

prof. dr hab. inż. Ignacy Duleba
Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydział Elektroniki
Politechnika Wroclawska
ignacy.duleba@pwr.edu.pl

Wroclaw 2019-08-05

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Tomasza Gawrona
"Algorytmizacja ruchu robotów mobilnych z ograniczeniami stanu i wejść
sterujących w kontekście metodyki VFO".**

1. Charakterystyka ogólna.

Przedłożona do recenzji rozprawa, należąca tematycznie do dyscypliny automatyka i robotyka prezentuje połączenie planowania ruchu ze sterowaniem w jeden system dla atrybutywnych modeli kołowych robotów mobilnych z uwzględnieniem ograniczeń na sterowania, bezkolizyjność i ograniczenia krzywizny ruchu. Jest to nowatorski sposób patrzenia na zadania robotyki, gdyż tradycyjnie zadania tego typu dzielone są na trzy etapy: planowanie geometryczne, planowanie trajektorii, sterowanie. Historycznie podział ten miał swe źródło w trudności połączenia wszystkich zadań w jedno oraz bardzo dużą złożoność obliczeniową. Każdy z etapów wypracował specyficzne techniki i specjalistów, którzy polerując własne metody niekoniecznie są zainteresowani jak efekty ich pracy będą wykorzystywane na kolejnych etapach. Ostatnio badacze łamią ten kanon, a Autor recenzowanej pracy jest chyba prekursorem nowego paradygmatu na rodzimym rynku. Uważam tematykę rozprawy za aktualną i praktyczną zarazem, gdyż rozważane układy są powszechnie wykorzystywane jako podstawowe modele spełniające ograniczenia nieholonomiczne (brak poślizgu wzdłużnego i poprzecznego) dla kołowych robotów mobilnych (planowanie manewrów samochodów, wózków transportowych, itp.).

2. Forma i kompozycja rozprawy.

Rozprawa jest bardzo obszerna i obejmuje 180 stron tekstu podzielonego na 9 rozdziałów, poprzedzonych spisem rysunków, lematów, własności, uwag i algorytmów, dopełnionych bibliografią, liczącą 89 atrybutywnych pozycji skoncentrowanych głównie na metodach bezpośrednio związanych z prezentowanymi zagadnieniami.

Rozdział 1 stanowi zwarte przedstawienie wyników rozprawy w języku polskim i angielskim. W rozdziale 2 wprowadzono przyjętą notację i terminologię. Przedstawiono w nim rozważane modele robotów: jednokołowiec (*monocycle*) i samochód kinematyczny (*kinematic car*), wraz z definicją przestrzeni. Zdefiniowano po jednym problemie dla każdego z modeli, uwzględniającym ograniczenia na stan (konfigurację), sterowania i krzywiznę ruchu. Przedstawiono systematykę rozważanych manewrów (monotoniczne i nie) oraz rozważane rodzaje zbieżności (asymptotyczną i praktyczną). W rozdziale przedstawiono zakres pracy, jej tezę, oraz wkład Autora i strukturę rozprawy zarówno w postaci słownej jak i graficznej. Końcówką część rozdziału stanowi przegląd literatury przedmiotu, ze szczególnym uwzględnieniem metod planowania ruchu oraz przedstawieniem współczesnego trendu łączenia planowania ze sterowaniem w literaturze światowej. Przedstawione są intuicje dotyczące proponowanego

spełnienia ograniczeń bezkolizyjności ruchu w postaci tuneli zbieżności oraz ich elementów składowych (tub).

Krótki rozdział 3. opisuje metodologię jak metody opracowane dla jednokołowca należy transformować na model samochodu kinematycznego. Rozdział zawiera również sposób modelowania środowiska robota (wielokątowy, wypukły, poziomicowy).

