

Prof. Adam Borkowski  
ul. Grabskiego 30  
05-070 Sulejówek

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Drwięgi pt.  
"Lokalizacja i mapowanie w systemach robotów mobilnych"

### 1. Temat i zakres rozprawy

Recenzowana praca ma objętość 225 str. i składa się ze wstępu, dziewięciu rozdziałów właściwych i podsumowania. Wykaz cytowanej literatury obejmuje 268 pozycji. Oprócz tego, praca ma cztery dodatki. Są w nich podane objaśnienia skrótów oraz pomocnicze definicje matematyczne.

Rozprawa dotyczy pewnego wycinka problematyki nawigacyjnej: przyrostowego szacowania bieżącej pozycji robota i uzupełniania na tej podstawie mapy otoczenia. W literaturze przyjęło się nazywanie tego typu podejścia metodą SLAM. Autor ogranicza swoje rozważania do nawigacji wewnątrz budynków i pomija całkowicie zagadnienia planowania i realizacji trajektorii przejazdu.

Wstęp do rozprawy określa jej cel i zakres. Rozdziały 2 do 7 zostały napisane głównie na podstawie literatury przedmiotu. Przedstawiono w nich podstawowe elementy systemu nawigacji robota mobilnego: sensory, modele otoczenia, metody lokalizacji i tworzenia mapy. W rozdziale 6 opisano w skrócie systemy wielorobotowe, a w rozdziale 7 przedstawiono klasyfikację algorytmów typu SLAM na przykładzie współdziałania kilku robotów.

W rozdziale 8 Autor przedstawia algorytm scalania fragmentów mapy otoczenia pozyskanych przez kilka robotów mobilnych. Efektywność działania tego algorytmu sprawdzana jest za pośrednictwem eksperymentów wykonywanych na robotach Turtlebot.

Rozdział 9-ty zawiera opis serwera map. Serwer ten został zaimplementowany w języku C++ z wykorzystaniem teorii grafów. Przedstawiono architekturę serwera oraz wyniki eksperymentów, polegających na tworzeniu mapy budynku Politechniki Wrocławskiej.

W rozdziale 10-tym Autor przedstawia system sterowania grupą kilku robotów mobilnych. System ten działa w dwóch trybach: symulacyjnym i rzeczywistym. Wersja symulacyjna została zaimplementowana w środowisku Gazebo, a wersja rzeczywista wykorzystuje roboty Turtlebot i system operacyjny ROS.

Podsumowanie rozprawy zawiera wnioski z przeprowadzonych badań, listę osiągnięć, które Autor uważa za oryginalne, oraz propozycje dalszych badań.

### 2. Ocena ogólna

Roboty mobilne przechodzą powoli z fazy badań naukowych do różnych zastosowań, poczynając od domowego odkurzacza po łaziki marsjańskie. Sporo wyników badań w zakresie sterowania robotami mobilnymi znalazło zastosowanie w dynamicznie rozwijającym się segmencie wspomagania kierowcy samochodu. Dotyczy to właśnie nawigacji, która stanowi przedmiot rozprawy. Szkoda, że jej Autor pozostał w zakłętym kręgu *mapping*, rozumianego jako tworzenie mapy otoczenia od zera. Wyjście poza to ograniczenie istotnie zbliżyłoby propozycje Autora rozprawy do praktyki, o czym piszę poniżej.

Niezależnie od tej i innych uwag krytycznych oceniam rozprawę pozytywnie. Jest ona starannie zredagowana, zawiera obszerny przegląd literatury i daje czytelnikowi ogólne pojęcie o nawigacji wewnątrz budynków. Po uzupełnieniu o brakujące elementy rozprawa mogłaby stanowić podstawę skryptu lub podręcznika.

Rozprawa zawiera wystarczającą liczbę elementów oryginalnych, aby mogła stanowić podstawę do nadania tytułu doktora nauk technicznych. Należą do nich:

1. Kalibracja sensora głębi Microsoft Kinect i (rozdział 2);
2. Badania jakości metod lokalizacji (rozdział 4);
3. Automatyczny dobór parametrów w metodach SLAM (rozdział 5);
4. Wykrywanie schodów (rozdział 5);
5. Badanie jakości odtwarzania trajektorii robota (rozdział 5);
6. Porównanie jakości map uzyskanych różnymi wariantami SLAM (rozdział 5);
7. Algorytm scalania map pozyskanych przez kilka robotów (rozdział 8);
8. Serwer map (rozdział 9).

Najwyżej oceniam eksperymentalne badania wykonane na rzeczywistych robotach (rozdziały 2, 4 i 5). Dotyczą one dokładności pozycjonowania robota, estymowania jego trajektorii i dokładności map otoczenia. Autor rozprawy wykonał te eksperymenty wykorzystując optyczny system śledzenia ruchu obiektów *Optitrack*. System ten rejestruje bieżącą pozycję robota mobilnego, umożliwiając ocenę dokładności różnych algorytmów lokalizacji i mapowania. Wydaje się, że dysponując takim systemem Politechnika Wrocławska mogłaby świadczyć usługę weryfikacji systemów nawigacyjnych, proponowanych przez grupy badawcze w Polsce. Eksperymenty przeprowadzone przez Autora rozprawy wykazują bowiem, że temat przyrostowej lokalizacji i mapowania został w dużym stopniu wyczerpany. Dokładność proponowanych algorytmów jest zbliżona, o wyborze będzie zatem decydowała ich złożoność obliczeniowa i czasochłonność.

