WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 14 -05- 2018
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
prof. dr hab. inż. Zbigniew Nadolny

Zielona Góra, 10 maja 2018 r.

prof. dr hab. inż. Dariusz Uciński
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Uniwersytet Zielonogórski

RECENZJA
rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Nowickiego
pt. *Methods for the fusion of quantitative and qualitative information using factor graph optimization for the simultaneous localization and mapping problem*
opracowana na wniosek Rady Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej

I. Obszar problemowy rozprawy

Efektywne rozwiązanie wielu zadań przewidzianych do wykonania przez roboty mobilne, zwłaszcza z zakresu transportu, poszukiwań i ratownictwa, wymaga mapy środowiska. Dostępność dokładnej mapy pozwala na projektowanie systemów, które mogą działać w złożonych środowiskach tylko w oparciu o czujniki pokładowe, bez polegania na zewnętrznym systemie odniesienia, jakim jest np. GPS. Pozyskanie map w pomieszczeniach budynków w warunkach braku dostępności sygnału GPS stało się w związku z tym jednym z głównych tematów badań robotyki mobilnej w ciągu ostatnich dziesięcioleci. Syntezę mapy w warunkach niepewności pozy robota określa się jako jednoczesną lokalizację i budowę mapy (*ang.* simultaneous localization and mapping, SLAM). Pomimo tego, że jest to zadanie nadzwyczaj trudne pod względem algorytmicznym, wypracowano szereg różnorodnych podejść, które można sklasyfikować jako oparte o filtrację lub wygładzanie. Te pierwsze traktują problem jako estymację stanu stanu na bieżąco, przy czym stan systemu składa się z aktualnej pozycji robota i mapy. Estymatę ulepsza się przez uwzględnianie kolejnych nowych pomiarów. Popularnymi technikami asymilacji danych są tu filtry Kalmana i filtry cząsteczkowe. Aby podkreślić ich naturę przyrostową, określa się je zazwyczaj metodami SLAM on-line. Z kolei podejścia oparte o wygładzanie estymują pełną trajektorię robota z pełnego zestawu pomiarów. Odnoszą się one do tzw. pełnego problemu SLAM i zazwyczaj polegają na technikach minimalizacji kryteriów najmniejszej sumy kwadratów błędów.

Bardzo intuicyjnym podejściem do rozwiązania problemu SLAM jest sformułowanie oparte o grafy ograniczeń. Prowadzi ono do konstrukcji grafu, którego wierzchołki reprezentują pozy robota lub położenia znaczników, a krawędzie między wierzchołkami kodują pomiar czujnika

ograniczający łączone pozy. Oczywiście, ograniczenia tego typu mogą być ze sobą sprzeczne z uwagi na obecność zakłóceń pomiarowych. Po skonstruowaniu takiego grafu kluczowym problemem jest określenie konfiguracji wierzchołków w sposób maksymalnie spójny z pomiarami, co prowadzi do problemu minimalizacji odpowiedniej funkcji błędu. Tego typu sformułowanie zaproponowali Lu i Milios w 1997 r., jednak duża złożoność obliczeniowa samego problemu optymalizacyjnego spowodowała, że popularność zdobyło ono dopiero w ostatniej dekadzie, wraz z szerszą dostępnością efektywnych kodów numerycznej algebry liniowej ukierunkowanych na macierze rzadkie. Uniwersalne metody oparte o sformułowania grafowe odpowiadają najnowszemu stanowi wiedzy w dziedzinie SLAM, wykazując się zarówno wysoką szybkością, jak i dokładnością.

Pewna dojrzałość osiągnięta przez metody grafowe nie oznacza bynajmniej, że zmierzono się ze wszystkimi problemami, jakie na tym polu przynoszą zastosowania, tym bardziej że gwałtowny rozwój sensoryki i urządzeń mobilnych generuje coraz to nowe możliwości zastosowań techniki SLAM wraz z towarzyszącymi im wyzwaniami. Pewne klasy robotów wymagają budowy mapy do nawigacji w trzech wymiarach przestrzennych i z sześcioma stopniami swobody. Jeszcze ambitniejszym zadaniem staje się lokalizacja osób wyposażonych w nowoczesne urządzenia mobilne (przede wszystkim smarftony). Przyśpieszenie rozwoju i powstanie nowych metod SLAM spowodowane zostało rosnącą rolą trójwymiarowej wizji komputerowej w robotyce, związaną z rozwojem oraz upowszechnieniem tanich czujników umożliwiających akwizycję obrazów RGB-D (obrazów kolorowych wraz z mapami głębi).