W rozdziałach 4-9 przedstawiono autorskie osiągnięcia. Główne rozważania zawiera rozdział 4. Na wstępie podsumowano osiągnięcia pracy [63] (Kozłowski, Michałek) przedstawiająca metodologię VFO (metodę orientowanych pól wektorowych). Praca ta stanowi szkielet i podstawowy budulec kreacji strategii algorytmizacji poszczególnych zadań przedstawianych i twórczo, w wielu kierunkach, rozwijanych przez Autora. Strategia VFO wyrażona jako ewolucja układu dynamicznego pierwszego rzędu posiada kilka dobieranych parametrów, których wartości określają przebieg krzywych całkowych położenia i orientacji rozważanych robotów mobilnych. Kluczową cechą tego stosunkowo nieskomplikowanego modelu jest możliwość analitycznego wyliczenia krzywych całkowych z zachowaniem parametrów w formie symbolicznej. Autor rozprawy, dzięki możliwości uzmienniania tych parametrów i kształtowania ich wartości na podstawie danych wejściowych (ograniczenia na amplitudy sterowań, krzywiznę, czy bezkolizyjność) analitycznie wyraził obszary zajmowane przez krzywe całkowite na płaszczyźnie (x, y) wprowadzając pojęcia tub i tuneli zbieżności służących do kierowania robota nie tylko we właściwe miejsce, lecz także wymuszając właściwą orientację, i to tym precyzyjniej im bliżej (pod-) celu się znajduje. Dobierając (w zależności od danych) parametry projektowe możliwe stało się kształtowanie tub, czy ich konsekwencji – tuneli zbieżności proponowanych metod dla monocykla (szczególnie cenne w obszarach kolizyjnych).

W rozdziale 5. wykorzystano wprowadzoną metodologię do rozwiązania zadania planowania ruchu z optymalizacją jego kosztu. Zaproponowano algorytmy: zachłanny i z optymalizacją liniową. Zaproponowana w rozprawie metodologia szczególnie efektywnie nadaje się do sprawdzania dopuszczalności segmentów ruchu i ich ewaluacji bazując na wyliczeniach analitycznych (dokładnych i szybkich). Ponadto wskazano jak osiągnięte wyniki mogą wspierać klasyczne metody planowania (RRT, RRT*) w ewaluacji tworzonych krawędzi grafu punktów przejazdowych. W końcowej części rozdziału pokazano wykorzystanie przedstawionej metodologii w algorytmie planowania wykorzystującego zrównoleglanie obliczeń (ostatnio modny temat bazujący na technologii CUDA z wykorzystaniem tanich i o dużych mocach obliczeniowych jednostek akceleratorów grafiki).

W rozdziale 6 pokazano jak uciągać sterowania przy przejściu między segmentami. Sformułowano w nim ważoną strategię pochodzącą ze strategii dla i oraz $(i+1)$ segmentu i wykazano formalnie (seria lematów), że strategia wynikowa zapewnia spełnienie warunku pozostawiania trajektorii w tubach zbieżności dla poszczególnych segmentów oraz na ich części wspólnej. Rozważania przeprowadzono dla ruchu monotonicznego oraz trudniejszego (niemonotonicznego), gdzie konieczny jest nawrót robota, a zatem redukcja jego prędkości do zera. Trudniejszy przypadek zrealizowano przy pomocy automatu skończonego. Interesujące jest zachowanie tej strategii, która dla zapewnienia pozostawiania z dala od brzegu tuby (ułatwiającego spełnienie ograniczeń) może powodować ruch oddalający od doraźnego celu. Rozważania teoretyczne zilustrowano stosownymi symulacjami.

Przedmiotem badań poprzednich trzech rozdziałów było wyznaczanie punktów węzłowych i nawigacja między nimi. W rozdziale 7 rozważono zadanie śledzenia (odtworzenia) ścieżki z wykorzystaniem sterownika VFO. Zastosowano tu model poziomicowy odpowiednio ciągłych ścieżek. Pokazano, jak z fragmentów kubicznych, przez zręczne sklejanie, wygenerować wynikową funkcję poziomicową, śledzoną przez sterownik VFO (z jednym tunelem

zbieżności). Innym rozważanym zadaniem śledzenia są ścieżki typu Reedsa-Sheppa. Tu Autor napotkał problem z immanentną nieciągłością klasycznego rozwiązania (połączenia segmentów kołowych i liniowych). Rozwiązał problem przez projektowanie segmentów przejściowych umożliwiających odpowiednio gładkie przejście między segmentami, a regulacja parametrów umożliwia kształtowanie ich geometrii. Ponieważ rozważania są w pełni analityczne (dotyczą nie tylko geometrii ruchu ale także jego kosztu), rozwiązanie takie umożliwia w łatwy sposób adaptację do środowisk kolizyjnych (dla których już nie działa klasyczne rozwiązanie) w postaci algorytmu planowania.

W rozdziale 8 zweryfikowano eksperymentalnie zaproponowane metody algorytmizacji na robocie MTracker, wymuszając programowo by spełniał ograniczenia krzywizny i zachowywał się jak postulowane modele rozważanych robotów. Do lokalizacji robota wykorzystano OptiTrack śledzący markery umieszczone na robocie oraz (mniej dokładny) wizyjny system pokładowy śledzący znaczniki Aruco. Weryfikacja eksperymentalna potwierdziła praktyczność proponowanych metod algorytmizacji zarówno dla zadania nawigacji po sekwencji punktów przejazdowych jak i śledzenia zadanej ścieżki. Zawartości pracy dopełnia rozdział 9., w którym podsumowano jej osiągnięcia.

