

Tytuł, stopień, imię i nazwisko
dr hab. inż. Bogdan Kwolek, prof. n. AGH



data 08.05.2018

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Methods for the fusion of quantitative and qualitative information using factor graph optimization for the simultaneous localization and mapping problem

Autor rozprawy: mgr inż. Michał Nowicki

1. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska dotyczy jednoczesnej budowy mapy środowiska oraz lokalizacji robota lub osobnika w oparciu o pobierane i analizowane na bieżąco dane z sensorów (ang. SLAM). Prace badawcze dotyczyły zagadnień lokalizacji robotów mobilnych oraz ludzi z wykorzystaniem danych wielomodalnych w środowiskach zamkniętych (ang. indoor). Celem zwiększenia precyzji lokalizacji oraz niezawodności systemu odpowiedzialnego za lokalizację wykorzystywano zarówno informację o charakterze ilościowym oraz jakościowym. Zaproponowano metody łączenia informacji ilościowej oraz jakościowej w oparciu o techniki optymalizacji grafu ograniczeń, które umożliwiły także wykrywanie błędnych oraz nieprecyzyjnych obserwacji. Dla robota wyposażonego w sensor RGB-D zaproponowano kompletne rozwiązanie dla estymacji odometrii w oparciu o sekwencje obrazów oraz map głębi. Opracowany system odometrii wykorzystany został w systemie SLAM opartym na pozach sensora oraz systemie SLAM wykorzystującym cechy. W zaproponowanym systemie do lokalizacji osoby wykorzystywano sensory osobistego urządzenia mobilnego. Przebadano użyteczność szeregu źródeł informacji, a w szczególności danych pochodzących z sensorów inercyjnych, barometrów, nadajników Wi-Fi oraz znaczników, dzięki którym określano orientację sensora, zliczano kroki, wykrywano zmianę piętra oraz określano zgrubną pozycję oraz pozę sensora. Dzięki umiejętnemu powiązaniu informacji o charakterze ilościowym z informacją o charakterze jakościowym, m.in. dotyczącej ruchu na schodach lub windach, wynikającej z planów budynków i pomieszczeń, a także pochodzącej od użytkownika, możliwe było zbudowanie precyzyjnych systemów lokalizacji osobistej. Wynikiem końcowym rozprawy są kompletne systemy, w których wprowadzono szereg znaczących usprawnień oraz rozwiązania o charakterze bardziej ogólnym. Nowatorskie rozwiązania dotyczą w szczególności probabilistycznej reprezentacji informacji i wiedzy o charakterze jakościowym w sposób, który umożliwił wykorzystanie ich wraz z informacją o charakterze ilościowym w algorytmach optymalizacji nieliniowej, wyrażonej za pomocą grafu ograniczeń. Oryginalna jest przebadana i zweryfikowana praktycznie koncepcja wykorzystania grafów do lokalizacji osobistej, dzięki której otwiera się szerokie pole do dalszych badań oraz rozbudowania zaproponowanych rozwiązań, umożliwiających m.in. usuwania błędnych pomiarów, a także korekty poprzednich pozycji osobnika w oparciu o bardziej aktualne dane. Opracowane rozwiązania oraz algorytmy przebadano na ogólnie dostępnych repozytoriach danych, własnych danych, a także porównano eksperymentalnie z metodami pokrewnymi. Warto odnotować, że Autor udostępnił kody źródłowe. Praca ma charakter badawczo-doświadczalny. Zasadniczym celem naukowym było opracowanie metod reprezentacji informacji oraz fuzji informacji oraz danych. Wyniki badań eksperymentalnych są przekonujące i inspirujące. Badania doświadczalne jednoznacznie wskazują na przewagę zaproponowanych rozwiązań nad aktualnie dostępnymi rozwiązaniami i/lub ich przydatność w praktyce.

Teza pracy została postawiona w rozdziale pierwszym. Teza wyraża się w przekonaniu iż dzięki wprowadzeniu do systemu SLAM ograniczeń wynikających z informacji o charakterze ilościowym o obserwacjach indywidualnych cech lub wynikających z informacji o charakterze jakościowym o stanie lub pozycji agenta, stworzona zostanie możliwość powiązania oraz połączenia różnych informacji o odmiennym charakterze dla potrzeb SLAM. Dzięki temu nastąpi poprawa dokładności estymacji trajektorii agenta oraz zwiększenie krzepkości systemu SLAM. Teza naukowa jest oryginalna, jest jasno postawiona i konsekwentnie rozwijana w całej rozprawie w formie hipotez badawczych. Znaczenie postawionej tezy wynika z tego, że jak zauważa doktorant, mimo znaczącego zaawansowania badań nad systemami SLAM, obecnie brak jest systemów spełniających wymagania użytkowników w obszarze lokalizacji indywidualnej w pomieszczeniach zamkniętych w oparciu o informacje, które uzyskać można z sensorów urządzeń mobilnych lub dzięki możliwościom współczesnych urządzeń mobilnych. Prawdziwość tezy została wykazana empirycznie w eksperymentach z jasno określonymi scenariuszami oraz kryteriami oceny proponowanych rozwiązań. Tematyka rozprawy jest w pełni uzasadniona, interesująca i aktualna. Problematyka podjęta w rozprawie ma duże znaczenie zarówno poznawcze, jak i użytkarne. Proponowane rozwiązania są oryginalne.