Właśnie w tym kontekście recenzowana praca Pana mgr inż. Michała Nowickiego, poświęcona w całości metodom syntezy systemów lokalizacji robotów i osób w budynkach, wykorzystującym grafy ograniczeń do fuzji danych jest pozycją niezwykle ambitną i aktualną. Zasadniczo, oryginalny pomysł Autora polega na wykorzystaniu informacji ilościowej z sensorów dostępnych w urządzeniach mobilnych (np. kamery, krokomierza, akcelerometru, żyroskopu, magnetometru, barometru, adaptera WiFi) uzupełnionej o informację jakościową, charakterystyczną w lokalizacji osób (wykrytego ruchu na schodach lub w windach, planów budynku, wizyjnego rozpoznawania miejsc lub bezpośrednio od użytkownika) w celu zwiększenia precyzji oraz niezawodności systemu. Co więcej, obszerną część rozprawy zajmuje praktyczna weryfikacja działania zaproponowanych metod w oparciu o nietrywialne zadania testowe.

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione czynniki, sformułowane na str. 3 cele i tezę pracy, jak również wynikające z nich zadania szczegółowe, są jasne i dobrze określone. Sprowadzają się one do wykazania, że grafowa reprezentacja problemu jednoczesnej lokalizacji i budowy mapy z uwzględnieniem ograniczeń indukowanych przez ilościowe pomiary poszczególnych cech otoczenia oraz przez informację jakościową o stanie lub lokalizacji poruszającego się agenta (robota lub człowieka) umożliwia fuzję informacji o różnym charakterze, istotnie poprawiając dokładność estymowanej trajektorii agenta i niezawodność systemu SLAM. Efektem rozprawy ma być uniwersalny system lokalizujący agenta niezależnie od źródła informacji lub zastosowania (robotyka lub lokalizacja człowieka). Uwzględnienie informacji jakościowej ma ułatwiać detekcję złych lub niedokładnych ograniczeń grafu. Tak zarysowaną problematykę rozprawy uważam za istotną i nadzwyczaj aktualną, o rezultatach mogących otworzyć nowy nurt badań nad nawigacją autonomiczną. Fakt ten przesądza o pozytywnej ocenie wybranego tematu jako przedmiotu opiniowanej rozprawy doktorskiej.

II. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Obszerna rozprawa, napisana w języku angielskim i licząca 224 strony numerowane, składa się ze wstępu, wprowadzenia, trzech zasadniczych rozdziałów przedstawiających koncepcję proponowanych metod (odpowiednio: lokalizacja robotów, lokalizacja osób oraz uwzględnienie informacji jakościowej), odpowiadających im trzech rozdziałów raportujących wyniki eksperymentów weryfikujących działanie tych metod w praktyce, oraz rozdziału podsumowujących uwag końcowych. Załączony niezwykle obszerny wykaz 253 pozycji cytowanej literatury świetnie odzwierciedla stan badań w zakresie tematycznym rozprawy.

Pracę rozpoczynają *Wprowadzenie*, na które składa się przedstawienie motywacji zagadnień rozprawy, cele i teza pracy (w tym momencie już intuicyjnie jasną), zwięzłe przedstawienie pokrewnych rozwiązań, ogólny opis proponowanego podejścia wraz ze stosowanymi bibliotekami (implementacja SLAM wykorzystuje jako back-end do optymalizacji grafu i jego synchronizacji z mapą bardzo dobrą open-source'ową bibliotekę g^{2}o autorstwa zespołu z Uniwersytetu we Freiburgu, którego członkowie są liderami w zakresie optymalizacji grafowej na potrzeby SLAM). Rozdział kończy charakterystyka struktury pracy oraz lista projektów i publikacji, w których uczestniczył autor rozprawy.

