dr hab. inż. Maciej Marcin Michałek, prof. PP
Instytut Automatyki i Robotyki
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska
maciej.michalek@put.poznan.pl

Poznań, dn. 20.04.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Arkadiusza Mielczarka
pt. *Lie-algebraiczne algorytmy suboptymalnego planowania ruchu układów nieholonomicznych w przestrzeni zadaniowej*

Podstawa prawna: Recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej, prof. dra hab. inż. Andrzeja Dziedzica, na podstawie uchwały w/w Rady z dnia 21.02.2022 roku (pismo nr RDN-AEE/33/2022 z dnia 03.03.2022 r.).

1. Przedmiot i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy problemu planowania ruchu układów nieholonomicznych z wykorzystaniem metod Lie-algebraicznych, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnienia planowania w przestrzeni zadaniowej. Planowanie ruchu należy do podstawowych zagadnień poruszanych w obszarze robotyki. Rozwiązanie zadania planowania ruchu daje odpowiedź na pytanie o możliwość oraz sposób przemieszczenia robota z punktu początkowego o punktu docelowego, a także umożliwia (już w systemie sterowania ze sprzężeniem zwrotnym) przewidywalną realizację zadania sterowania układem robotycznym w celu wykonania konkretnego zadania ruchowego. Mimo, iż w obszarze planowania ruchu i planowania trajektorii/ścieżki dla układów robotycznych podano już wiele różnych metod obliczeniowych, to nadal ten nietrywialny problem wymaga dalszych badań w celu optymalizacji uzyskiwanych rozwiązań z punktu widzenia wybranych kryteriów jakości ruchu oraz narzuconych ograniczeń, a także w celu zmniejszenia nakładów obliczeniowych wymaganych do wyznaczania planu. Autor rozprawy podjął temat rozszerzenia stosowalności metodyki Lie-algebraicznej (tj. geometrycznie motywowanej metody planowania ruchu stosowanej zasadniczo w ramach przestrzeni konfiguracyjnej układu) do układów nieholonomicznych ze zdefiniowanym wyjściem w przestrzeni zadaniowej. Wybór tematyki uważam za aktualny, ciekawy poznawczo, a także praktycznie istotny. Praktyczne znaczenie zagadnienia wynika z faktu, że w zastosowaniach robotów zadanie wykonywane jest albo przez efektor końcowy robota w przestrzeni zadaniowej (roboczej), albo definiowane jest tylko dla podzbioru zmiennych konfiguracyjnych (lub ich kombinacji), które stają się wyjściem układu dla danego zadania. W konsekwencji naturalnym zagadnieniem staje się planowanie ruchu w przestrzeni zadaniowej właśnie, a nie w przestrzeni konfiguracyjnej. Takie ujęcie problemu może generować dodatkowe trudności wynikające z konieczności uwzględnienia (często nieliniowego i/lub niejednoznacznego) odwzorowania przestrzeni zadaniowej w przestrzeń konfiguracyjną, w ramach której działają sterowania.

Doktorant podjął próbę zastosowania formuły gCBHD (ang. *generalized Campbell-Baker-Hausdorff-Dynkin formula*) do planowania ruchu w przestrzeni zadaniowej, przeniósł koncepcje sterowalności z przestrzeni konfiguracyjnej do zadaniowej, zweryfikował wpływ parametryzacji oraz wartości parametrów sterowań na jakość uzyskiwanych planów, podał nowy efektywny algorytm wyznaczania tzw. pre-sterowań dla formuły gCBHD, podał sposoby oceny trudności i kosztu planowania oraz realizacji ruchu dla systemów nieholonomicznych w przestrzeni zadaniowej (w tym poprzez wyznaczenie tzw. sfer nieholonomicznych), przeanalizował kwestię osobliwości kinematycznych dla układów nieholonomicznych z wyjściem, podał rozwiązanie problemów wyboru warunku początkowego oraz unikania przedwczesnej zbieżności algorytmu planera w zagadnieniu wieloetapowego (segmentowego) planowania ruchu, a także sprawdził praktyczne konsekwencje suboptymalności metody Newtona wykorzystywanej do celów planowania ruchu. Ostatecznie, na podstawie wspomnianych wyników cząstkowych, w dysertacji przedstawiono algorytm planowania ruchu w przestrzeni zadaniowej oraz podano wyniki przykładowych planów ruchu w ograniczonym środowisku kolizyjnym dla dwóch wybranych scenariuszy układu przeszkód statycznych obecnych w przestrzeni zadaniowej. Wyniki numeryczne zaprezentowane w rozprawie dotyczą planów wyznaczanych dla trzech reprezentatywnych przykładów niskowymiarowych systemów nieholonomicznych: monocykla, samochodu kinematycznego (z napędem na oś skrętną) oraz integratora Brocketta.

2. Kompozycja i redakcja rozprawy

Rozprawa została zredagowana w języku polskim i liczy 127 stron numerowanych. Autor zadbał o bardzo wysoki poziom edycyjny zarówno strony matematycznej rozprawy jak i sposobu prezentacji wyników (liczne i przejrzyste tabele oraz wykresy). Na podkreślenie zasługuje fakt dobrze zarysowanego zakresu pracy badawczej Doktoranta, klarownie zdefiniowanej tezy rozprawy (strona 4), a także wyodrębnienie zarówno naukowego jak i praktycznego celu podjętej pracy badawczej, co jest szczególnie istotne w przypadku doktoratów w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Teza rozprawy zakłada możliwość adaptacji i skutecznego zastosowania metody Lie-algebraicznej do systemów z narzuconym równaniem wyjścia oraz sugeruje istnienie dodatkowych możliwości optymalizacji planów ruchu w takim podejściu. Szczegółowa i przejrzysta lista autorskich osiągnięć zawartych w rozprawie została podana przez Doktoranta na stronie 5.