Praca doktorska bazuje na wcześniejszych pracach współautorskich (dwuosobowe składy z Promotorem) przywoływanych zawsze na początku rozdziałów, ujednoliconych i poszerzonych. Sumarycznie dorobek Autora to dziesięć prac, w tym trzy w czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej.

3. Wyniki uzyskane w rozprawie.

Za oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

- Efektywne połączenie metod planowania i sterowania w jeden system, określane przez Autora mianem algorytmizacji dla bardzo często występujących w literaturze modeli jednokołowca (monocykl) i samochodu kinematycznego.
- Eleganckie uwzględnienie ograniczeń na sterowania (przez skalowanie sygnałów ze współczynnikiem zależnym od amplitudy sygnału naruszającego ograniczenia). Wymuszenie spełnienia ograniczeń na krzywiznę toru przez odpowiednie dobór parametrów projektowych.
- Opracowanie metodyki wyznaczania dodatnio-niezmienniczych tuneli zbieżności dla wielu wariantów zdefiniowanych Problemów (1 i 2).
- Modyfikacja sterownika VFO dla zadania przejazdu przez sekwencję punktów węzłowych oraz dla zadania odtwarzania ścieżek.
- W testach potencjalnego przecinania krzywych całkowych robota z przeszkodami: dowodliwe i analityczne sprawdzanie kolizyjności, niezależniające od dyskretyzacji i dające gwarancję poprawności wyniku testu.
- Propozycja algorytmów wyznaczania punktów przejazdowych, czyli miejsc geometrycznych, które powinien pokonać robot by dotrzeć do celu a zarazem spełnić narzucone ograniczenia, z uwzględnieniem ich realizacji przez sterownik VFO. Przebadanie algorytmów symulacyjne i porównanie ich wydajności z wybranymi algorytmami literaturowymi, pokazująca efektywność zaproponowanych rozwiązań.
- Propozycja metod określania dopuszczalności i kosztów przejazdu między punktami przejazdowymi, jako wspomagających klasyczne algorytmy przeszukiwania (tworzenia) grafu konfiguracji węzłowych. Wskazanie jak można wykorzystać opracowaną metodologię w al-

gorytmie planowania ze zrównolegleniem obliczeń.

- Opracowanie algorytmów śledzenia ścieżki z modelem poziomicowym i dla odtwarzania ścieżek typu Reedsa-Sheppa. Dla pierwszej zřejmě skonstruowano funkcję poziomicową, dla drugiego zaproponowano parametryzowaną strukturę umożliwiającą zmianę segmentów. Dzięki klejeniu takich struktur możliwe stało się planowanie nie tylko wygładzonych ścieżek typu Reedsa-Sheppa, ale także projektowanie ruchu w środowiskach kolizyjnych.
- Przetestowanie zaproponowanych metod zarówno symulacyjne jak i praktyczne na rzeczywistym obiekcie.
- Praktyczność zaproponowanych rozwiązań: przez uwzględnienie na poziomie planowania zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego Autor uzyskał odporność na błędy pomiarowe, czy odstępstwo od warunków nominalnych.
- Zręczne operowanie różnymi technikami obliczeniowymi: funkcje Lapunowa, szacowania, oraz używanie narzędzi ułatwiających stosowanie gotowych rozwiązań programistycznych, np. MILP. Autor, pewnie przez skromność, nie podkreślił własnego wkładu w pisanie i testowanie oprogramowania. Docenić to mogą wszyscy, którzy podobny (mało efektywny, a konieczny) proces przechodzą lub przeszli.
- Kolejne potwierdzenie klasycznego *no free lunch theorem*, stanowiącego o tym, że nie ma idealnego algorytmu rozwiązującego wszystkie zadania. Na przykładzie tej pracy widać wyraźnie, że czym więcej wiemy o problemie i potrafimy tę wiedzę efektywnie przetworzyć na prawa, reguły, heurystyki, to tym efektywniejsze i szybsze jest planowanie i sterowanie robotem.

Praca doktorska jest bardzo dobrze napisana, z dbałością o oznaczenia (kroje pisma wyróżniające obiekty, co ułatwia pracę recenzentom i ułatwia lekturę czytelnikom). W lekturze jest dość trudna, ze względu na sporą liczbę wzorów i wielość wykorzystywanych technik. W dalszej części przyjęto konwencję odnoszenia do tekstu: a^b/a_b strona a wiersz b od góry/dółu.

