

dr hab. inż. Maciej Trojnacki, prof. nadzw. PIAP  
Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ – Przemysłowy  
Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP  
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa  
tel.: 22 8740 448, e-mail: mtrojnacki@piap.pl

Warszawa, dn. 26.07.2019 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

*mgra inż. Tomasza Gawrona*

### **zatytułowanej:**

*Algorytmizacja ruchu robotów mobilnych z ograniczeniami stanu i wejść sterujących  
w kontekście metodyki VFO*

### **1. Problem badawczy i jego znaczenie**

W rozprawie doktorskiej Pana mgra inż. Tomasza Gawrona rozważany jest problem tzw. algorytmizacji ruchu robota mobilnego. Polega on na wyznaczeniu sygnałów sterujących zapewniających przeprowadzenie robota z konfiguracji początkowej do zadanej konfiguracji końcowej w środowisku kolizyjnym przy jednoczesnym spełnieniu zadanych ograniczeń na konfigurację robota, amplitudy sygnałów sterujących i krzywiznę toru ruchu charakterystycznego punktu robota.

Przyjęta metoda rozwiązania postawionego problemu stanowi ściśle połączenie dwóch etapów obejmujących planowanie ruchu oraz sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym. Oznacza to, że oba etapy nie są rozwiązywane sekwencyjnie i niezależnie, ale w taki sposób, aby już na etapie planowania uwzględnić właściwości dynamiczne układu zamkniętego z konkretnym sterownikiem, który będzie wykorzystany do realizacji ruchu. Umożliwia to uwzględnienie ograniczeń ruchu w bardziej efektywny sposób, dając między innymi formalne gwarancje ich spełnienia nie tylko podczas idealnego ruchu, np. na ścieżce, ale także w stanach przejściowych. Takie podejście do problemu jest stosunkowo nowe i istnieje niewiele podobnych prac szczególnie dla systemów nieholonomicznych. Niesie ono ze sobą trudności w uwzględnieniu ograniczeń nakładanych na ruch pojazdu, tj. ograniczeń stanu i sterowania, z którymi jednak poradził sobie Autor rozprawy.

Autor dzieli także zadanie algorytmizacji ruchu robota na 2 podzadania, tj. przejazdu przez zbiór punktów i śledzenia (odtworzenia) ścieżki. W obu przypadkach stosuje podejście analityczne oraz wykorzystuje koncepcję tzw. tuneli zbieżności i składających się na nie tzw. tub zbieżności. Rozpatruje dwa obiekty badań, tj. monocykl i samochód, dla których na etapie planowania i realizacji ruchu stosuje modele kinematyczne. W badaniach symulacyjnych i empirycznych ruchu dla obu pojazdów analizuje manewry monotoniczne oraz niemonotoniczne (ze względu na znak prędkości liniowej ruchu tych pojazdów).

Rozwiązywany w ramach rozprawy doktorskiej problem algorytmizacji ruchu robota mobilnego ma zdecydowanie charakter naukowy. W ramach pracy Autor dokonał porównania ilościowego oraz jakościowego opracowanych przez siebie rozwiązań z metodami znanymi z literatury, biorąc przy tym pod uwagę aktualne metody. Rozwiązał w kompleksowy sposób szereg szczegółowych problemów naukowych związanych z planowaniem i realizacją ruchu robota. Opracowane rozwiązania Autor poddał analizie teoretycznej, a także przeanalizował w ramach badań symulacyjnych i empirycznych oraz sformułował szczegółowe wnioski o charakterze naukowym wynikające z tych badań.

Przedmiotowa rozprawa doktorska ma także niewątpliwie znaczenie praktyczne i dotyczy aktualnych problemów robotyki. Opracowane przez Autora metody algorytmizacji ruchu mogą znaleźć praktyczne zastosowanie zarówno w robotach mobilnych, jak i w automatycznie kierowanych

TU



samochodach. Metody te mogą głównie znaleźć zastosowanie podczas planowania i realizacji manewrów parkowania.

