Warszawa, 7 lipca 2022

dr hab. inż. Piotr Szynkarczyk
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy
Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP
piotr.szynkarczyk@piap.lukasiewicz.gov.pl

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA
14 -07- 2022
WPŁYNĘŁO

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

Tytuł:

Automation of the multi-sensor system calibration for mobile robotic applications

Automatyzacja procesu kalibracji systemu wielosensorycznego dla aplikacji robotyki mobilnej

Autor:

mgr inż. Michał Pełka

Promotor:

Dr hab. Janusz Będkowski

Podstawa wykonania recenzji

Recenzję wykonano w związku z pismem DR-012/42/2022 z dnia 05.06.2022. przekazującym uchwałę nr 30/2021-2022 Rady dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika z dnia 27 kwietnia 2022, w sprawie wyznaczenia recenzentów odnośnej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Pełki.

Wybór tematu i zakres dysertacji

Recenzowana rozprawa dotyczy propozycji rozwiązania problemów napotykanych podczas opracowywania zrobotyzowanych systemów mapowania otoczenia. W badaniach opisanych w pracą autor skupił się na metodach zautomatyzowania kalibracji różnych zrobotyzowanych systemów mapowania otoczenia. Wybrana w danej konfiguracji systemu technologia czujników, sposób ich kalibracji, kształt ich pola widzenia i ich wzajemne relacje geometryczne są aspektami, które są kluczowe w ich budowaniu i późniejszej kalibracji.

W pracy zostało to pokazane zarówno z teoretycznego punktu widzenia, jak i przykładowych zastosowań praktycznych. Przeanalizowano istniejącą wiedzę na temat projektowania takich systemów mapowania, zaproponowano optymalizację wyników mapowania z wykorzystaniem algebry Liego. Sformułowano metodykę dotyczącą automatycznej kalibracji – co stanowi własny wkład autora. Przedstawiono kilka realizacji praktycznych systemów ze szczegółowym opisem zastosowanych metod i analizą wyników.

Przedstawiona do recenzji praca liczy 133 strony, nie licząc stron zawierających streszczenia, spis treści, różnego rodzaju listy (np. skrótów) i na końcu pracy – bibliografię (łącznie 28 stron). Rozprawa napisana została w języku angielskim. Praca została napisana bardzo starannie i przejrzyście, a jej układ nie budzi większych zastrzeżeń. Zwraca uwagę staranność edycyjna pracy, która zawiera: spis treści, spis rysunków i zdjęć, spis tabel, spis skrótów, bibliografię (138 pozycji).

Rozprawa swoim zakresem obejmuje zagadnienia dotyczące automatycznej kalibracji wieloczujnikowych systemów czujników do mapowania otoczenia, zwłaszcza robotów mobilnych. Metody te koncentrują się głównie na podstawowych problemach, takich jak: synchronizacja danych online, automatyczna kalibracja i rejestracja danych z wielu pozycji. W celu zweryfikowania zaproponowanej metodologii, zbudowano i zbadano kilka naziemnych robotycznych systemów mapowania. Na uwagę zasługuje fakt, że przeprowadzone eksperymenty zostały przeprowadzone w warunkach rzeczywistych, a nie tylko jako symulacje komputerowe. Z użyciem tak właśnie pozyskanych danych przeprowadzono eksperymentalny w domenie rzeczywistej dowód skuteczności działania zaproponowanej metodologii. Porównano wyniki w postaci map otoczenia, otrzymane bez użycia zaproponowanej metodologii i otrzymanych z jej użyciem, tym samym dowodząc doświadczalnie jej skuteczności.

Zawartość Rozprawy wraz z jej oceną

Recenzowana rozprawa składa się z 6 rozdziałów obejmujących:

1- wstęp

2- sformułowanie problemu

3- metodologię automatyzacji proces kalibracji systemu wieloczujnikowego

4- walidację eksperymentalną rozwiązania

5- zastosowania praktyczne rozwiązania

6- wnioski

Autor rozprawy posiada dorobek publikacyjny i właściwie każdy z rozdziałów związany jest, mniej lub bardziej, z konkretnym artykułem wcześniej opublikowanym.