Rozprawa składa się z jedenastu rozdziałów oraz podsumowania, uzupełnionych jednym dodatkiem, streszczeniem (w dwóch wersjach: polsko- i anglojęzycznej), spisem treści, spisem oznaczeń, wstępem, a także spisem bibliografii zawierającym 109 cytowanych pozycji literatury (łącznie z siedmioma pracami z udziałem Doktoranta, w czterech w nich jest On pierwszym autorem). Wstęp zawiera uzasadnienie podjęcia tematu badań, jawnie formułuje cel i tezę rozprawy, omawia zakres i główne osiągnięcia rozprawy oraz wyjaśnia jej strukturę. Dwa pierwsze rozdziały dysertacji poświęcono przytoczeniu najważniejszych definicji i matematycznych narzędzi stosowanych w dalszej części rozprawy, a także omówieniu znanych metod planowania ruchu. Zasadnicze wyniki rozprawy przedstawiono w rozdziałach od 3 do 11. Charakter poszczególnych rozdziałów i wyników w nich zawartych jest zróżnicowany. Mianowicie treść rozdziałów 3 i 6 ma charakter formalny, w ramach których podano autorskie wyniki natury matematycznej (twierdzenia z dowodami) zilustrowane stosownymi przykładami; treść rozdziałów 5, 7, 8, 9 i 11 ma zasadniczo charakter koncepcyjny, w których podano propozycje autorskich algorytmów lub metodyk postępowania zweryfikowanych wynikami przykładowych obliczeń numerycznych i wynikami porównawczymi; rozdziały 4 i 10 mają zasadniczo charakter studium przypadku, w których przedstawiono numeryczne wyniki ilustrujące wpływ wybranych komponentów oraz parametrów algorytmu planowania ruchu na jakość wynikowych planów dla przyjętych scenariuszy zadań ruchu.

Percepcja treści matematycznych zawartych w rozprawie nie jest łatwa z powodu użycia bardzo dużej liczby symboli i oznaczeń, jednak ich zastosowanie wydaje się uzasadnione koniecznością zachowania jednoznaczności wywodu matematycznego. W tekście pracy można znaleźć (stosunkowo nieliczne) usterki typograficzne i językowe, nieścisłości użycia lub brak wyjaśnienia niektórych symboli i stosowanych pojęć matematycznych, brak jednostek fizycznych przy okazji prezentowania wybranych wyników, a także niespójny opis modelu kinematyki samochodu kinematycznego w dodatku A2 (szczegółowe uwagi na ten temat podano w punkcie 4 recenzji). W kontekście cytowanej literatury w obszarze zagadnień sterowania sterowcami, łodziami oraz manipulatorami nieholonomicznymi dziwi bardzo skąpe odniesienie do publikacji polskich badaczy (sporo wyników w tym zakresie zostało opublikowanych w ostatnich latach). Poza tym w przeglądzie stanu wiedzy na temat planowania ruchu (rozdział 2, punkt 2.3.4) zdecydowanie brakuje odniesień do prac prof. Stevena LaValle'a (twórcy przywoływanej tam metody RRT), w tym do bardzo znanego i dostępnego w internecie podręcznika pt. *Planning Algorithms* jego autorstwa.

Układ treści rozprawy jest dobrze przemyślany, logicznie spójny i zasadny. Autor najpierw w rozdziałach od 3 do 10 przedstawia opis oraz analizę lub numeryczną weryfikację kluczowych komponentów systemu planowania ruchu, aby w rozdziale 11 w pewnym sensie podsumować wcześniejsze wyniki cząstkowe wykorzystaniem proponowanego algorytmu Lie-algebraicznego do planowania ruchu dla robotów mobilnych w przestrzeni zadaniowej w obecności przeszkód statycznych. Przyjęte scenariusze zadań planowania nie mają co prawda dużej złożoności (obecność tylko 2 lub 3 wypukłych przeszkód przy jednoznaczności przejścia z punktu początkowego do punktu docelowego), jednak są nietrywialne z powodu występowania wąskich przesmyków w silnie zatłoczonym środowisku ruchu. Wiele wyników ilościowych zawartych w rozprawie było opartych na realizacji bardzo dużej liczby symulacji numerycznych z wykorzystaniem metodyki Monte Carlo. Jest to właściwe podejście w przypadku stosowania analizy ilościowej, które pozwoliło Doktorantowi na sformułowanie statystycznie uzasadnionych wniosków.

3. Ocena zastosowanej metodyki badawczej i uzyskanych wyników

Od skutecznego systemu planowania ruchu w robotyce zwykle wymaga się spełnienia kilku zasadniczych warunków, mianowicie:

(W1) wystarczającej dokładności w odniesieniu do osiągania punktu docelowego,

(W2) akceptowalnego charakteru wyznaczanych planów w kontekście oczekiwanych cech jakościowych i ilościowych planu ruchu takich, jak np. niski koszt energetyczny realizacji planu, liczba zmian znaku prędkości sterujących, akceptowalna oscylacyjność oraz stopień ciągłości sterowań dla zaplanowanego ruchu, akceptowalna obszerność ruchu wymagana dla poszczególnych zmiennych konfiguracyjnych lub zadaniowych,

(W3) uwzględnienia ograniczeń narzuconych na dopuszczalną ewolucję systemu,

(W4) niskiej złożoności obliczeniowej oraz dostatecznej szybkości działania algorytmu planowania umożliwiającej skuteczne wyznaczanie nowych planów w odpowiedzi na dynamicznie zmieniające się środowisko ruchu lub zmianę zadania stawianego dla systemu,

(W5) względnej prostoty doboru komponentów oraz parametrów algorytmu planowania w celu skutecznego ingerowania w cechy jakościowe i ilościowe wynikowych planów,

(W6) względnej uniwersalności zastosowanego algorytmu planowania pozwalającej na skuteczne wyznaczanie planów dla całej klasy systemów dynamicznych.