## 2. Wkład autora

Przyjęte w rozprawie doktorskiej podejście do rozwiązania problemu algorytmizacji ruchu robota jest oryginalne i łączy techniki analizy formalnej z teorii sterowania oraz techniki obliczeniowe. Autor pracy w celu rozwiązania problemu algorytmizacji ruchu dla rozpatrywanych dwóch typów robotów opracował szereg algorytmów, które korzystają z koncepcji tzw. tuneli zbieżności, które są wyznaczone dla układu zamkniętego z przyjętym prawem sterowania VFO (z ang. *Vector Field Orientation*). Takie podejście pozwala na realizację zadania przejazdu przez zbiór punktów, a także śledzenia ścieżki z uwzględnieniem przyjętych ograniczeń. Podczas planowania ścieżki robota Autor stosuje ścieżki  $G^3$ -ciągłe, które pozwalają na zachowanie ciągłości pierwszej pochodnej krzywizny toru ruchu oraz rozpatruje różne modele środowiska ruchu, tj. reprezentacji otoczenia robota.

Oryginalność proponowanego w pracy rozwiązania problemu algorytmizacji ruchu wynika m.in. z następujących zasadniczych elementów:

- rozwiązanie problemu algorytmizacji ruchu dla nieholonomicznych robotów mobilnych poprzez ściśle powiązanie planowania ze sterowaniem,
- podanie formalnych gwarancji (wyznaczone tunele zbieżności) odpornej realizacji zadania planowania ruchu z gwarancją zachowania narzuconych ograniczeń stanu i sterowania (w tym odporność na niezerowe uchyby wynikające z warunków początkowych lub z powodu zaburzeń zewnętrznych działających na pojazd),
- wyznaczenie analitycznej (jawnej) postaci warunków odpornej realizacji planowania ruchu w ciągłej przestrzeni stanu i sterowania.

Można natomiast czuć niedosyt jeśli chodzi o ilość zaprezentowanych w pracy wyników badań symulacyjnych i empirycznych, które stanowiłyby dodatkowy wkład Autora w dyscyplinę Automatyka i Robotyka. W szczególności, Autor mógł zaprezentować wyniki badań dla przypadków, które wskazywałyby na istotne zalety analizowanych rozwiązań oraz takie, które pozwalałyby na identyfikację ich ograniczeń. Bardziej szczegółowe opisanie implementacji rozwiązania i badań na stanowisku laboratoryjnym mogłoby być z kolei wartościowe dla inżynierów zajmujących się problemami autonomii robotów mobilnych. Zbyt skromne jest także podsumowanie pracy, tj. powinno ono zawierać więcej syntetycznych i kluczowych wniosków wynikających z pracy.

Autor rozprawy doktorskiej stosuje praktyczne podejście do rozwiązywanych problemów, czego przejawem jest uwzględnienie ograniczeń stanu i wejść sterujących w ciągłej dziedzinie czasu oraz w ciągłej dziedzinie konfiguracji robota. Opracowane algorytmy cechuje niski koszt obliczeniowy, co zostało potwierdzone wynikami symulacji, które Autor porównał z wynikami dla rozwiązań znanych z literatury. Ponadto, opracowane algorytmy zostały z powodzeniem przetestowane na etapie badań empirycznych z wykorzystaniem platformy mobilnej MTracker oraz systemu rozszerzonej rzeczywistości pozwalającego na wizualizację środowiska ruchu i ścieżki kreślonej przez robota.

Poza samą rozprawą doktorską Pan mgr inż. Tomasz Gawron ma także wkład w dyscyplinę Automatyka i Robotyka w postaci współautorskich publikacji konferencyjnych, rozdziałów w monografiach oraz publikacji w czasopiśmie punktowanych, w tym z listy A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, które zostały opublikowane w latach 2014-2018. W rozprawie doktorskiej Autor wykorzystał wybrane wyniki opublikowane wcześniej w ramach tych prac, w których Pan mgr inż. Tomasz Gawron najczęściej występuje jako pierwszy autor.



### 3. Poprawność

Rozprawa doktorska została ogólnie starannie zredagowana i jest wolna od istotnych błędów merytorycznych. Została opracowana na wysokim poziomie jeśli chodzi o aspekty naukowe i stosuje kompleksowe podejście do rozpatrywanych problemów. W szczególności, Autor w poprawny sposób stosuje formalizmy matematyczne i w formalny sposób przeprowadza dowody swoich twierdzeń. Omawia także szczegółowe wnioski wynikające z rozważań teoretycznych oraz przeprowadzonych badań symulacyjnych i empirycznych.