Trafnym wyborem było też opracowanie sposobu wykrywania uskoków w podłożu (rozdział 5.3). Robot kołowy może pokonać taki uskok tylko wtedy, gdy jego wysokość jest niewielka w porównaniu ze średnicą koła. Istotna przy tym jest sama nieciągłość podłoża, a nie wklęsłość czy wypukłość przeszkody, bo po rampie prowadzącej w górę czy w dół robot może jechać bez problemu.

Podjęcie próby rozszerzenia podejścia SLAM na przypadek wielu robotów (rozdziały 8 i 9) jest warte pochwały, bo w przeciwieństwie do zwykłego SLAM'u jest to nadal problem otwarty. Nie da się go jednak rozwiązać pomijając planowanie współpracy wewnątrz grupy. Piszę o tym w następnym rozdziale recenzji, odnotowując na razie jedynie słabszą ocenę rozdziałów 8 i 9.

### 3. Uwagi krytyczne

Przejdę teraz do omówienia mankamentów rozprawy, traktując część uwag krytycznych jako zachętę do dyskusji na obronie pracy.

1. Autor rozprawy przyjmuje, że roboty tworzą mapę otoczenia *ab ovo* nie znając w dodatku swoich pozycji wyjściowych. Trudno mu stawiać zarzut z tego powodu, bo takie założenia są powszechnie stosowane w literaturze przedmiotu. Moim zdaniem, jest to jedna z przyczyn zastoju w robotyce mobilnej. Kolejni badacze odtwarzają żmudnie plany budynków, zamiast skorzystać z powszechnie dostępnej cyfrowej dokumentacji tych obiektów. Współczesny standard przemysłowy takiej dokumentacji, zwany *Building Information Model (BIM)* zawiera nie tylko opis geometrii, ale również warstwy semantyczną i topologiczną. Pozwala to wysłać robota nie na pozycję  $x,y$ ,

$\phi$ , lecz do kuchni czy salonu i planować jego przejazd na grafie połączeń. Liczę na to, że Autor rozprawy i grupa wrocławska zajmą się w przyszłości przystosowaniem modelu BIM do potrzeb robotyki mobilnej.

2. Na początku rozdziału 8 Autor definiuje ambitne zagadnienie mapowania:  $N$  robotów ma tworzyć mapy cząstkowe w układach współrzędnych związanych z tymi robotami. Następnie te mapy mają być scalane do mapy wspólnej. Niestety już w następnym punkcie tegoż rozdziału okazuje się, że roboty mają być dwa i scalanie ma następować między nimi. Jedyne eksperymenty na robotach rzeczywistych (rozdział 8.8.1) ogranicza się również do współpracy dwóch robotów. Autor rozprawy twierdzi, że w grupie  $N$  robotów zawsze znajdzie pary, które wytworzyły częściowo wspólne mapy cząstkowe. Moim zdaniem, jest to nadmierny optymizm. Widzę raczej niebezpieczeństwo mylnego scalania fragmentów budynku, które różnią się jedynie położeniem (np. pokoje w hotelu lub szpitalu).
3. Założenie, że względne pozycje robotów nie są znane, niepotrzebnie komplikuje zadanie i oddala je od praktyki. Roboty nie spadają losowo z drzewa, lecz są wysyłane do budynku w celu wykonania jakiejś misji. Stąd ich położenia początkowe są znane, a położenia aktualne wyliczane na podstawie pomiarów. Podobnie akademickie jest założenie o tym, że roboty mają unikać spotkań w trakcie eksploracji.
4. Zanim robot ruszy do badania budynku, powinien wiedzieć, w jaki sposób będzie to robił. Należy wątpić, że będzie się losowo przemieszczał po wolnej przestrzeni, jak cząstka Brauna. W przypadku grupy  $N$  robotów zaplanowanie sposobu eksploracji jest jeszcze bardziej istotne. Widać to wyraźnie na rys. 8.18: udział robota 1 jest bardzo mały w stosunku do pracy, jaką wykonał robot 2. Całkowite pominięcie etapu planowania eksploracji bardzo obniża moją ocenę rozdziału 8.
5. Podobnie niezrozumiałe jest pominięcie problemu synchronizacji, czyli decyzji o tym, w jakiej chwili mapa cząstkowa ma być scalana. Wysyłając do budynku grupę robotów zamiast jednego robota liczymy na osiągnięcie dwóch korzyści: po pierwsze, ma to skrócić czas eksploracji, po drugie, wypadnięcie z pracy jednego robota nie będzie krytyczne. Wydaje się, że sensowne byłoby powierzenie scalania map cząstkowych serwerowi, który Autor rozprawy opisuje w rozdziale 9.

#### 4. Wniosek końcowy

Uważam, że praca mgr inż. Michała Drwięgi wnosi istotny przyczynek do rozwoju systemów sterowania robotami mobilnymi. Spełnia ona zatem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez aktualnie obowiązującą Ustawę o stopniach i tytule naukowym (Dz.U. z 2003 nr 65 poz. 595). W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie tej rozprawy do publicznej obrony.



Sulejówek, 17 kwietnia 2022 r.