Z uwagi na ważkość problemu w dalszej części rozprawy, *Rozdział 2* charakteryzuje techniki lokalizacji robota w oparciu o sensor RGB-D. Omawia pomysł estymacji ruchu na bazie strumienia obrazów wejściowych, w oparciu o odometrię wizyjną wykorzystującą ekstrakcję cech obrazów (detektory SURF i SCAN) oraz algorytmy zarządzania tymi cechami, włączając grupowanie (algorytm DBScan). Porusza techniki śledzenia i dopasowywania cech w kolejnych obrazach, wykorzystujące RANSAC (*ang.* random sample consensus), iteracyjną metodę estymacji parametrów przekształceń geometrycznych z zestawu danych zawierającego obserwacje odstające. Uwzględnienie ograniczeń (wirtualnych pomiarów) między niekoniecznie następującymi po sobie obrazami, a także wzięcie pod uwagę problemu zamykania pętli (*ang.* loop closure), czyli rozpoznania badanego już wcześniej obszaru otoczenia po przebyciu przez robota znacznego dystansu (wbrew pozorom, jego rozwiązanie nie jest trywialne i wymaga poszukiwania dopasowania między bieżącą percepcją wizyjną a cechami znaczącymi zgromadzonymi wcześniej, przy wykorzystaniu bogatej informacji fotometrycznej), prowadzi do metody SLAM opartej o graf póz robota. Dodatkowe włączenie do sformułowania problemu optymalizacji grafowej również pozycji cech prowadzi z kolei do końcowej wersji metody, określanej jako SLAM oparty o cechy. W efekcie powstała bardzo udana implementacja PUT SLAM, nad którą w ramach projektu NCN pracowała grupa pracowników Instytutu Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej PP, w skład której wchodził autora rozprawy.

Rozdział 3 dotyczy lokalizacji człowieka poruszającego się wewnątrz budynku w oparciu o dane uzyskiwane na bieżąco ze smartfona. Uwzględnia się przy tym praktycznie wszystkie sensory dostępne we współczesnych smartfonach. Do zmiany piętra wykorzystuje się zmiany ciśnienia wykrywane przez barometr. Nawigację zliczeniową (ang. dead reckoning) realizuje się w oparciu o krokomierz (służy do oceny przebytego dystansu) oraz czujników bezwładnościowych (akcelerometru, magnetometru, żyroskopu, które służą do oceny orientacji). Jednym z problemów jest tu stosunkowo słaba jakość czujników, wymagająca wstępnej filtracji mierzonych sygnałów. Fuzji danych dokonuje się w oparciu o filtr komplementarny, rozszerzony filtr Kalmana lub adaptacyjną wersję tego ostatniego. Do

lokalizacji używa się również skanera sieci bezprzewodowych w połączeniu algorytmem regresji nieparametrycznej (algorytm *k* najbliższych sąsiadów) operującym na bazie siły sygnałów z punktów dostępowych w wybranych miejscach budynku. Rozdział uzupełniają rozważania o wykorzystaniu znaczników w postaci kodów kreskowych umieszczonych w pomieszczeniach budynku i wykrywanych w obrazie z kamery smartfona. Po skalibrowaniu kamery, na podstawie metrycznego położenia czterech narożników kodu QR oraz narożników obrazu można ocenić pozę (czyli położenie i orientację) smartfona. Rezultat, podobnie jak ocena pozy otrzymana z nawigacji zliczeniowej, stanowi podstawę do wprowadzenia krawędzi w grafie wykorzystywanym w systemie SLAM.