Autor dysertacji opracował algorytm planowania ruchu w przestrzeni zadaniowej z uwzględnieniem (choć w różnym stopniu) wszystkich wspomnianych wyżej warunków dla całej klasy układów dynamicznych opisujących kinematykę ruchu robotów podlegających działaniu niecałkowalnych więzów prędkościowych. Można do nich zaliczyć, m. in., proste i przegubowe kołowe roboty mobilne o ograniczonej mobilności, manipulatory nieholonomiczne, a także abstrakcyjne systemy jak integrator Brocketta czy system łańcuchowy. W rozprawie przyjęto jako systemy testowe, dla których wyznaczano i weryfikowano uzyskane plany ruchu, trzy popularne kinematyki: monocykla, samochodu kinematycznego (tu: z napędem na oś skrętną) oraz integratora Brocketta. Taki wybór jest zasadny - dwa pierwsze układy należą do najbardziej popularnych kinematyk stosowanych dziś w kołowej robotyce mobilnej i zautomatyzowanym transporcie, natomiast integrator Brocketta należy do układów kanonicznych. Moim zdaniem zabrakło jednak choćby jednego przykładu poświęconego kinematyce o wymiarze wektora konfiguracji $n>4$ i o wszystkich zmiennych konfiguracyjnych znaczących dla praktycznego zadania ruchu (mogłaby to być np. kinematyka pojazdu w dwoma przyczepami dla $n=5$ lub $n=6$). Taki przykład dałby szerszy ogląd zakresu stosowalności i praktycznej skuteczności proponowanej metodyki planowania także tam, gdzie proste intuicje geometryczne (skuteczne dla niskowymiarowych przestrzeni konfiguracyjnych) zawodzą w przypadku systemów złożonych.

Doktorant zaproponował rozszerzenie stosowalności znanych z literatury metod Lie-algebraicznych (w szczególności formułę gCBHD) inspirowanych wynikami geometrii różniczkowej w kontekście opisu ruchu bezdryfowych układów nieholonomicznych. Takie podejście jest stosunkowo uniwersalne (dotyczy szerokiej i praktycznie istotnej klasy systemów dynamicznych - mamy tu odniesienie do warunku (W6)), a dzięki geometrycznej naturze metod Lie-algebraicznych pozwala na bardziej intuicyjny wgląd w trudny problem wyznaczania planu ruchu dla systemów dynamicznych podlegających działaniu więzów (odniesienie do warunku (W3)). Intuicje geometryczne wynikające ze stosowania metod Lie-algebraicznych umożliwiają i w pewnym sensie ułatwiają dobór komponentów i parametrów w celu intencjonalnej optymalizacji planów w kontekście kryteriów jakości ważnych dla konkretnych zastosowań praktycznych (odniesienie do warunku (W5)). W tym aspekcie zaproponowane rozwiązanie uważam za zasadne i ciekawe, zwłaszcza że dotyczy przestrzeni zadaniowej, która jest naturalną przestrzenią realizacji zadań stawianych robotom.

W rozdziale 3 zauważono i matematycznie udowodniono prostą zależność (suma zerowa) zachodzącą między współczynnikami tzw. pre-sterowań oraz zaproponowano oryginalny kombinatoryczny algorytm wyznaczania współczynników pre-sterowań w celu zmniejszenia złożoności obliczeniowej i przyspieszenia procesu planowania (mamy tu odniesienie do warunku (W4)). Jest to jeden z dwóch formalnych wyników naukowych zawartych w rozprawie, który zasługuje na podkreślenie. Zalety wykorzystania algorytmu zilustrowano przekonującymi ilościowymi wynikami porównawczymi (tabela 3.4, str. 43) w kontekście alternatywnej metody wziętej z literatury (zalety są widoczne już dla liczby sterowań m=2).

Kolejne formalne wyniki przedstawiono w rozdziale 6, gdzie zaproponowano przeniesienie (definicję) własności sterowalności w krótkim czasie z przestrzeni konfiguracyjnej (w skrócie Q-STLC) do przestrzeni zadaniowej (X-STLC). Koncepcja przeniesienia jest dość intuicyjna, jednak postać wzoru (6.4) nie została wystarczająco wyjaśniona, a koncepcja 'zasady analogii' przywołana na stronie 65 pod wzorem (6.5) wymagałaby (dla zachowania ścisłości wywodu) szerszego uzasadnienia. Na stronach 65-66 udowodniono twierdzenie 2 o istnieniu układu nieholonomicznego z funkcją wyjścia odpowiadającą danej różnicy między maksymalną i minimalną X-warstwą. Nie jest jednak jasne czy lub w jaki sposób twierdzenie 2 ma znaczenie dla proponowanej w dysertacji koncepcji planowania ruchu. W rozdziale 6 przeanalizowano także osobliwości konfiguracyjne dla kinematyk nieholonomicznych z funkcją wyjścia. Wyniki tej analizy i ich konsekwencje opisane na str. 67 są interesujące. Szczególnie interesująca jest ich relacja do wyników zawartych w ostatnio opublikowanym artykule DOI: 10.1109/LRA.2020.3005889 na temat manewrowości przyczepy w nieholonomicznych pojazdach przegubowych. Czy można w jakiś sposób odnieść rozważania z punktu 6.3 rozprawy do wyników zawartych we wspomnianym wyżej artykule? Jakościowa analiza porównawcza przedstawiona w tabeli 6.1 na str. 70, gdzie cechy podejścia Lie-algebraicznego skonfrontowano z cechami metody endogenicznej przestrzeni konfiguracyjnej, jest zasadna. Porównanie takie odgrywa bowiem istotną rolę porządkującą.