4. Kwestie do dyskusji, komentarze, uwagi polemiczne i krytyczne.

Uwagi, pytania i komentarze merytoryczne:

1. Autor pisze o krzywiznie ruchu. Czy, a jeśli tak to jaki, jest jej związek z klasycznie rozumianą krzywizną dla krzywej $\mathbf{r} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$ i zadaną zależnością $\|\mathbf{r}' \times \mathbf{r}''\|/\|\mathbf{r}'\|^3$? W 47₃ mowa ewidentnie o krzywiznie krzywej geometrycznej (jakkolwiek tylko jako o obiekcie sparametryzowanym na płaszczyźnie $x^{i+1} = f_i^{i+1}(y^{i+1}, p_i)$).
2. W rozważanych Problemach 1 i 2 występuje ograniczenie na krzywiznę ruchu zdefiniowaną jako $\kappa = v_1/v_2$, gdzie v_1, v_2 oznaczają prędkość kątową i liniową, odpowiednio. Zakładając stałą i skończoną wartość górnego ograniczenia κ_B , czy możliwe jest zawracanie (w punkcie nawrotu prędkość liniowa wynosi zero). Zatem w najgorszym przypadku $v_2 \neq 0$ ograniczenie nie będzie spełnione, a w najlepszym ($v_1 = 0$) powstaje nieoznaczoność typu $0/0$.
3. 4₁ Autor określa przestrzeń konfiguracyjną jako \mathbb{R}^n ($n = 3, 4$), choć formalnie zmienne kątowe należą do \mathbb{S}^1 . Czy były z tą różnicą jakieś komplikacje obliczeniowe (np. jaka jest odległość między kątami 0° i 350°)?
4. 36 – 37 w modelu wielokątowym otoczenia przyjęto $y = c_p x + d_p$, a kłopotów z $x = \text{const}$ uniknięto przez małe zaburzenie danych. Dlaczego nie przyjęto ogólnej postaci prostej $Ax + By + C = 0$ (małe zaburzenia pewnie mogą prowadzić do problemów natury

numerycznej)?

5. 41 zależność (4.2) wydaje się nieprecyzyjna, pierwszy element leży w układzie $(i+1)$ -ym a drugi w globalnym G .
6. 42 równ. (4.4), prawo sterowania Φ_{VFO} ewidentnie jest zdefiniowane w lokalnym układzie współrzędnych, natomiast w sformułowaniu ogólnym (Problem 1, 2) w układzie globalnym (o czym świadczy oznaczenie np. strona 12¹). Dla jednego segmentu nie widzę tu problemu, natomiast przy podaniu prawa dla całości mogą być już kłopoty, nie z działaniem algorytmu, bo ten niejako zapomina przeszłość, a ze stroną formalną zapisu.
7. czy dla wielu blisko położonych punktów przejazdowych występują kłopoty ze spełnieniem ograniczeń w przypadku dużych uchybów początkowych?
8. 48 W równaniu (4.22) występują dane zależne od i -tego segmentu, natomiast w (4.23) ewidentnie jest p_1, p_2 . Oczekiwałbym zależności od p_i . Jak zatem uzasadnić tę sprzeczność. Czy przy danych występujących poniżej p_1, \dots, p_7 przyjęto dodatkowe założenia, np. $N = \dots$, czy warunki brzegowe?
9. 61 skąd w równaniu str. 61₁₁ wzięło się ϕ_2 (na pewno nie z (2.1)) i dalej 61₇, po podstawieniu $e_{ai} = 0$ ginie składnik drugi, a nie pierwszy ($c_{ai} = 1, s_{ai} = 0$).
10. 66 Czy nie ma niedokładności w pierwszym wierszu, gdzie \bar{q}_{di}^{i+1} jest wyrażone w $(i+1)$ lokalnym układzie (zgodnie z konwencją 41₁₀), a Q_f w układzie globalnym? Widać w (5.10), że tyldowane zmienne są sprowadzane z układu $(i+1)$ przez rotację do układu globalnego.
11. 76 Czy postulowanie kwantowanego piłokształtnego kształtu siatki orientacji ma na celu wymuszenie prostoty manewrów (stała orientacja lub liniowo zmienna), czy także inne przesłanki?