Rozdział 4, poświęcony uwzględnieniu informacji jakościowej, jest najbardziej oryginalnym osiągnięciem autora rozprawy i zasługuje na szersze omówienie. Informacja tego typu, określająca kontekst ruchu agenta (np. poruszanie się po schodach lub w windzie, wraz z kierunkiem ruchu, poruszanie się wzdłuż ściany) była do tej pory uwzględniana sporadycznie z uwagi na jej mniejszą rolę w lokalizacji robotów. W przypadku lokalizacji osób jest ona jednak trudna do przecenienia z uwagi na kiepską jakość czujników, w jakie wyposażone są smartfony. Jej uwzględnienie może więc prowadzić do istotnej poprawy jakości lokalizacji. W tym celu autor rozprawy zaproponował uogólnienie stosowanej do tej pory struktury grafu o włączenie krawędzi łączących wiele węzłów, nazywanych hiperkrawędziami. Otrzymuje się w ten sposób strukturę określaną jako hipergraf, która podlega optymalizacji w oparciu o informację pochodzącą z czujników smarftona. Podstawą uwzględnienia informacji jakościowej jest rozpoznanie rodzaju aktywności mobilnego agenta (*ang.* human activity recognition, HAR, lub robot activity recognition, RAR). Kluczowa jest tu dostępność mapy otoczenia z położeniem ścian, drzwi, wind, schodów, itp. W przypadku smartfona, rozpoznanie rodzaju poruszania się człowieka (marsz, stanie, używanie schodów), najistotniejsze są barometr i akcelerometr. Detekcji otwierania drzwi można dokonać w oparciu o magnetometr (o ile elementy drzwi wykonano z ferromagnetyków). Autor proponuje uwzględnienie danych jakościowych poprzez włączenie do funkcji błędu, która ma być minimalizowana ze względu na parametry grafu, członów reprezentujących karę proporcjonalną do kwadratu odległości danej pozy od najbliższego obiektu charakterystycznego wyjaśniającego rozpoznany rodzaj aktywności (czyli np. najbliższych schodów, jeśli rozpoznano, że agent porusza się po schodach; ściślej biorąc, funkcja kary zawiera również strefy nieczułości i nasycenia określone arbitralnie w funkcji odległości). Podobnie uwzględnia się informację kontekstową o poruszaniu się wzdłuż ściany, narzucającą ograniczenie o pozostawaniu kolejnych estymat położeń robota po tej samej stronie ściany. Tu odpowiedni człon kary aktywuje się, gdy kolejne położenia agenta znajdują się po różnych stronach ściany, i jest proporcjonalny do kwadratu odległości od ściany.

Rozdział zawiera również oryginalny materiał dotyczący wizyjnego zamykania pętli, które w przypadku lokalizacji osób jest mocno utrudnione zmiennym położeniem i orientacją kamery. Punktem wyjścia jest znany algorytm FAB-MAP Marka Cumminsa z Oxfordu z efektywną implementacją OpenFABMAP, opartą o cechy wydobywane z obrazu kamery. Sytuacja nawigacji człowieka w budynku stanowi tu jednak ogromne wyzwanie z uwagi na duże podobieństwa różnych korytarzy. Autor rozprawy proponuje oryginalne modyfikacje polegające na uwzględnianiu sekwencji zamiast pojedynczych obrazów. Podobny pomysł stosuje dla znanego algorytmu ABLE-M z jego open-source'ową wersją OpenABLE, zaproponowanymi przez zespół z hiszpańskiego uniwersytetu w Alcalá de Henares. Algorytm przetwarza sekwencję obrazów w celu znalezienia ich części reprezentujących tę samą

lokalizację fizyczną. Oryginalne modyfikacje autora rozprawy mają na celu przystosowanie algorytmu do lokalizacji człowieka, kiedy zmiany położenia i orientacji kamery są zdecydowanie większe i gwałtowniejsze niż w przypadku lokalizacji robota mobilnego. Pomysł polega tu na uzupełnieniu informacji początkowej o zarejestrowane wcześniej sekwencje obrazów środowiska. Zaproponowana implementacja FastABLE skupia się na modyfikacjach algorytmicznych i redukcji złożoności obliczeniowej OpenABLE, pozwalając na osiągnięcie w praktyce prawie dwudziestokrotnego przyśpieszenia w przypadku budynków i istotnie mniejszego zużycia energii. Jest to prawdopodobnie najbardziej wartościowy rezultat rozprawy, opublikowany zresztą w czasopiśmie *Wireless Personal Communications* wydawanym przez Springer.

Rozdział uzupełniają rozważania o wspomaganiu systemu lokalizacji poprzez interakcję z użytkownikiem oraz zagadnieniu spójności hipergrafu w przypadku występowania obserwacji odstających. Pomysłem na eliminację wpływu tych ostatnich jest wykorzystanie odpornych funkcji strat (np. Hubera) lub statystyki χ^2.

Po przeczytaniu pierwszych czterech rozdziałów czytelnik posiada dobrą ogólną orientację w zakresie omawianych zagadnień, dotychczas stosowanych podejściach, oraz oryginalnych rozwiązaniach zaproponowanych przez Autora.

W kolejnych trzech rozdziałach Autor przedstawia wyniki eksperymentów potwierdzających efektywność proponowanych przez Niego metod. Ta część stanowi wprawdzie aż połowę objętości pracy, jednak jest równie interesująca, jak część pierwsza. Duże uznanie budzi przede wszystkim ogromny nakład pracy włożony w przeprowadzenie wszystkich badań, tak bardzo dalekich od trywialności. Ich rezultaty potwierdziły w praktyce zasadność zaproponowanej metodologii.