Algorytmy obliczeniowe i wyniki numeryczne zawarte w rozdziałach 4, 5 i 7 zasadniczo odnoszą się do warunków (W1), (W2) i (W5), gdzie sprawdzono wpływ parametryzacji, wartości parametrów, skalowania, rotacji i przesunięcia fazowego sterowań (wyrażonych w skończonej bazie Fouriera) na wybrane (praktycznie istotne) ilościowe cechy generowanych planów ruchu, a także podano sposób przybliżonego wyznaczania tzw. sfer nieholonomicznych ilustrujących w sposób geometryczny poziom trudności (bądź energochłonności) realizacji ruchu przez rozważane systemy nieholonomiczne. Wyniki numeryczne przedstawione w rozdziałach 4, 5 i 7 mimo, iż należy traktować w dużej mierze jako studium przypadku, mogą stanowić praktyczną wskazówkę jak stosować metody Lie-algebraiczne w konkretnych problemach planowania ruchu i z pewnością mogą być cenną użytkową wartością dodaną (zaprezentowaną analizę można poprzez analogię zastosować także do innych systemów nieholonomicznych). Zaproponowana w rozdziale 7 koncepcja sfery nieholonomicznej (oraz podany sposób jej wyznaczania) ma być analogiem do elipsoidy manipulowalności wyznaczanej dla manipulatorów holonomicznych. Analiza sfer nieholonomicznych z pewnością może być pomocna w ocenie lokalnej trudności ruchu systemu nieholonomicznego w poszczególnych kierunkach przestrzeni konfiguracyjnej lub zadaniowej, jednak Autor nie podał w sposób jawny jak znajomość takiej sfery można wykorzystać w celu optymalizacji planów ruchu. Wyznaczone sfery, a w szczególności przekroje pokazane na rys. 7.5 i 7.6, ukazują wyraźny wpływ rodzaju parametryzacji sterowań na otrzymywany kształt sfery nieholonomicznej. Najważniejsze wątpliwości, które nasuwają się po lekturze rozdziałów 4, 5 i 7 dotyczą następujących kwestii:

(a) W jaki sposób błędy całkowania numerycznego równań kinematyki systemu (szczególnie dla dużych amplitud sterowań, dla szybkozmiennych sterowań, długich czasów sterowania lub w przypadku dużej liczby 'nawrotów' robota) zaburzają faktyczne wartości wskaźników ze wzorów (4.8)-(4.9), a także spełnienie warunku (5.10) i tym samym mogą zniekształcać ogólne wnioski wyprowadzone na podstawie uzyskanych wyników (rys. 4.4 na str. 49 oraz działanie Algorytmu 5.1 ze str. 57)?

(b) W jakim sensie uzyskane plany ścieżek z rys. 4.1 do 4.7, które istotnie różnią się od ścieżek zrealizowanych przez robota, można uznać za akceptowalne lub użyteczne? Czy istotna jest tylko zgodność dla punktu docelowego?

(c) Rysunek 7.3 prezentuje dwie sfery – jedną obliczoną z wykorzystaniem formuły gCBHD wg Algorytmu 7.1 podanego na stronie 74 i drugą obliczoną poprzez całkowanie numeryczne kinematyki układu z równaniem wyjścia ze wzoru (6.1); na stronie 76 Autor stwierdza, że różnice w kształcie obu sfer są nieznaczne i świadczą o użyteczności tej pierwszej w planowaniu ruchu. Patrząc na rys. 7.3 nie jest to w pełni przekonujące stwierdzenie i tym samym wniosek o użyteczności sfery wyznaczonej na podstawie Algorytmu 7.1 wydaje się subiektywny, bo podany bez poparcia żadnymi obiektywnymi argumentami. Ta kwestia wymaga zatem ściślejszego uzasadnienia.

(d) W rozdziale 7 (i generalnie w całej rozprawie) przyjęto jako definicję wektora wyjściowego pewien wybrany podzbiór właściwy zmiennych konfiguracyjnych (uzasadnienie takiego wyboru podano na stronie 75 nad rysunkiem 7.1). Jednak poza takim podstawowym wyborem interesujące byłoby przyjęcie jako wektora wyjściowego np. koordynat wybranego punktu platformy robota (poza początkiem lokalnego układu współrzędnych), dla którego zdefiniowano zadanie ruchu. Taki przykład miałby istotne znaczenie praktyczne i mógłby być także ciekawy poznawczo.

Rozdział 8 poświęcono zagadnieniu optymalizacji wyboru konfiguracji pośrednich odpowiadających pośrednim punktom w przestrzeni zadaniowej w problemie planowania wieloetapowego. Wyznaczony punkt pośredni w etapie poprzednim ma warunkować punkt początkowy dla planera w etapie następnym. Rozwiązanie tego zagadnienia jest zwykle niejednoznaczne, ponieważ przy wymiarze przestrzeni zadaniowej mniejszej od wymiaru przestrzeni konfiguracyjnej (co jest przypadkiem powszechnym) istnieje wiele możliwych konfiguracji pośrednich odpowiadających temu samemu punktowi pośredniemu w przestrzeni zadaniowej. Doktorant zaproponował rozwiązać powyższy problem stosując analizę trudności ruchu z poszczególnych punktów pośrednich i opracował Algorytm 8.1 (str. 83), który premiuje ruch w kierunku 'długich' pól wektorowych o niskim stopniu wskazujących kierunek zbieżności do punktu docelowego. Takie podejście, dzięki geometrycznym interpretacjom metod Lie-algebraicznych, wydaje się intuicyjnie zasadne. Efektywność planów budowanych w ten sposób porównano z alternatywnymi planami (uzyskanymi metodą Newtona) optymalizowanymi pod względem minimalizacji energii sterowań. Korelację między Lie-algebraiczną oceną trudności ruchu a energetycznym kosztem ruchu sprawdzono numerycznie (wyniki w tabelach 8.1 i 8.2 na str. 86-87). Wnioski podane na stronach 85-86 sugerują, że uzyskana korelacja dla monocykla i samochodu kinematycznego jest duża, co jest prawdą, ale zasadniczo tylko w odniesieniu do kinematyki monocykla. W przypadku kinematyki samochodowej wyniki nie są w mojej opinii tak jednoznaczne i tu wnioski powinny być sformułowane ostrożniej. Także wniosek o zmniejszaniu się korelacji wraz ze wzrostem odległości do celu nie jest do końca zasadny na podstawie wartości z tabeli 8.1 (należy pamiętać, że wyznaczano oceny korelacji z użyciem jej estymatora na podstawie skończonej liczby danych, co skutkuje niezerowymi fluktuacjami wartości ocen). Wyniki z tabeli 8.2 ilustrują słabe skorelowanie i tym samym wniosek o nieprzydatności oceny trudności ruchu wg metody Lie-algebraicznej jest słuszny. Należy jednak zaznaczyć, że wyniki dotyczą tylko korelacji związanej z kosztem energetycznym ruchu. Przyjmując inną definicję kosztu ruchu (np. w postaci wymaganej liczby zmian znaku sterowań lub innej miary oscylacyjności ruchu) wyniki mogłyby być inne.