2. Rozprawa napisana jest w języku angielskim. Praca jest dość obszernym studium, bo liczącym aż 210 stron studium naukowym. Składa się z 7 rozdziałów, podsumowania, bibliografii oraz dwóch dodatków w których zamieszczono skróty oraz oznaczenia. W rozprawie odwołano się do 258 pozycji bibliograficznych. Treść rozprawy odpowiada tematowi określonemu w tytule, następstwo rozdziałów jest właściwe. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do problematyki pracy. Rozdział drugi poświęcono problemowi lokalizacji w robotyce. W omawianym rozdziale omówiono pokrewne prace, zaprezentowano własne rozwiązanie oraz zagadnienia związane z implementacją. W rozdziale trzecim zaprezentowano problematykę lokalizacji osobistej w kontekście proponowanych rozwiązań oraz istniejącego stanu wiedzy. W kolejnym, czwartym rozdziale przedstawiono autorskie rozwiązania oraz algorytmy, dzięki którym powstała możliwość wykorzystania informacji jakościowej, w szczególności w systemach lokalizacji indywidualnej w pomieszczeniach zamkniętych. Koncepcja włączenia informacji o charakterze jakościowym do algorytmu optymalizacyjnego z ograniczeniami w formie grafu jest oryginalna. Proponowane koncepcje oraz rozwiązania analizowano w świetle możliwości wynikających z rozpoznawania zachowań robotów oraz ludzi, detekcji obiektów typu schody, windy, itp., detekcji stanu obiektów zainteresowania, np. otwartych drzwi oraz informacji wynikających z planów pomieszczeń, rozpoznania domknięcia pętli, czy też informacji przekazanych przez użytkownika. W kolejnych trzech rozdziałach omówiono przebieg oraz wyniki badań eksperymentalnych. Podrozdziały, w których prezentowane są wyniki badań eksperymentalnych kończą się konkluzjami. W rozdziale piątym zawarto wyniki uzyskane w zakresie badań nad algorytmami lokalizacji robotów w oparciu o mapy RGB-D. Rozdział szósty poświęcono omówieniu wyników uzyskanych przez proponowane algorytmy dla lokalizacji osobistej. W rozdziale siódmym zaprezentowano wyniki uzyskane przez algorytmy wykorzystujące informację o charakterze jakościowym. W tej części pracy każdy z rozdziałów zawiera omówienie zbiorów danych, wyniki badań eksperymentalnych oraz analizę otrzymanych wyników. Wyniki badań eksperymentalnych są rzetelne i przekonujące. W ostatnim rozdziale zawarto podsumowanie pracy, zaprezentowano wnioski wynikające z badań, najważniejsze oryginalne osiągnięcia autora rozprawy oraz plany dalszych prac. Wnioski zaprezentowano w kontekście postawionej tezy badawczej oraz wynikających z niej hipotez badawczych. Wnioski prezentowane w podsumowaniu rozprawy mają silne oparcie w proponowanych rozwiązaniach oraz uzyskanych wynikach empirycznych.

Prezentacja problematyki pracy jest wyczerpująca. Rozdziały pozostają w odpowiednim związku przyczynowo-skutkowym. Lektura rozprawy pozwala prześledzić realizację przyjętego celu. Zestawienie oryginalnych osiągnięć jest rzetelne i umożliwia określenie oryginalnego wkładu Autora w rozwój dyscypliny naukowej.