Jeśli chodzi o zauważone słabości i błędy pracy, to nie zmniejszają one istotnie poziomu naukowego pracy, ale przede wszystkim utrudniają jej odbiór.

W rozprawie doktorskiej brakuje wprowadzenia w tematykę pracy uwzględniającego aktualny rozwój pojazdów autonomicznych oraz potrzeby społeczne i gospodarcze z tym związane, które umożliwiłoby podkreślenie potrzeby realizacji pracy. Brakuje także szerszego podkreślenia potencjału aplikacyjnego opracowanych rozwiązań w pojazdach autonomicznych oraz zalet i wad opracowanego podejścia w stosunku do metod znanych z literatury.

W tym kontekście proszę Autora rozprawy o omówienie zalet i wad zaproponowanego podejścia algorytmizacji ruchu robota oraz omówienie jego potencjału aplikacyjnego.

W pracy brakuje także podejścia od ogółu do szczegółu, które pozwoliłoby na łatwiejsze wprowadzenie czytelnika w tematykę pracy. Autor nie omówił także jakie poziomy planowania i sterowania można wyróżnić podczas algorytmizacji ruchu robota oraz nie wyeksponował jaki poziom planowania ruchu jest realizowany w pracy, tj. globalny, czy lokalny.

W związku z tym proszę Autora rozprawy o omówienie znanych z literatury poziomów planowania ruchu robotów i automatycznie kierowanych pojazdów oraz określenie, które z tych poziomów są analizowane w pracy.

Rozprawa doktorska abstrahuje od sposobów detekcji przeszkód w otoczeniu robota, o czym należałoby wspomnieć na początku podczas formułowania założeń pracy.

W nawiązaniu do kwestii detekcji przeszkód w otoczeniu robota proszę Autora rozprawy o dyskusję na ile jest to istotne zagadnienie z punktu widzenia rozwiązywania problemu algorytmizacji ruchu robota.

Za mało miejsca Autor pracy poświęcił właściwościom kinematycznym samochodu, w tym nie podał zależności między prędkościami uogólnionymi pojazdu, a promieniem zakręcania, zależności na minimalny promień zakręcania, równania więzów nieholonomicznych, a także zależności umożliwiających rozwiązanie zadania prostego i odwrotnego kinematyki (tj. zależności między prędkościami uogólnionymi pojazdu, a prędkością kątową obrotu własnego tylnego zastępczego koła jezdnego i kątem skrętu przedniego zastępczego koła jezdnego). Przy formułowaniu założeń pracy należałoby także stwierdzić, że przyjmuje się, iż ruch robota odbywa się bez poślizgu wzdłużnego kół jezdnych.

W tym kontekście proszę Autora rozprawy o informację odnośnie tego, które z wymienionych zależności są istotne z punktu widzenia rozwiązywania problemu algorytmizacji ruchu robota.

Szkoda, że Autor nie zaprezentował opracowanych metod algorytmizacji ruchu pojazdu w formie schematów układu sterowania z oznaczeniem wejść i wyjść dla poszczególnych podsystemów, co pozwoliłoby na ich lepsze zrozumienie.

W związku z tym proszę Autora rozprawy o zaprezentowanie tego typu schematu dla wybranych metod algorytmizacji ruchu robota omawianych w pracy.

Jeśli chodzi o zauważone błędy, to dotyczą one m.in. żargonowych sformułowań typu „monocykl kinematyczny” i „samochód kinematyczny”. Należałoby w tym przypadku posługiwać się raczej pojęciami „monocykl” i „samochód” w odniesieniu do obiektów badań oraz „model kinematyczny monocyklu” i „model kinematyczny samochodu”, w przypadku analizowania modeli tych obiektów.



Autor rozprawy doktorskiej stosuje także często nieprecyzyjne określenia typu „pozycja robota” bez wskazania, jaki punkt robota ma na myśli, „prędkość postępową platformy” zamiast „prędkość liniowa platformy”, czy „ruch nominalny” zamiast „ruch zadany”.