Minimalizacja 'stopnia trudności' planu ruchu (w sensie minimum energetycznego kosztu sterowań) jest przedmiotem także rozdziału 9, w którym podano i numerycznie zweryfikowano sposób unikania przedwczesnej zbieżności algorytmu Lie-algebraicznego w celu uniknięcia wyznaczania planów z dominującymi kosztownymi kierunkami ruchu. Sposób polega na podziale oryginalnego zadania planowania na ciąg sklejanych wyników lokalnych planowań dla stosownie wybranych podcelów (tj. punktów pośrednich). Zaproponowane podejście ma w mojej ocenie dwie słabości. Pierwsza to traktowanie wszystkich zmiennych konfiguracyjnych przy wyznaczaniu odległości 'd' w Kroku 2 Algorytmu 9.1 oraz w warunku (9.5) w taki sam sposób, pomimo iż mają one często różne jednostki fizyczne (np. metry lub radiany). Wydaje się, że wprowadzenie stosownych wag mogłoby ułatwić uzyskiwanie planów intuicyjnie mniej kosztownych. Druga słabość wynika ze sklejania planów składowych w Kroku 7 Algorytmu 9.1 w sposób niegwarantujący ciągłości sterowań (co widać na przebiegach z rys. 9.3). Taki wynikowy przebieg sterowań (będący bezpośrednim rozwiązaniem zadania planowania ruchu) może być nierealizowalny (lub realizowalny tylko w przybliżeniu) przez rzeczywistego robota mobilnego (nieciągłość sterowań na poziomie kinematycznym implikuje nieskończone przyspieszenia i w konsekwencji nieskończone siły uogólnione na poziomie kinetycznym). Zatem minimalizacja energii sterowań kinematycznych na etapie planowania ruchu nie musi w tym przypadku skutkować minimalizacją energii sterowań w rzeczywistym układzie sterowania robotem.

Weryfikacja numeryczna wyznaczania zbioru rozwiązań równania (10.1) ze strony 97 dla różnych parametryzacji sterowań z zastosowaniem iteracyjnej metody Newtona ma w mojej opinii zasadniczo charakter narzędziowy, choć istotny dla praktycznych zastosowań algorytmów Lie-algebraicznych zaproponowanych w rozprawie. W rozdziale 10 sprawdzono numerycznie jakość rozwiązań równania (10.1) z punktu widzenia długości oraz energetycznego kosztu realizacji planów, wymaganego czasu obliczeń, a także dokładności planów w kontekście osiągania punktu docelowego. Podano także wyniki dotyczące liczby przypadków, w których nie udało się uzyskać żadnego rozwiązania równania (10.1) z powodu trudności numerycznych. Należy tutaj zaznaczyć, że do oceny planów zastosowano między innymi miarę euklidesową (10.6), ponownie nie stosując wag dla elementów wektora 'x', a także warunek 'wystarczającej dokładności' planu ze wzoru (10.7) na str. 99, w którym przyjęto w mojej opinii dość duży współczynnik skalujący równy 0,3. Oba te elementy mogą niestety powodować dwuznaczność interpretacji uzyskanych wyników w kontekście ich praktycznej przydatności. Wyniki ilościowe zawarte w tablicach 10.1 do 10.4 zawierają podzbiory wyników wymagające dodatkowego komentarza. Mianowicie:

(e) Z czego wynika wyraźnie odstająca wartość czasu obliczeń równa 1.6 s w tabeli 10.1?

(f) Jak można wyjaśnić bardzo dużą liczbę niepowodzeń planowania wykazanych w tabeli 10.2 w wierszu 5 kolumnie 6?

(g) Jaki jest powód uzyskiwania tak wielu zer (tj. małej dokładności 'd' planów) w tabeli 10.2 pomimo przyjęcia dość dużej wartości współczynnika '\eta' w nierówności (10.7)?

(h) Jakie są przyczyny uzyskiwania bardzo 'długich' planów wskazanych w tabeli 10.4 w kolumnach 4 i 6?

Ponadto plany pokazane na rys. 10.2 (str. 105) dla Zadania 4 są mało intuicyjne i prawdopodobnie niepotrzebnie obszerne. Wydaje się bowiem, że można byłoby podać znacznie krótsze plany dla tego zadania. Czy wskazane wyżej wyniki nie świadczą zatem o pewnej słabości przyjętej metodyki wyznaczania rozwiązań równania (10.1) (przynajmniej z punktu widzenia ich potencjalnej praktycznej użyteczności)?