3. Do wartościowych i oryginalnych elementów pracy zaliczyć należy koncepcję wykorzystania optymalizacji grafów ograniczeń w systemach optymalizacji osobistej. Na oryginalny dorobek składa się także nowe metody reprezentacji informacji, które umożliwiają przekształcenie informacji o charakterze jakościowym do formy języka wnioskowania probabilistycznego. Warte odnotowania są modyfikacje, których istota sprowadza się budowy grafu pozy w oparciu o pewną liczbę ostatnich póz sensora. Na uwagę zasługuje także zaproponowany algorytm krokomierza, który opracowano z myślą o wykorzystaniu go w systemie lokalizacji osobistej. Opracowany algorytm ma pewne niedoskonałości, gdyż jak zauważa Autor niniejszego studium, wiele lat temu opracowano rozwiązania adaptacyjne dla lepszej personalizacji krokomierza. Proponowany algorytm do lokalizacji osobistej jest oryginalny. Nowatorskie są metody łączenia informacji ilościowej oraz jakościowej w oparciu o techniki optymalizacji grafu ograniczeń, dzięki którym uzyskano możliwość wykrywania błędnych oraz nieprecyzyjnych obserwacji. Propozycja wykorzystania informacji wynikającej z planów budynków i pomieszczeń, a w szczególności wykorzystania informacji o układzie i położeniu ścian w optymalizacji grafów ograniczeń jest nowatorska oraz inspirująca. Wykorzystanie zbiorów rozmytych do modelowania nieprecyzyjnych danych w kontekście przyjętego podejścia do lokalizacji osobistej jest inspirujące. Do istotnych osiągnięć zalicza się także nowa hyper-krawędź, dzięki której uzyskano możliwość wykorzystania informacji o układzie i położeniu ścian we wspomnianym algorytmie optymalizacyjnym. Na oryginalny dorobek składa się także zmodyfikowany algorytm FAB-MAP, który wykorzystany został do lokalizacji osobistej oraz zmodyfikowany OpenABLE, który został szerzej zaprezentowany w znaczącej publikacji w czasopiśmie Wireless Personal Communication. Warto podkreślić, że nakłady obliczeniowe zaproponowanego algorytmu FastABLE nie zależą wprost od długości okna i tym samym proponowany algorytm jest szybszy od pierwowzoru. Warte odnotowania są także zaproponowane rozwiązania do analizy spójności grafu.

Ewaluacja proponowanych rozwiązań realizowana była na powszechnie wykorzystywanych zbiorach TUM RGB-D, ICL-NUIM, a także na własnym zbiorze PUTKK. Realizowano także badania na własnym robocie krocącym PhantomX. Wyniki odniesiono do wyników uzyskiwanych przez pokrewne i konkurencyjne algorytmy. Wyniki badań eksperymentalnych są spójne, przekonujące i należyście udokumentowane.

Praca wzbogaca naszą wiedzę, jest inspirująca i stanowi bardzo dobry materiał do dalszych prac. Rozwiązania zaproponowane w pracy są całościowe i mają nowatorski charakter. Autorskie propozycje rozwiązań wskazują na dobrą znajomość zagadnień związanych z przedmiotem rozprawy oraz na dobre wyczucie istoty podjętych problemów naukowych. Podjęty temat ma istotne walory praktyczne oraz poznawcze.

4. Rozprawa zredagowana jest poprawnie, w sposób zrozumiały, z właściwą systematyką rozwiązywanych problemów naukowych. Praca posiada przejrzystą szatę graficzną, a wywód poprowadzony jest logicznie. Drobnym niedociągnięciem są zbyt duże etykiety rysunków w porównaniu do opisów osi na wykresach. Przy starannym przejrzaniu rozprawy dostrzegłem, że Autor popełnił nieliczne i drobne błędy stylistyczne, językowe czy edytorskie, np.: *whereas edges e_{ij} represent optimization function*; in paragraph 3.5.3 (str. 44); *the information has to be detected* (str. 59); BVOW (str. 74); brak odwołania w tekście do Rys. 4.13; *but in contrast, ...* (str. 75) - nie wynika wprost "w przeciwieństwie do czego", *the obtain measures ...* (str. 80); *the scene created based on the basis ...* (str. 159). Na str. 72 Autor używa pojęcia *binary bag-of-words*. Na str. 73 użyto sformułowania: *The created vocabulary is then used to find the probabilistic model* (stosowniejšie byłoby użycie zwrotu *to train* lub *to learn*). Na str. 5 niezbyt szczęśliwie użyto zwrotu *"but it allows"* (bardziej zasadne byłoby użycie *since*, *because* lub w ostateczności *as it allows*). Na str. 20 Autor wspomina o modyfikacjach algorytmu RANSAC, nie wyjaśniając dość precyzyjnie jakie konkretnie modyfikacje wprowadzono we wspomnianym algorytmie. Przy omawianiu technik, które zwykle polepszają skuteczność algorytmu RANSAC niezbyt szczęśliwie użyto sformułowania *as it means*. Co więcej, w tym samym

zdaniu użyto słowa system, nie wyjaśniając przy tym o jaki system tak naprawdę chodzi. Na str. 46 nie zaprezentowano funkcji celu dla algorytmu PSO, brak jest wzmianki o inicjalizacji algorytmu, ograniczeniach na prędkość cząsteczek, parametrach algorytmu (liczba cząsteczek, topologii roju, parametrach c_1 , c_2 i innych, warunkach stopu). Na stronie 80 użyto zwrotu recognition sequence zamiast powszechnie wykorzystywanej test sequence.