Rozdział piąty poświęcono testom metody RGB-D SLAM omówionej w rozdz. 2. Wykorzystuje się w tym celu dane standardowych benchmarków pochodzących z politechniki w Monachium (sekwencje obrazów zarejestrowanych w celu oceny zachowania różnych algorytmów) oraz Imperial College w Londynie (dane syntetyczne, wygenerowanie z wykorzystaniem oprogramowania POVRay). Z powodu braku dostępności zestawów danych testowych dla czujnika ruchu Kinect 2.0, przygotowano własny zestaw obrazów testowych PUTKK zarejestrowanych za pomocą francuskiego robota WIFIBOT. Do porównań trajektorii rzeczywistych i ich estymat użyto dwóch metryk używanych standardowo podczas walidacji systemów RGB-D SLAM (Absolute Trajectory Error, Relative Pose Error). Rozdział uzupełniają testy systemu PUT SLAM w oparciu o kamerę RGB-D zamontowaną na heksapodzie Phantom X.

Rozdział szósty omawia wyniki osiągnięte podczas testów metod lokalizacji człowieka omówionych w rozdz. 3. Z uwagi na praktyczny brak benchmarków odpowiadających tej sytuacji, przeprowadzono szereg testów w jednym z budynków Politechniki Poznańskiej. Lokalizacji dokonywano w oparciu o dane zebrane wzdłuż tras pokonywanych przez Autora wyposażonego w smartfon Samsung Galaxy Note 3. Oddzielnym problemem jest tu określenie rzeczywistego położenia człowieka, do czego wykorzystano np. komercyjny czujnik Xsens MTi AHRS, dokonujący fuzji danych z żyroskopu, akcelerometru i magnetometru.

Rozdział siódmy poświęcono eksperymentalnej weryfikacji metod zaproponowanych w rozdz. 4. W przypadku robota wykorzystano w tym celu benchmarki z rozdz. 5, a w przypadku lokalizacji człowieka wykorzystano eksperymenty przeprowadzone w jednym z budynków Politechniki Poznańskiej. Autor zaproponował automatyczny sposób strojenia parametrów algorytmu FastABLE. Interesujące są eksperymenty dotyczące interakcji z użytkownikiem wspomagającym działanie systemu lokalizacji poprzez szacowanie odległości do punktów charakterystycznych mapy (do opisu niepewności wykorzystano tu logikę rozmytą).

Rozprawę kończy podsumowanie oryginalnych wyników naukowych oraz charakterystyka otwartych problemów badawczych.
Oceniając merytorycznie całą rozprawę stwierdzam, że jest ona napisana na bardzo dobrym poziomie. Zawiera jasno sformułowany i ważny problem naukowy, oraz prezentuje poprawne rozwiązanie tego problemu, które zostało uzyskane przez Autora samodzielnie i z zastosowaniem właściwej metodologii naukowej. Na podstawie przedstawionego skrótowo omówienia treści całej rozprawy doktorskiej należy odnotować, że jej Autor wykazał się dobrymi umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi robotyki mobilnej, modelowania i przetwarzania sygnałów, uczenia maszynowego, rozpoznawania obrazów i technik algorytmicznych. Już na podstawie wstępnej analizy można stwierdzić, że rozprawa stanowi dzieło wartościowe, zdecydowanie odpowiadające wymaganiom stawianym przez stosowne przepisy.

Pod względem redakcyjnym praca napisana jest z bardzo dużą dbałością o szczegóły. Użyte słownictwo odpowiada powszechnie stosowanemu. Jak na tak dużą objętość, praktycznie nie zawiera błędów składu, co tym bardziej koresponduje z jej bardzo dobrym poziomem merytorycznym. Na szczególne podkreślenie zasługuje to, że pracę napisano w bardzo dobrym języku angielskim.