Rozdział 1 – Wstęp

W pierwszym rozdziale Autor opisuje problem kalibracji wyników pomiarów systemów czujników do mapowania otoczenia robota. W tekście wskazane zostało rozróżnienie pomiędzy synchronizacją danych z różnych czujników i automatycznej kalibracji na kilku poziomach akwizycji tych danych. Wskazano że w literaturze nie są znane metody automatycznej kalibracji systemów wieloczujnikowych, zwłaszcza jeśli występuje brak wcześniejszej znajomości pola kalibracyjnego lub wzorców kalibracyjnych – z czym należy się zgodzić w zakresie określonym przez Autora.

W dalszej części omówione zostały rodzaje czujników stanu otoczenia stosowane w przypadku robotów naziemnych. Omówione zostały szczegółowo następujące rodzaje czujników:

- lidary
- kamery (czujniki wizyjne)
- kamery sferyczne
- czujniki bezwładnościowe (IMU)
- czujniki odometryczne
- czujniki nawigacji globalnej (GNSS)
- często spotykane kombinacje lub modyfikacje powyższych

Powyższe opisy zawierają podsumowanie własności czujników, zasady ich działania, przykłady otrzymanych wyników ich pracy, a także w niektórych przypadkach – modele matematyczne wybranych ich funkcji.

W dalszej części omówione zostały metody reprezentacji otoczenia, czyli tzw. mapy otoczenia. Wśród rodzajów map otoczenia wymieniono:

- mapy zajętości siatki
- mapy 2,5D
- mapy topologiczne
- mapy semantyczne
- mapy wysokiej rozdzielczości

Rozdział 2 – sformułowanie problemu

W rozprawie występuje koncentracja na problemie polegającym na zbudowaniu jak najprecyzyjniejszej mapy otocznia robota mobilnego. Budowanie modelu środowiska robota może odbywać się na różne sposoby, w zależności od zastosowania. Można skalibrować pojedynczy czujnik lub system wielosensorowy z góry, lub parametry kalibracji można później uznać za nieznane zmienne poddawane później optymalizacji. Na rynku można pozyskać wielosensorowe czujniki do budowania map, w pracy podano kilka ich przykładów. Podano wymagania jakie są stawiane przed takimi systemami.

Na tym tle sformułowano tezę rozprawy:

Automatyzacja procesu kalibracji mobilnego mapowania pozwala na uzyskanie dokładniejszych wyników z systemu mapowania, przy jednoczesnym zmniejszeniu wymagań odnośnie wiedzy eksperckiej wymaganej w procesie kalibracji, pozwala także na zwiększanie autonomii robotów mobilnych.

Jako doprecyzowanie sformułowano cztery tezy szczegółowe:

- automatyzacja procesu kalibracji zmniejsza zapotrzebowanie na wymaganą wiedzę ekspercką do dokładnego pomiaru wewnętrznych i zewnętrznych parametrów kalibracji,
- nowa metoda przekształcania pola widzenia nowoczesnych LiDAR-ów umożliwia dostosowanie zrobotyzowanych systemów mapowania mobilnego do różnych zastosowań,
- wybrana parametryzacja macierzy rotacji umożliwia solidną optymalizację parametrów kalibracyjnych,
- automatyczna kalibracja umożliwia długoterminową autonomiczną inspekcję robota mobilnego w nieznanym środowisku poprzez zmniejszenie problemów mechanicznych związanych z budową robota.

Rozdział 3 – metodologia automatyzacji proces kalibracji systemu wieloczujnikowego

W rozdziale tym przedstawiono kluczowe aspekty proponowanej nowej metodologii, czyli: synchronizacja czasu, reprezentacja trajektorii, zagadnienia związane ze SLAM (ang. Simultaneous Localization and Mapping), modelowanie lidaru, modelowanie kamery wizyjnej.