W rozdziale 11 Autor wprowadza Algorytm 11.1 (str. 108) dotyczący Lie-algebraicznej metody planowania ruchu w przestrzeni zadaniowej, korzystającej ze wstępnego planu geometrycznego pozycji dostarczonego przez jedną z trzech klasycznych metod planowania ścieżki: metodę diagramu Woronoja, metodę grafu widoczności i metodę pól potencjałowych. W pierwszych zdaniach rozdziału stwierdzono, że zaletą planowania w przestrzeni zadaniowej jest mniejsza liczba ograniczeń narzucanych na wynikową trajektorię, co może skutkować poprawą właściwości takiej trajektorii. W pewnym sensie należy się zgodzić z tą tezą, ponieważ przy mniejszej wymiarowości przestrzeni zadaniowej (w stosunku do wymiaru przestrzeni konfiguracyjnej) pojawiają się tzw. *zmienne wewnętrzne*, które nie konstytuują wektora wyjściowego i mogą być planowane z większą swobodą. Należy jednak pamiętać, że ze względów praktycznych zmienne wewnętrzne zwykle muszą spełniać pewne ograniczenia nierównościowe wynikające z konieczności zachowania bezkolizyjnego ruchu całej bryły pojazdu o niezerowych wymiarach (nieuwzględnianych w sposób jawny w dysertacji) lub z powodu wewnętrznych ograniczeń mechanicznych (np. mechanicznie ograniczony kąt skręcenia zredukowanego koła skrętnego samochodu kinematycznego lub konieczność ograniczenia maksymalnych bezwzględnych kątów przegubowych w pojazdach z przyczepami). Czy Algorytm 11.1 przewiduje uwzględnienie obecności tego typu ograniczeń lub czy można go zmodyfikować tak, aby to było możliwe? Poza tym Algorytm 11.1 dziedziczy dwie słabości wspomniane przy okazji omawiania rozdziału 9, tj. traktowanie wszystkich zmiennych wyjściowych w jednakowy sposób (bez wag przy liczeniu normy) oraz sklejanie cząstkowych wyników planowania iteracyjnego bez gwarancji ciągłości sterowań (niestety wykresów wyliczonych sterowań nie podano w rozprawie, a brak komentarza na temat sposobu sklejania nie pozwala domyślnie przyjąć, że sklejanie odbywało się z zachowaniem ciągłości sterowań). Na podstawie wykresów z rys. 11.2 widać spełnienie ograniczeń nieholonomicznych pojazdów wzdłuż wyznaczonego planu, co poza optymalizacją wybranych kryteriów jakości jest zasadniczym celem algorytmu (czyli uczynienie wstępnego planu geometrycznego dopuszczalnym dla kinematyk monocykla lub samochodu kinematycznego). Rysunek 11.2 nie pozwala jednak w pełni ocenić efektu zastosowania metody Lie-algebraicznej, ponieważ wykresy tam przedstawione ilustrują jedynie zmianę współrzędnych pozycji (tj. zmiennych wyjściowych). Do pełnej oceny należałoby także podać przebiegi zarówno pozostałych zmiennych konfiguracyjnych jak i wyznaczonych sterowań ze wzoru (11.1). Kształty uzyskanych ścieżek pozycji widoczne na rys. 11.2 zawierające bardziej lub mniej liczne punkty wierzchołkowe może sugerować, że zamiast energii sterowań korzystniejszym z punktu widzenia gładkości ruchu mogłoby być kryterium liczby nawrotów pojazdu lub innej miary oscylacyjności ruchu. Dodatkowo w przypadku modelu kinematyki samochodu praktycznie istotna jest możliwość ograniczania maksymalnej bezwzględnej krzywizny ruchu oraz maksymalnej bezwzględnej zmiany krzywizny ruchu (pierwsze ograniczenie wiąże się wprost z ograniczeniem narzuconym na kąt skręcenia zredukowanego koła skrętnego, a drugie wiąże się z ograniczeniem drugiego sygnału sterującego w modelu ze wzoru (A.5)). Czy Autor byłby w stanie uwzględnić te kryteria jakości w Algorytmie 11.1?

4. Dodatkowe uwagi i pytania szczegółowe

[U1] W pierwszym zdaniu rozdziału 8 wyjaśniono jak należy w klasycznym sensie rozumieć zagadnienie planowania ruchu (jako wyznaczenie przebiegu sygnałów sterujących przeprowadzających układ z punktu początkowego do punktu docelowego). Takie wyjaśnienie powinno znaleźć się już na samym początku pracy, aby uniknąć licznych wątpliwości wynikających z wcześniejszych rozważań, w których zamiast przebiegu sterowań analizuje się ścieżkę lub trajektorię konfiguracji (albo wyjścia) odpowiadającą tym sterowaniom. Wynikiem algorytmów planowania powinny być najpierw przebiegi sterowań, potem dopiero uzupełnione przebiegami odpowiadających im zmiennych konfiguracyjnych i zadaniowych. Jednak nie zawsze przebiegi sterowań uzyskane w wyniku zastosowania algorytmów planowania ruchu są ilustrowane w rozprawie.

[U2] Opis monocykla - wzór (A.1): drugie pole wektorowe powinno być oznaczone jako stałe, niezależne od $\boldsymbol{q}$. Podobna uwaga dotyczy drugiego pola wektorowego we wzorze (A.5).

[U3] Opis samochodu kinematycznego we wzorze (A.2) jest nieprecyzyjny i częściowo niewłaściwy. Zmienna q_4 to **kąt skręcenia zredukowanego koła skrętnego** (liczony względem osi symetrii pojazdu), współrzędne q_1 i q_2 to pozycja **środka osi** kół ustalonych. Ponadto sterowanie u_1 ma zwykle interpretację (pseudo-)prędkości postępowej środka osi ustalonej i wtedy model (A.5) powinien mieć parametr L zawarty w mianowniku tylko w trzecim wierszu modelu (A.5). Jeżeli zastosuje się niestandardowy zapis tak, jak jest w (A.5), to poprawna interpretacja sterowania u_1 musiałaby dotyczyć prędkości kątowej pojazdu wyrażonej w [rad/s]. Sterowanie u_2 to **prędkość kątowa zmiany kąta skręcenia koła skrętnego**. Podobne uwagi odnoszą się do wersji samochodu kinematycznego z napędem na oś ustaloną.

[U4] W rozprawie nie podano jaką wartość parametru L modelu samochodu kinematycznego użyto do celów weryfikacji numerycznej. Czy była to wartość L=1 m?

[U5] Szkoda, że Autor rzadko stosuje operator 'równości z definicji', ponieważ jego użycie często wyjaśnia właściwą intencję wzoru. Wydaje się, że powinien być on użyty np. we wzorach (2.23), (2.55), (4.1), (4.8), (4.9), (4.11), (5.6), być może (6.4), a także we wzorach (6.26)-(6.27), (7.1), (7.5).

[U6] Czy możliwe jest skuteczne zastosowanie zaproponowanego algorytmu Lie-algebraicznego do planowania ruchu dla bezdryfowych systemów, które nie są różniczkowo płaskie? Przykładem takiego systemu może być pojazd kołowy z przynajmniej dwoma przyczepami wyposażony wyłącznie w mocowania pozaosiowe.