Uwagi techniczne, językowe, redakcyjne:

1. 4₆ "parameter długości krzywoliniowej" → parametr ma zwykle inny charakter niż zmienna (i dość często przedstawia się jako indeks dolny). Zatem lepiej używać terminu zmienna parametryzująca niż parametr.
2. 4⁶ (i innych miejscach) "przestrzeń Euklidesowa" → przestrzeń euklidesowa
3. 7 zwykle na rysunkach literaturowych, monocykl umieszcza się tak, by linia pomocnicza służąca określeniu kąta θ nie przechodziła przez początek globalnego układu współrzędnych. Przyjęcie takiego oznaczenia jak Autor budzi pewną konfuzję czym jest kąt θ .
4. 8₁₁ "kompaktowy" → istnieje bardzo dobry polski odpowiednik – zwarty.
5. 9 równ. (2.10) brak jest określenia co oznaczają funkcje $\tilde{e}(t), \tilde{e}_\theta(t)$. Podobnie strona 10 i 11.
6. 9₁₂ zbiór strategii ruchu \mathcal{S} , jest to raczej ciąg niż zbiór.
7. używany jest termin stan (ograniczenie, np. przed (2.17)), czy możliwe jest wszędzie zastąpienie go terminem konfiguracja (który też często występuje)?
8. 38⁸ "zbiorem zamkniętym" → zbiorem domkniętym?
9. W bibliografii użyto naprzemiennie dwóch konwencji: z podaniem (i bez) imion autorów, w niewielu pozycjach brak numerów stron.

Brak pozycji literaturowej: M. Michałek, "Sterowanie metodą orientowania pól wektorowych dla podklasy systemów nieholonomicznych", PP, 2006, rozprawa doktorska.

10. 41 "przywiązany do" → związanym z
11. 42 równ. (4.10) brak określenia, czym jest η_i (na następnej stronie dopiero dowiadujemy się, że to współczynnik naprowadzania). Jakie przyjmuje wartości?
12. 46 przy przejściu od równ. z 46_{16} do 46_{14} warto wspomnieć o $y^{i+1}(t) > 0$ wynikającym z (4.17) i założeniu $y_{di}^{i+1} > 0$.
13. 49_1 w mianowniku za 2 powinno być σ_i .
14. 54-55, (4.27) i równanie poprzedzające, oraz (4.29). Przejście przez moduły lewej i prawej strony (4.27) – nie widzę tej zależności \leq w (4.29). Czy przyjęto jakieś dodatkowe założenie, np. co do znaków?
15. Dla poprawy czytelności warto kroki $SO1 - SO3$ ze str. 77 nazwać Algorytmem 0 i się do niego odwoływać w kolejnych algorytmach.
16. Niezręcznym jest używanie przebitki angielskiej (np. str. 98) prymitywy ruchu czy ścieżki. Lepiej może segmenty elementarne (bloki podstawowe, bazowe?)
17. 101_{12} , 101_9 nie ilość lecz liczba (w innych miejscach też)
18. 110 równ. (6.6), powinno być $sgn(\phi_{2(i+1)})$, a jeszcze lepiej $sgn(\phi_{2,(i+1)})$
19. 127^{3-4} Czy lewe z warunków odnoszą się do prawych warunków z 126_4 , i odwrotnie?
20. Dla poprawienia czytelności, wydaje się, że warto funkcje pisać w konwencji raczej $\Phi(\cdot)$ niż Φ .
21. Nieliczne literówki i drobne błędy językowe: 16_{14} , 18^4 , 34^1 , 34_1 , 54^{11} , 114^7 .

Zdecydowana większość powyższych uwag ma charakter polemiczny, redakcyjny lub porządkowy i nie wpływa na prawdziwość tezy dysertacji oraz jej rangę naukową.

5. Konkluzja.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Tomasza Gawrona wyrażam opinię, że jej Autor wniósł oryginalny wkład do dyscypliny Automatyka i Robotyka. Problemy w dysertacji zostały sformułowane klarownie i są ważne praktycznie, a Autor wykazał się należyłą wiedzą i sprawnością implementacyjną. Wkład Autora w rozwój wiedzy i możliwości jej zastosowania (algorytmy) należy uznać za bardzo duży. Autor jawi się jako badacz dojrzały o szerokich horyzontach i już z pokaźnym dorobku naukowym, bardzo dobrze rokującym na przyszłość.

Stwierdzam również, że **przedłożona do recenzji rozprawa spełnia z dużym nadmiarem wymagania zawarte w ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz stawiam wnioski o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Gawrona do publicznej obrony.**

W przypadku pozytywnego jej przebiegu, wnioskuję również o wyróżnienie rozprawy ze względu na jakość wyników oraz pokaźny ilościowo i jakościowo dorobek publikacyjny.