudowane i jakie są ich cechy. Następnie formułuje główną tezę pracy oraz cztery tezy szczegółowe.

Rozdział trzeci został zatytułowany „*Methodology*”. Rozdział ten przedstawia od strony teoretycznej zagadnienia związane z mapowaniem terenu. Rozdział został podzielony przez autora na pięć głównych części. Pierwsza z nich, „*Time synchronization*”, skrótowo zarysowuje problem synchronizacji czasu pomiędzy poszczególnymi sensorami systemu mapowania. Kolejny podrozdział, „*Trajectory*” zawiera szczegółowy opis aparatu matematycznego wykorzystywanego do reprezentacji trajektorii. Autor opisuje narzędzia matematyczne takie jak m.in. grupy, grupy Liego czy algebry Liego. Szczegółowo opisano również kwaterniony, które są obecnie jednym

z podstawowych narzędzi służących do opisu orientacji w przestrzeni. Następny podrozdział zatytułowany „SLAM” autor poświęcił wykorzystaniu algorytmów *Simultaneous localization and mapping*. Podrozdział „LiDAR observation equations” przedstawia opis matematyczny obserwacji LiDAR’owych, a kolejny „Camera observation equations” opis matematyczny obserwacji z wykorzystaniem kamer z uwzględnieniem kamer sferycznych.

Rozdział czwarty autor zatytułował „Experimental validation”. W rozdziale tym zostały opisane praktyczne przykłady kalibracji mobilnych systemów mapowania terenu z wykorzystaniem metod i narzędzi, które są przedstawione w poprzednim rozdziale. W podrozdziale 4.1 autor przedstawił przykład kalibracji mobilnego skanera 3D z wykorzystaniem algorytmu factor-graph SLAM. Kolejne podrozdziały 4.2 oraz 4.3 prezentują przykłady kalibracji systemów LiDAR, wielozwierciadłowego oraz z wirującym zwierciadłem. W podrozdziale 4.4 autor opisał budowę oraz kalibrację systemu skanowania zbudowanego ze skanera LiDAR umieszczonego na obracającej się głowicy. Podrozdział 4.5 przedstawia kalibrację mobilnego systemu mapowania złożonego z 3 skanerów laserowych, IMU oraz kamery sferycznej, gdzie zakresy robocze skanerów pokrywały się w niewielkim stopniu. W ostatnim podrozdziale 4.6 przedstawiono przykład kalibracji kamery sferycznej.

Rozdział piąty przedstawia opisy trzech praktycznych przykładów wykorzystania zautomatyzowanej kalibracji wielosensorowych systemów mapowania terenu. Pierwszym przykładem były prace wykonane w technicznym szybie kopalni soli w Wieliczce. Drugim, zawody robotów mobilnych w Elektrowni Jądrowej Zwentendorf w Austrii. Trzecim przykładem jest przykład lokalizacji robota mobilnego z wykorzystaniem metody Monte Carlo.

Praca kończy się podsumowaniem umieszczonym w rozdziale 6. Autor podsumowuje osiągnięte wyniki oraz przedstawia korzyści, które można osiągnąć wykorzystując automatyczną kalibrację systemów mapowania mobilnego. W dalszej części podsumowania autor zwięźle opisał swój wkład pracy. Na koniec przedstawił również możliwości wykorzystania metod sztucznej inteligencji do interpretacji danych jako interesujący kierunek dalszych badań.

Ocena merytoryczna pracy

Przydatność zaproponowanej metodyki automatyzacji kalibracji systemów mapowania została potwierdzona eksperymentalnie. Wnioski z przeprowadzonych eksperymentów są sformułowane logicznie i zrozumiale. Autor wykazał prawdziwość głównej tezy wykazując, że automatyzacja procesu kalibracji jest możliwa i w wyniku takiej zautomatyzowanej procedury można uzyskać poprawę dokładności mapowania przy jednoczesnym ograniczeniu wykorzystania wiedzy eksperckiej. Potwierdzone zostały również tezy szczegółowe, na potwierdzenie czego autor przywołuje w podsumowaniu konkretne fragmenty pracy.