[U7] Wydaje się, że właściwą interpretacją zależności ze wzoru (4.10) jest stałość mocy, a nie energii (energia sterowań to stosowna całka, jak np. we wzorze (5.6)).

[U8] Brak wykresów orientacji przy okazji prezentacji rys. 4.1 ze strony 47 nie pozwala na stwierdzenie jaką orientację końcową zaplanował algorytm. Podobny komentarz dotyczy rysunków 4.2-4.4.

[U9] Sposób uzyskania wyniku całkowania podany we wzorze (5.6) wymaga krótkiego komentarza.

[U10] Opis przykładu 7 ze strony 69 jest dość lakoniczny. Brak wyjaśnienia choćby cząstkowych wyników obliczeniowych czyni go niestety mało komunikatywnym.

[U11] Na stronie 74, w drugiej kropce od dołu strony, jest powołanie się na 'twierdzenie Chow', którego nie ma wprost sformułowanego na stronie 65, do której odnosi czytelnika Autor.

[U12] Na wykresach sygnałów, ścieżek/trajektorii oraz sfer nieholonomicznych brakuje jednostek fizycznych pomimo istnienia w większości przypadków konkretnej interpretacji fizycznej wyników. Poza tym wartości liczbowe w rozprawie zasadniczo podawane są bez jednostek (co ma uzasadnienie tylko w specyficznych przypadkach, np. dla integratora Brocketta).

[U13] Z wykresów na rys. 8.1 (str. 87) nie jest jasne jak zachował się robot na początku ruchu: obrócił się w miejscu czy orientacja początkowa była równa pi/2?

[U14] We wzorze (9.1) wprowadzono iloczyn dwóch miar jakości 'lie(.)'. Dlaczego użyto tutaj iloczynu? Jakie jest uzasadnienie tej propozycji?

[U15] Na rys. 9.1 i 9.2 można zauważyć, że zwiększanie wartości '\delta' skutkuje planami bliższymi 'naturalnym' (mniej kosztownym energetycznie?) ruchom pojazdu. Czy ten trend widać także w przypadku innych systemów dynamicznych niż monocykl i samochód?

[U16] Jakie są przyczyny relatywnie dużych wartości podanych w tabeli 11.1 dla środowiska 2 w kolumnie 6 (wiersz 4), a jakie dla wartości podanych w tabeli 11.2 dla środowiska 2 w kolumnie 12 w wierszu 3?

[U17] Opis w punkcie 1.6 (str. 16) wydaje się nieścisły, ponieważ wzory (1.20) do (1.22) oznaczają teoretyczne wielkości statystyczne, natomiast zbiory A i B zawierają dane, tj. **realizacje** zmiennych losowych (formalnie powinny oznaczać zbiory zmiennych losowych, a nie zbiory ich realizacji).

[U18] Przy opisie artykułów konferencyjnych w spisie bibliografii nie podano miejsc konferencji lub są one niepełne. Poza tym w referencjach [24], [57], [73] oraz [109] w stosownych miejscach powinny być użyte duże litery. Brakuje stosownego cytowania przed równaniem (2.31) (równanie Ważewskiego-Dawidenki).

[U19] Niejasności związane z użytymi symbolami i oznaczeniami matematycznymi: niezdefiniowany symbol pod znakiem sumy w (1.9); niewyjaśniony symbol 't' w (1.16); niewyjaśniony symbol '**L**_2' w pierwszej linii punktu 1.5.1; niewyjaśniony symbol 'N_+' w (1.18); niewyjaśniony operator konkatenacji w (2.3); brak indeksu górnego 'Q' przy 'f_i(***q***)' w tekście pod wzorem (2.4); notacja na rys. 2.1 i rys. 2.2 jest niespójna z tą użytą w tekście; w Kroku 1 Algorytmu 2.1 brakuje wektora sterowań przy '***f***(***q***)'; pierwsza równość we wzorze (2.12) powinna być przybliżona ('\approx'); brak spacji po słowie 'gdzie' we wzorze (2.15); niejasny zapis i znaczenie wzoru (2.24) wraz z niezdefiniowanym symbolem '***C***(T)'; znaczenie symbolu '\ksi' we wzorze (2.25) jest niewyjaśnione; brak wyjaśnienia dla '\vartheta' we wzorze (2.29); pierwszy znak równości we wzorze (2.31) chyba powinien być zastąpiony znakiem mnożenia; brak stosownego indeksu przy 'u' we wzorach (2.32) oraz (2.33); w równaniu (2.33) brakuje przyrostu '\vartheta', a w zakresie zmian '\vartheta' chyba brakuje zera (podobnie we wzorze (2.34)); interpretacja symbolu 'exp()' wprowadzona we wzorze (2.36) nie została podana (podobnie z 'log()' w przykładzie 4 na str. 25); brak argumentu '***u***' z prawej strony wzoru (2.53); indeks 'i^*' we wzorze (2.45) nie jest wyjaśniony; niespójna notacja 'z()' na dole strony 29 (punkt 2.2.4.3) z wcześniejszą notacją tego operatora oraz nieznany argument '***q***^*_c'; symbol 'o_{i,j}' na str. 331 (wzór (2.65)) nie jest wyjaśniony; brak tłustej czcionki dla 'x' we wzorze (2.66); symbol '\beta_d' użyty we wzorze (3.8) na str. 38 nie jest wyjaśniony; w podpisie tabeli 3.2 na str. 42 chyba zamieniono symbole 'r' z 'm'; kąt '\beta' we wzorze (4.5) nie jest wyjaśniony; w trzeciej linii pod wzorem (5.5) winno być raczej '***p***_0' zamiast '***q***_0'; górna granica sumy 'N_i' we wzorze (5.6) nie jest wyjaśniona; zapis typu '0.1/0.5' na str. 57 pod Algorytmem 5.1 i w innych miejscach rozprawy (np. str. 78, 82, 108) jest mylący, bo można odczytać go jako operację dzielenia; interpretacja indeksu 'i' we wzorze (6.4) nie jest wyjaśniona; symbol '\hat{p}' użyty w (6.6) jest mylący (to nie jest parametr); w przykładzie 6 na str. 69 w linii 13 od góry chyba powinno być 'q_3 \not = ...' (błędny indeks); w ostatniej linii strony 73 element 'w_i' jest traktowany jako wektor, a we wzorze (7.1) jest on skalarem (jak wygląda zatem wektor we współrzędnych hipersferycznych?); symbol z lewej strony równania (7.3) nie jest wyjaśniony; na stronie 76 Autor operuje trójkami '(\beta_1,\beta_2,R)' zamiast deklarowanymi wcześniej wektorami we współrzędnych hipersferycznych; przy stosowaniu jednostek na str. 80 nie powinno być nawiasów kwadratowych (tj.: 210 s zamiast 210 [s] itp.); na końcu czwartej kropki od dołu strony 82 chyba powinno być '***H***_X^i' (indeks górny 'i'); zbiór 'S^*' nad wzorem (8.14) nie jest zdefiniowany; znaczenie górnego indeksu 'i' przy symbolu '***q***_0' w Kroku 2 Algorytmu 8.2 nie jest podane; wydaje się, że symbol 'lie(***q***^i_0)' w Kroku 3 i Kroku 5 Algorytmu 8.2 powinien mieć drugi argument; symbol '***EN***' wprowadzony w Kroku 5 Algorytmu 8.2 nie jest wyjaśniony; notacja 'f(.)' zastosowana we wzorze (9.1) jest myląca w kontekście wcześniejszej notacji zastosowanej we wzorze (7.4); brakuje funkcji identycznościowej (czteroelementowej) w liście na stronie 98 (linia 4 od góry) dla samochodu kinematycznego i brakuje w tym kontekście przykładu na '***x***_f' we wzorze (10.2); zero po prawej stronie (A.4) powinno być tłuste (wektor zerowy); skalarne zmienne konfiguracyjne w czterech pierwszych liniach punktu A.2 na stronie 118 powinny być zapisane czcionką nietłustą.