III. Oryginalne osiągnięcia

Chociaż podejście do SLAM oparte o wykorzystanie grafów ograniczeń jest już znane od dawna, to jednak poszukiwanie sposobów uczynienia go jeszcze bardziej efektywnym, a w szczególności przystosowania go do lokalizacji osób w budynkach w oparciu o niskobudżetowe czujniki smartfonów i wykorzystania danych jakościowych, jest nadzwyczaj trudnym i wciąż aktualnym zadaniem. Przedstawiony w pracy matematyczny opis problemu, jego analizę oraz zaproponowane metody i algorytmy obliczeniowe uważam za najważniejszy wkład Autora w rozważaną dziedzinę. Chociaż przedstawiony pomysł wykorzystania danych jakościowych wydaje się dość naturalny, jednak recenzowana praca stanowi pierwszą tak całościową próbę jego ujęcia i formalnego uzasadnienia w kontekście systemów SLAM. Główną zaletą podejścia proponowanego w rozprawie jest wysoka efektywność obliczeniowa oraz względnie prosta możliwość jego rozwinięcia do działającego prototypu.

Przyjmując, że głównym celem rozprawy było pokazanie, że poszerzenie grafowej reprezentacji problemu SLAM o ograniczenia wynikające z danych jakościowych o otoczeniu poruszającego się agenta poprawia dokładność ocen jego trajektorii i niezawodność całego systemu SLAM, należy stwierdzić, że cel ten Autor osiągnął. Co więcej, weryfikacji

rezultatów dokonano w oparciu o uznane benchmarki oraz eksperymenty w warunkach rzeczywistego użytkowania.

W szczególności, za najważniejsze rezultaty rozprawy uważam następujące:

1. zaproponowanie wielowariantowego systemu jednoczesnej lokalizacji i budowy mapy dla robotów wyposażonych w sensory RGB-D, wykorzystującego nowoczesne podejście oparte o grafy ograniczeń; w bazowej postaci system wykorzystuje odometrię wizyjną, a jego rozwinięciem są system SLAM oparty o pozy sensora oraz system SLAM wykorzystujący cechy;

2. zaproponowanie architektury osobistego systemu lokalizacji człowieka poruszającego się w budynku, wykorzystującego sensory dostępne w urządzeniu mobilnym (smartfonie) i umożliwiającego wykrywanie zmiany pięter, określenie orientacji urządzenia, nawigację zliczeniową, wykorzystanie sygnałów WiFi do lokalizacji oraz znaczników (kodów QR) umieszczonych w środowisku.;

3. opracowanie oryginalnej techniki ekstrakcji i włączania do grafu ograniczeń systemu SLAM dostępnych danych jakościowych, zwiększającej dokładność systemów lokalizacji dla robotów i osób;

4. zaproponowanie metod fuzji informacji ilościowej i jakościowej w sposób umożliwiający wykrywanie błędnych lub niedokładnych pomiarów;

5. opracowanie efektywnej obliczeniowo wersji algorytmu wizyjnego rozpoznawania miejsc w oparciu o sekwencje obrazów (algorytm FastABLE), specjalizowanego na rozpoznawanie w czasie rzeczywistym i przy ograniczonej mocy obliczeniowej urządzeń mobilnych;

6. opracowanie kompletnego systemu lokalizacji w budynkach, wykorzystującego graf ograniczeń do fuzji danych ilościowych i jakościowych;

7. weryfikacja proponowanych rozwiązań w oparciu o dane syntetyczne oraz liczne rzeczywiste eksperymenty lokalizacji agentów mobilnych (robotów i osób) w budynkach.

Należy podkreślić, że uzyskane rezultaty są udokumentowane publikacjami zarówno w czasopismach (*IEEE Sensors* Journal, IEEE, IF = 2.512; *Machine Vision and Applications*, Springer, IF = 2.005; *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, IF = 1.597; *Wireless Personal Communications*, Springer, IF = 0.951; *Industrial Robot: An International Journal*, Emerald Insight, IF = 1.096), jak i na sześciu konferencjach międzynarodowych (m.in. bardzo dobrych *Asian Conference on Computer Vision* oraz *European Conference on Mobile Robots*).

Warto dodać, że Autor był laureatem II edycji programu Diamentowy Grant MNiSW oraz wykonawcą w grancie OPUS (panel ST7), a obecnie jest kierownikiem projektu PRELUDIUM (panel ST6).