W zakresie synchronizacji czasu opisano metody jej wykonania za pomocą rozwiązań sprzętowych, jak np. GNSS, czy też wykorzystywanego w lokalnych sieciach komputerowych Precision Time Protocol (PTP), lub rozwiązania stosowane sprzętowo w czujnikach, np. IMU. Wskazano w tym rozdziale (słusznie zresztą) że synchronizacja czasu jest jednym z głównych czynników decydujących o jakości odczytów ze złożonych wieloczujnikowych systemów pomiarowych.

Trajektoria po której porusza się system pomiarowy, a dokładniej – dokładność jest odwzorowania, została wskazana także jako jeden z fundamentalnych czynników decydujących o jakości odczytów ze złożonych wieloczujnikowych systemów pomiarowych omawianych w tej rozprawie. W tym podpunkcie wprowadzone zostało zastosowanie algebry Liego jako aparatu matematycznego użytego w proponowanej rozprawie metodzie. *Pewnym niedostatkiem tekstu rozprawy w tym miejscu jest brak wprowadzenie do czego i w jaki sposób algebra Liego będzie wykorzystana, zamiast tego autor od razu zagłębia się w niuanse matematyczne. To zostało wyjaśnione w streszczeniu rozprawy, na jej początku, jednak w tym miejscu odnosi się wrażenie że urwany jest ciąg logicznego przedstawienia zagadnienia.*

Kwestie związane ze SLAM (ang. Simultaneous Localization and Mapping) zostały przedstawione w podrozdziale 3.3. Wskazano kilka różnych metodologii wraz z omówieniem matematycznego ich opisu.

W podrozdziale 3.4 poświęconym lidarom przedstawiono równania opisujące ich działanie, jak również pokrótce przedstawiono algorytm ICP (ang. Interative closest point). W tym miejscu rozprawy pojawia się wstępny dowód twierdzenia autora że użycie algebry Liego jest najlepsze do wykorzystania w działaniu algorytmu ICP, a w konsekwencji w automatyzacji procesu kalibracji.

Podrozdział 3.5 jest poświęcony kamerom. Przedstawiono aparat matematyczny do opisu ich działania, a także ich kalibracji.

Rozdział 4 - walidacja eksperymentalna rozwiązania

W tym rozdziale przedstawiono pewną liczbę scenariuszy w których zastosowano wcześniej opisaną metodologię. Opisane zostały przykłady kalibracji rzeczywistych wielo-sensorycznych systemów pomiarowych.

Jako pierwszy został opisany przypadek dwu-czujnikowego mobilnego skanera 3D. Przedstawione zostały wyniki skanowania przykładowego obiektu przed i po proponowanej w rozprawie automatycznej kalibracji. *Metoda ta przyniosła dobre efekty, jednak pewnymi niedostatkami tego opisu są:*

(a) *ograniczona liczba eksperymentów,*

(b) *brak ilościowej oceny skuteczności proponowanej metodyki auto-kalibracji w stosunku do wyników pozbawionych takiej obróbki, zamiast tego jest opis jakościowy (jest lepiej, ale „o ile lepiej"?)*

(c) *wskazane by było wykazanie że ta metoda jest „o ileś" lepsza od obecnie stosowanych, lub (co zapewne ma miejsce zakładając że to jest auto-kalibracja) wyraźne wskazanie że nie ma obecnie na świecie metod porównywalnych.*

W dalszej części rozprawy opisane zostały eksperymenty z różnymi rodzajami lidarów (lidarem sferycznym i lidarami obrotowymi). Opisano procedurę kalibracyjną, a także przedstawiono porównania wyników pomiarów (wielopunktowych skanów) z auto-kalibracją, bez auto-kalibracji, w zestawieniu z rzeczywistością. Przedstawione wyniki wskazują znaczącą poprawę uzyskanych wyników skanów po zastosowaniu proponowanej w rozprawie metody. *Jednak i w tym przypadku mają zastosowanie uwagi opisane powyżej.*

Podrozdział 4.5 poświęcony jest auto-kalibracji mobilnego plecakowego systemu skanującego. System ten składa się z kilku czujników: 3 skanery laserowe, kamera sferyczna, IMU (czujnik bezwładnościowy). Ten system jest najbardziej złożony z omawianych w rozprawie i daje w wyniku najbardziej złożone mapy otoczenia. W tym przypadku przedstawiono już nie pojedyncze wyniki skanowania z użyciem proponowanej w rozprawie metody auto-kalibracji.