Mając na względzie znaczący postęp odnotowany w ostatnich latach w obszarze SLAM, pracy nie zaszkodziłoby zacytowanie ostatnio opublikowanych prac przeglądowych:

- Taketomi et al.: "Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016", IPSJ Trans. on Computer Vision and Applications, Springer, 2017.
- Bresson et al.: "Simultaneous Localization and Mapping: A Survey of Current Trends in Autonomous Driving", IEEE Trans. on Intell. Vehicles, 2017.
- Zhao et al.: "A Survey of Visual SLAM Based on Deep Learning", Robot, 2017.

Pracy nie zaszkodziłaby bardziej dogłębna analiza alternatywnych solverów dla g2o (szersze rozwinięcie treści na str. 7). Od strony poznawczej pracę wzbogaciłoby bardziej dogłębne odniesienie się do podejść, w których nie wykorzystuje się BA, g2o i technik pokrewnych. Wartość pracy podniosłoby szersze odniesienie się do wyników uzyskiwanych przez metody, które a terminologii angielskiej znane są pod nazwą direct SLAM. Interesujące byłoby także szersze odniesienie się do potencjalnych możliwości technik uczenia głębokiego, w szczególności w zakresie analizy semantycznej sceny oraz percepcji 3D.

Mając na względzie znaczący postęp jaki dokonał się w obszarze SLAM dzięki wykorzystaniu sensora ruchu Kinect do akwizycji obrazów RGB-D, rodzi się pytanie o charakterze dyskusyjnym, czy nie należałoby rozważyć wykorzystania map głębi w systemach lokalizacji osobistej. Warto przy tym wspomnieć, że niektóre modele smartfonów wyposażone są w stosowne sensory (zob. także sformułowanie użyte w pracy: "smartphones are equipped with a single RGB camera and no depth information is available."). W kontekście zrealizowanych prac badawczych na robocie kroczącym, pracy nie zaszkodziłoby szersze odniesienie się do wpływu szumów wynikających z ruchu robota (w szczególności w scenariuszach z szybkimi obrotami sensora) na precyzję SLAM.

Powyższe uwagi w najmniejszym stopniu nie umniejszają ogólnej wysokiej oceny pracy oraz wartościowych osiągnięć, a ukierunkowane są na uczynienie z bardzo dobrej rozprawy jeszcze lepszej.

5. Jak wynika z powyższego, z konieczności pobieżnego przeglądu autorskich rozwiązań, praca przyczynia się do znaczącego rozwoju dyscypliny związanej z tematyką rozprawy. Wkład Autora w rozwój dyscypliny został należycie udokumentowany. Reasumując, stwierdzam, iż Pan mgr inż. Michał Nowicki wykazał się znaczącą wiedzą w zakresie widzenia komputerowego oraz przetwarzania sygnałów, algorytmów optymalizacyjnych oraz metod lokalizacji. Bez wątpienia Autor rozprawy wykazał się znajomością literatury z zakresu swojej specjalizacji, jak i umiejętnością właściwego jej wykorzystania. Tło badawcze jest przedstawione w sposób kompleksowy i przystępny, pozwalając na łatwe umiejscowienie uzyskanych wyników. W moim głębokim przekonaniu analiza problemu jest gruntowna. Zawarte w niej rozwiązania są oryginalne i zostały zaprezentowane w logicznym układzie i całościowym ujęciu. Sposób analizy problemu świadczy o głębokim zrozumieniu podjętego zagadnienia. Doktorant sformułował oryginalną tezę badawczą i wykazał jej prawdziwość zgodnie z zasadami naukowymi. W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr inż. Michała Nowickiego spełnia z wyraźnym nadmiarem wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim, zarówno pod względem zawartości, jak i formy. Stwierdzam niniejszym, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia z nadmiarem kryteria określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65/2003, poz. 565 z późn. zm.). Stąd wnoszę o dopuszczenie Pana Michała Nowickiego do dalszych czynności

przewodu doktorskiego w dyscyplinie naukowej robotyka. Proponuję także z wielką przyjemnością wyróżnienie niniejszej rozprawy. Wniosek o wyróżnienie motywuję wysoką jakością i pionierskim charakterem zrealizowanych badań naukowych, nowatorstwem oraz trafnością poczynionych obserwacji, a także użytecznością opracowanych rozwiązań. Pan M. Nowicki kierował grantami przyznanymi mu w ramach programów Preludium oraz Diamantowy Grant, realizował badania w granicie NCN oraz był współautorem w pięciu pracach opublikowanych w czasopismach z IF (m.in. MVA, AMCS, IEEE Sensors).

Bożdana Kwadek