Dobór metod badawczych należy uznać za prawidłowy. Autor przedstawił i opisał odpowiednie narzędzia i metody matematyczne, które mogą służyć do opisu reprezentacji modeli oraz umożliwiają przeprowadzenie kalibracji systemów mapowania. Następnie dla zaprojektowanych przez siebie systemów przeprowadził odpowiednie obliczenia. Z wykorzystaniem tych systemów przeprowadził odpowiednie eksperymenty weryfikujące wybrane metody kalibracji. Dodatkowo autor przedstawił wykorzystanie zaproponowanych metod kalibracji

oraz zaprojektowanych systemów mapowania w rzeczywistych przypadkach pomiarowych, czyli do mapowania szybu kopalni, czy też korytarzy budynku elektrowni jądrowej.

Ciekawym aspektem automatyzacji kalibracji mobilnych systemów mapowania jest uodpornienie systemu na mechaniczne niedoskonałości konstrukcji. W rzeczywistym środowisku mechaniczna platforma systemu jest narażona na wpływ środowiska, czyli np. uderzenia i wstrząsy. Te z kolei mogą powodować deformacje platformy lub niewielkie zmiany wzajemnego położenia sensorów. Może to negatywnie wpływać na jakość mapowania. Innym interesującym przypadkiem opisanym przez autora jest system mapowania, który jest demontowany do transportu. Każdorazowy montaż i późniejszy demontaż mechanicznej platformy nośnej powoduje wzajemne przesunięcia w położeniu sensorów. Kalibracja tego typu systemów mapowania przeprowadzona na stanowisku kalibracyjnym w laboratorium nie będzie uwzględniać powstałych na miejscu pomiarów niedoskonałości mechanicznych. Zautomatyzowana kalibracja przed właściwym pomiarem jest narzędziem, które może być pomocne w takich sytuacjach.

Moim zdaniem, praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę doktoranta w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Przeprowadzone badania, obliczenia, eksperymenty oraz wyciągnięte wnioski świadczą także o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej. Na podkreślenie zasługuje fakt, że praca ma charakter aplikacyjny. Zaprojektowanie urządzeń, przygotowanie i wykonanie eksperymentów wymagało przeprowadzenia szeregu trudnych i wymagających prac, które nie zawsze są doceniane. Potwierdzenie działania algorytmów na danych zebranych z rzeczywistych systemów mapowania oraz w realnych przypadkach pomiarowych jest niewątpliwą zaletą pracy.

Uwagi ogólne

Podczas obrony pracy chciałbym poznać zdanie doktoranta na wymienione poniżej tematy.

1. Jaki jest wpływ błędów synchronizacji czasu pomiędzy sensorami w badanych systemach mapowania na dokładność mapowania?
2. Jaki jest wpływ błędów synchronizacji czasu pomiędzy sensorami w badanych systemach mapowania na działanie proponowanych metod kalibracji?

Uwagi szczegółowe

Praca napisana jest czytelnie i przejrzysto. Autor jednak nie ustrzegł się kilku drobnych błędów. Wybrane uchybienia zamieszczono poniżej.

1. Opisy zamieszczone na niektórych rysunkach (FIGURE 3.10, FIGURE 3.14, FIGURE 4.30) są zbyt małe i przez to nieczytelne.
2. Wydaje się, że dla spójności z pozostałą częścią rozdziału 4 z treści podrozdziału 4.3 powinien być wyodrębniony dodatkowy podrozdział (np. „*Calibration procedure*”) pomiędzy podrozdziałem „*Time synchronisation with a Livox LiDAR*” i „*Results*”.

Należy podkreślić, że wymienione powyżej uwagi mają charakter edycyjny i nie obniżają wartości pracy oraz jej pozytywnej oceny.

Pozostały dorobek

Pozostały dorobek autora (na podstawie bazy Scopus) obejmuje 10 artykułów w czasopiśmie naukowych oraz na konferencjach. Parametry bibliometryczne (według bazy Scopus) na czas pisania recenzji wynosiły: h-index – 3, a ilość cytowań – 35.

Wnioski końcowe

Przedstawione w pracy rozwiązania, przeprowadzone eksperymenty ich wyniki, a także ich opracowanie i wyciągnięte wnioski są oryginalne. Praca wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. W mojej ocenie praca Pana mgr inż. Michała Pełki spełnia wymagania stawiane przez obowiązujące przepisy prawa pracom doktorskim. **Zgłaszam zatem wniosek do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Michała Pełki do publicznej obrony. Wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Pełki.**

Paweł Prętnik