[U20] Zauważone w tekście nieścisłe lub niewyjaśnione terminy: 'objętość manewru' (streszczenie oraz str. 107);

element odwrotny pod definicją 1 na str. 9 nie został zdefiniowany; 'macierz jednostkowa' pod wzorem (1.15) nazwana jest w spisie oznaczeń 'macierzą identycznościową'; 'wiarygodne przybliżenie' (str. 29 pod wzorem (2.55)); 'dowolna funkcja jakości' na str. 31 w trzeciej linii od góry; brak wyjaśnienia skrótu ZMP na str. 31.

[U21] Zauważone wybrane usterki lub niezręczności językowe: 'jednokołowiec' (określenie potoczne, lepiej 'monocykl'); brakuje początku zdania przed (2.19); brak dużej litery na początku zdania na str. 46 w 5 linii od dołu; ostatnie dwa zdania na str. 66 - brakuje kropki przed 'Żaden', powinno być 'własności', kwantyfikator jest zbędny; wyrażenie 'wektora parametryzacji przestrzeni sterowań $\boldsymbol{p}$' na str. 68 chyba powinno brzmieć 'wektora parametrów $\boldsymbol{p}$ przestrzeni sterowań'; na stronie 73 w linii 10 brak słowa 'elipsoidy'; wyrażenie 'populacja punktów przeszukujących przestrzeń' ze str. 89 raczej nie ma sensu (to algorytm przeszukuje); 'znajdywać' (str. 90 linia 3 od dołu); powtórzone etykiety 'u_1' na wszystkich wykresach z rys. 9.3; 'krótka parametryzacja' na str. 106 (niejasne sformułowanie).

5. Podsumowanie i konkluzja końcowa

Zasadniczy wynik rozprawy (składający się z wielu wyników cząstkowych stanowiących wartość dodaną niezależnie od wyniku zasadniczego) polegający na rozszerzeniu stosowalności metody Lie-algebraicznej do bezdryfowych układów nieholonomicznych z funkcją wyjścia określającą przestrzeń zadaniową, stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego problemu naukowego w obszarze planowania ruchu robotów. Znaczenie wyniku ma charakter zarówno poznawczy jak i praktyczny, co należy podkreślić w kontekście oczekiwanych rezultatów prac badawczych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Większość wyników zawartych w rozprawie była przedmiotem siedmiu cytowanych publikacji z udziałem Doktoranta, w tym dwóch w czasopismach punktowanych. W celu dodatkowej weryfikacji efektywności proponowanej metody Lie-algebraicznej w warunkach, gdzie proste geometryczne intuicje zawodzą, warto byłoby sprawdzić skuteczność algorytmu planowania ruchu dla przypadku systemu bezdryfowego, który nie jest różniczkowo płaski i którego wymiar wektora konfiguracji jest (znacznie) większy od 4. Takie wyniki pomogłyby wykazać siłę podejścia Lie-algebraicznego w przypadkach (bardzo) trudnych.

Zdecydowana większość najważniejszych uwag sformułowanych w recenzji dotyczy poczynionych konkretnych wyborów projektowych, interpretacji wyników lub ma charakter polemiczny. Żadne ze sformułowanych uwag nie podważają zasadności przyjętej w rozprawie koncepcji oraz zaproponowanej algorytmiki planowania ruchu, które oceniam jednoznacznie pozytywnie. Ponadto należy stwierdzić, że Doktorant wykazał się dobrą znajomością stanu wiedzy oraz technik stosowanych w zakresie planowania ruchu, systemów dynamicznych, teorii sterowania, a także znajomością narzędzi matematycznych służących osiągnięciu postawionego celu naukowego. Zarówno zastosowana metodyka badawcza, jak i wysoka kultura matematyczna rozważań oraz uzyskane wyniki świadczą w mojej ocenie o osiągnięciu przez Doktoranta umiejętności samodzielnego prowadzenia prac badawczych. Stwierdzam zatem, że **przedłożona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania ustawowe** sformułowane w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*. **W konsekwencji wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Arkadiusza Mielczarka do publicznej obrony.**

Maciej Michałek

....

dr hab. inż. Maciej Marcin Michałek, prof. PP