#### **4. Wiedza kandydata**

Rozdziały rozprawy doktorskiej pt. „2. Wprowadzenie” i „3. Metodyka algorytmizacji ruchu” omawiają istniejący stan wiedzy w zakresie planowania ruchu robotów mobilnych, sterowania ich ruchem, ich kinematyki oraz sposobów reprezentacji otoczenia.

Większa część pracy stanowi oryginalny wkład Autora w dyscyplinę Automatyka i Robotyka oraz potwierdza, iż kandydat posiada ogólną wiedzę w tej dyscyplinie. Można do nich zaliczyć przede wszystkim rozdziały „4. Analiza prawa sterowania VFO dla zadania przejazdu przez zbiór punktów”, „5. Planowanie sekwencji punktów przejazdowych”, „6. Realizacja przejazdu przez zbiór punktów w układzie zamkniętym – strategia sterowania VFO” i „7. Algorytmizacja ruchu z wykorzystaniem  $G^3$ -ciągłej ścieżki referencyjnej”.

Na podkreślenie zasługuje fakt, iż połączenie w jednej pracy tematyki planowania ruchu z ograniczeniami oraz tematyki sterowania ze sprzężeniem zwrotnym, aby wypracować spójny i efektywny system algorytmizacji ruchu, jest generalnie zadaniem trudnym. Autorowi takie połączenie udało się zrealizować zarówno na poziomie formalnym, obliczeniowym jak i empirycznym, co świadczy o wysokim poziomie rozprawy, a zatem i wiedzy kandydata w dyscyplinie Automatyka i Robotyka.

Bibliografia zawarta w pracy zawiera najbardziej istotne i aktualne prace. Można by było uzupełnić ją m.in. o publikacje przeglądowe Katrakazas in inni (2015) pt. „Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-of-the-art and future research directions” oraz Yuyu Song i Chenglin Liao (2016) pt. „Analysis and Review of State-of-the-Art Automatic Parking Assist System”. Autor rozprawy doktorskiej mógł także powołać się w większym stopniu na literaturę podczas omawiania znanych problemów, np. w zakresie metod reprezentacji otoczenia robota.

#### **5. Inne uwagi**

Jak wcześniej wspomniano praca została ogólnie starannie zredagowana, jednak można mieć do niej kilka uwag redakcyjnych. W szczególności, zapoznając się z pracą można zauważyć zmienny styl Autora, który niekiedy stosuje tryb bezosobowy, a innym razem pierwszą osobę liczby mnogiej.

Na początku rozprawy doktorskiej brakuje spisu ważniejszych oznaczeń, który ułatwiałby zapoznanie się z nią, ale jest natomiast opis notacji, który z kolei ułatwia lekturę.

Autor na rysunkach stosuje oznaczenie robota, które nie wskazuje jednoznacznie na to, gdzie jest jego przód. W tym przypadku lepiej byłoby wprowadzić na rysunku układ odniesienia związany z robotem.

Zamieszczony w pracy spis lematów, wniosków, własności i uwag nic nie wnosi, zwłaszcza w sytuacji, gdy Autor nie stosuje dla nich różnych nazw.

## 6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez artykuł 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (z późniejszymi zmianami) moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

A. Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problem naukowego? (wybierz jedną opcję stawiając znak **X**)

|                          |                                     |                          |                          |                          |
|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Zdecydowanie<br>TAK      | Raczej TAK                          | Trudno<br>powiedzieć     | Raczej NIE               | Zdecydowanie<br>NIE      |

B. Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Automatyka i Robotyka?

|                                     |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Zdecydowanie<br>TAK                 | Raczej TAK               | Trudno<br>powiedzieć     | Raczej NIE               | Zdecydowanie<br>NIE      |

C. Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

|                                     |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Zdecydowanie<br>TAK                 | Raczej TAK               | Trudno<br>powiedzieć     | Raczej NIE               | Zdecydowanie<br>NIE      |

Ponadto, biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy pracy, kompleksowość rozwiązywania problemów naukowych i dorobek publikacyjny kandydata **rekomenduję wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

*Mowej Trójnecław*  
Podpis