W podsumowaniu, należy stwierdzić, że **sformułowany cel rozprawy został osiągnięty, a jej Autor wykazał się głęboką wiedzą i umiejętnościami niezbędnymi do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych w dyscyplinie *Automatyka i robotyka*.**

IV. Uwagi i komentarze

Przedstawiona do recenzji praca zawiera istotną treść naukową i wiele nowych wyników. Stanowi logiczną całość począwszy od uzasadnienia praktycznego problemu, poprzez jego formalizację, aż do rozwiązania różnorakich wersji problemu z przykładami zastosowań zaproponowanej metodologii w nietrywialnych zadaniach testowych. Praca prezentuje wysoki poziom naukowy, a Autor biegle posługuje się aparatem matematycznym, m.in. w zakresie modelowania i symulacji, robotyki mobilnej, uczenia maszynowego, rozpoznawania obrazów i algorytmiki.

Lektura rozprawy skłania jednak również do sformułowania następujących uwag krytycznych:

1. W rozprawie Autor wielokrotnie odwołuje się do rezultatów osiągniętych przez zespół badawczy, którego jest członkiem. Zespół opracował system PUT SLAM oraz przygotował szereg publikacji autorskich. W kontekście rozprawy doprecyzowania wymaga wkład Autora do rozwoju tego systemu i zakresu merytorycznego publikacji.

2. W pracy wielokrotnie pojawia się pojęcie macierzy informacyjnej wirtualnego pomiaru między wierzchołkami grafu. Ma to oczywiste konotacje statystyczne, ponieważ ta macierz występuje w odpowiednim składniku logarytmu funkcji wiarygodności odpowiadającego temu pomiarowi. W rozprawie praktycznie wszystkie macierze tego typu są diagonalne, a ich elementy (zwłaszcza w przypadku danych jakościowych) ustala się arbitralnie, co odbiega od sformułowania problemu używanego np. w pracach zespołu z Freiburga, uznawanego za liderów rozważanego podejścia. O szacowaniu macierzy informacyjnej w oparciu o niepewność pomiarów wspomina się wprawdzie na str. 192 w kontekście planów na przyszłość, jednak pominięcie tego aspektu w pracy pozostawia pewien niedosyt.

3. Rozprawa zakłada, że agent porusza się po określonej trajektorii, jednak nasuwa to pytanie, w jaki sposób można byłoby zwiększyć dokładność lokalizacji poprzez próbę optymalizacji tej trajektorii (czyli rozwinięcie podejścia do tzw. aktywnego SLAM). Podobna uwaga dotyczy np. optymalizacji położenia i orientacji kamery (zadania to wydaje się mieć sporo wspólnego z problemem optymalnego planowania eksperymentu).

4. Czy (i ewentualnie w jaki sposób) w proponowanym podejściu można byłoby uwzględniać dostępną informację *a priori* o ruchu mobilnego agenta? Przykładowo, w przypadku poruszania się po muzeum mogłaby ona odpowiadać najczęstszym trasom wybieranym podczas zwiedzania.

5. Str. 46, wzór (3.20): prawa strona jest błędna z uwagi na to, że mianownik nie jest skalarem, a macierzą.

6. Str. 51, wzór (3.28): podany wzór jest szczególnym przypadkiem interpolacji przestrzennej, odpowiadającym tzw. metodzie odwrotnych odległości (*ang.* inverse distance weighting, IDW). Ogólna klasa metod tego typu to modele wygładzania jądrowego.

7. Str. 70, wzór (4.8): problemy tego typu bardzo dobrze opisuje monografia Mark de Berg, Marc van Kreveld, Mark Overmans, Otfried Schwarzkopf, *Geometria obliczeniowa: algorytmy i zastosowania*, WNT, Warszawa, 2007. (W rozprawie podano jedynie linki do stron internetowych.)

8. Str. 86: założenie o rozkładzie normalnym funkcji błędu jest raczej trudne do spełnienia w praktyce. Tak czy inaczej, prawa strona równania (4.17) najczęściej nie będzie miała postulowanego rozkładu χ^2 z uwagi na to, że macierz informacyjna w opisywanych wariantach algorytmu SLAM jest najczęściej ustalana arbitralnie.

Powyższe uwagi krytyczne nie mają one jednak przesadnego wpływu na ogólną opinię o recenzowanej dysertacji, którą oceniam jako bardzo wartościową.

V. Podsumowanie

Uwzględniając wyżej wymienione uwagi i komentarze oraz całość rozprawy doktorskiej wraz z oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi stwierdzam, że

1. **recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Nowickiego spełnia wszystkie wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. nr 65, poz. 595);**

2. **wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz jej dopuszczenie do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej.**

Dariusz Marciński