Rozdział 5 - zastosowania praktyczne rozwiązania

W tym rozdziale kontynuowane są opisy eksperymentów ze skanami wieloczujnikowymi po zastosowaniu proponowanej w rozprawie metody auto-kalibracji, tym razem jednak w przypadkach zastosowania różnego rodzaju platform mobilnych, przy realizacji wybranych scenariuszy użycia systemu w rzeczywistości. Przedstawiono wyniki badań w scenariuszach:

(a) skanowania kopalni,

(b) mapowanie wnętrza elektrownia jądrowej,

(c) lokalizowania pozycji robota mobilnego na podstawie odczytów z mapy otoczenia.

Wszystkie trzy scenariusze zostały rzetelnie opisane, łącznie z wynikami badań. *Tu także występuje pewien niedosyt w zakresie liczby przeprowadzonych eksperymentów i opracowania ilościowej oceny wyników z wykorzystaniem metod statystycznych. Z drugiej jednak strony eksperymenty z użyciem rzeczywistego robota są czasochłonne i najpewniej nie było możliwości przeprowadzania długich eksperymentów w kopalni i w elektrowni jądrowej. Ponadto w rozprawie przedstawiono sporą jednak liczbę różnorodnych scenariuszy, dowodząc powtarzalnej skuteczności proponowanej metody auto-kalibracji.*

Rozdział 6 – wnioski

We wnioskach Autor przedstawia twierdzenie że rozprawa przedstawia dowód przedstawionej tezy. Ponadto Autor stwierdza że wartością dodaną zaproponowanej metodyki jest możliwość korygowania wyników pomiarów ze względu na niedoskonałości stanu mechaniki systemu pomiarowego (każdorazowo inna konfiguracja systemu w wyniku: demontażu/montażu, zderzeń z przeszkodami).

W podrozdziale 6.1 przedstawiono wkład rozprawy w zagadnienia mapowania robotów mobilnych i pokrewnych zastosowań, a także wskazano drogi którymi można prowadzić dalsze badania w tej tematyce.

Podsumowanie recenzji

Do istotnych i oryginalnych elementów rozprawy zaliczam:

1. Opracowanie oryginalnej metody automatyzacji procesu kalibracji systemu wielosensorycznego dla aplikacji robotyki mobilnej,
2. Wykorzystanie w w/w metodzie rozbudowanego aparatu matematycznego,
3. Przetestowanie w/w metody w praktycznych zastosowaniach i uzyskanie dobrych rezultatów.

Uwagi krytyczne zawarte są powyżej w recenzji i są zaznaczone *podkreśloną kursywą*.

Uwag redakcyjnych nie mam, praca jest napisana i wyedytowana z wyjątkową starannością.

Wnioski końcowe

Mgr inż. Michał Pełka wykazał się odpowiednią wiedzą z zakresu robotyki, czujników stanu otoczenia robotów, a także aparatu matematycznego do modelowania i optymalizacji zjawisk związanych z tymi obszarami badawczymi. Wykazał się także zdolnością do twórczej analizy otrzymanych wyników.

Przedstawione w niniejszej recenzji uwagi krytyczne, w głównej mierze mające charakter marginalny lub polemiczny, w niewielkim jedynie stopniu obniżają bardzo wysoką ogólną ocenę przedstawionej rozprawy.

Stwierdzam, że praca p.t. "Automation of the multi-sensor system calibration for mobile robotic applications" (Automatyzacja procesu kalibracji systemu wielosensorycznego dla aplikacji robotyki mobilnej) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym obowiązującą aktualnie w Polsce.

Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy recenzowanej rozprawy w połączeniu z dużym potencjałem aplikacyjnym zaproponowanej metody oraz dorobek naukowy Autora, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Piotr Szczepaczyk