

## RECENZJA

### **rozprawy doktorskiej mgra inż. Macieja Przybylskiego na temat „Mobile Robot Motion Planning in a Dynamic Environment”**

(Opinia niniejsza została przygotowana na zlecenie Dziekana Wydziału  
Mechatroniki Politechniki Warszawskiej z dnia 26 stycznia 2018 roku)

#### **1. Przedmiot rozprawy**

Planowanie ruchu robotów mobilnych w dynamicznie zmieniającym się środowisku jest aktualnym zagadnieniem naukowym, rozwijanym przez szereg zespołów pracujących w ośrodkach naukowych w różnych krajach. Biorąc pod uwagę jedynie publikacje zeszłoroczne zgromadzone w bibliotece cyfrowej IEEE Explore można znaleźć ponad 50 artykułów na ten temat. Można zaobserwować dwa zasadnicze podejścia w globalnym planowaniu ruchu robotów mobilnych: heurystyczne przeszukiwanie grafu stanów w przestrzeni konfiguracyjnej oraz losowe próbkowanie tej przestrzeni. To pierwsze podejście zostało zastosowane przez Doktoranta i rozwinięte w postaci dwóch autorskich algorytmów. Należy zwrócić uwagę, że elementy pracy dotyczące heurystycznego przyrostowego przeszukiwania grafów mogą mieć szersze zastosowanie, np. w grach komputerowych, nawigacji samochodowej lub systemach logistycznych. Znaczna część rozprawy dotyczy dekompozycji zadania planowania ruchu robota, co jest także charakterystyczną tendencją prezentowaną w literaturze światowej, w szczególności w odniesieniu do pracy robota w czasie rzeczywistym, w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu. Również w tym zakresie dysertacja doktorska przedstawia oryginalne rozwiązania kompaktowego opisu przestrzeni poszukiwań opartego na zdarzeniach oraz hierarchicznego układu planowania trajektorii ruchu robota mobilnego.

Podsumowując te wstępne uwagi, stwierdzam że rozprawa mgra inż. Macieja Przybylskiego podejmuje bardzo ważną i trudną tematykę. Rozważany problem z całą pewnością można uznać za aktualne zagadnienie naukowe w obszarze automatyki i robotyki, a do jego rozwiązania potrzebne były studia literaturowe, samodzielne rozszerzenie znanych wcześniej wyników teoretycznych oraz wykonanie szeregu testów symulacyjnych nowo opracowanych algorytmów. Badania przeprowadzono zarówno na modelach wzorcowych dających ilościowe porównanie z innymi rozwiązaniami, jak i na modelach rzeczywistych pomieszczeń i robotów w ramach przygotowań do przyszłych eksperymentów na obiektach fizycznych.

#### **2. Ocena zawartości rozprawy**

Układ pracy jest logiczny i spójny. Podział treści jest właściwy i ściśle podporządkowany uzasadnieniu tez rozprawy, które zostały sformułowane następująco:

1. A trade-off between optimality and computation time, which allows for mobile robot motion planning in a dynamic environment, can be achieved by a hierarchical composition of heuristic search algorithms of distinct classes (i.e., anytime, incremental, and real-time search algorithms).
2. An incremental and anytime incremental search can be sped up using a search-tree branch cutting technique.
3. An event-based description reduces the size of a search space for minimum-time robot motion planning among moving obstacles.

Tezy te są oryginalne i świadczą o bardzo dobrej znajomości aktualnych badań naukowych dotyczących planowania ruchu robota mobilnego w dynamicznie zmieniającym się środowisku. Wykazują też, że Autor potrafi formułować nowe, ambitne zadania badawcze oraz dążyć do ich co najmniej zadawalającego rozwiązania.

Praca została podzielona na 8 zasadniczych rozdziałów i podsumowanie. Literatura obejmująca 124 pozycje jest bardzo trafnie dobrana, i niemal wszystkie zestawione publikacje są cytowane w rozprawie. Należy odnotować, że mgr Przybylski jest współautorem 4 przywołanych artykułów (w tym jednego opublikowanego w czasopiśmie z listy JCR) i samodzielnym autorem jednej publikacji.

W pierwszym rozdziale rozprawy Autor przedstawia ogólne spojrzenie na zagadnienie planowania ruchu robota mobilnego, wprowadza rozróżnienie statycznego i dynamicznego środowiska pracy, omawia typową strukturę układu sterowania robota oraz zwięźle wprowadza czytelnika w aktualny stan nauki pokazując znane z literatury podejścia do problemu. Na tle aktualnego stanu wiedzy Autor umiejscawia swoje rozwiązania.

Obszar badawczy jest dalej doprecyzowany w rozdziale drugim – dotyczy dwóch zasadniczych celów: planowania ścieżki globalnej robota w środowisku statycznym (lub uwzględniającym sporadyczne zmiany), oraz lokalnego planowania ruchu robota w otoczeniu statycznych i dynamicznych przeszkód. Autor wskazuje znane z literatury rozwiązania, które były inspiracją do prowadzonych badań, i które zostały w istotny sposób rozwinięte w celu realizacji tez rozprawy.

Kolejny rozdział to solidny przegląd literatury przedmiotu ale także wprowadzenie podstawowych pojęć dotyczących opisu przestrzeni pracy robota mobilnego, wykrywania przeszkód, badania przestrzeni konfiguracyjnej, określania przemieszczeń w przestrzeni konfiguracyjnej i przestrzeni stanu, określenia zbioru ruchów podstawowych, które prowadzą do zasadniczego zadania planowania ruchu robota metodą poszukiwania ścieżki optymalnej. Oprócz tej metody Autor przedstawia także inne podejścia globalne: dwie metody bazujące na losowym próbkowaniu przestrzeni konfiguracyjnej i metodę pola potencjałowego, oraz metody lokalnego omijania przeszkód: vector-field histogram i dynamic window approach.

Struktura kilku kolejnych rozdziałów jest podobna i zawiera szczegółowy przegląd literatury, wprowadzenie za pomocą intuicyjnego przykładu, opis teoretyczny autorskiego rozwiązania, analizę działania, testy symulacyjne dające ilościowe porównanie z istniejącymi rozwiązaniami oraz podsumowanie. Taka forma prezentacji dość trudnych matematycznych i

algorytmicznych zagadnień ułatwia zrozumienie i analizę. W rezultacie te rozdziały można traktować jako systematyczny wykład na temat nawigacji robotów mobilnych.

W rozdziale czwartym następuje prezentacja, analiza i testy symulacyjne pierwszego z autorskich algorytmów przeszukiwania grafów – D\* Extra Lite. Zapewnia on znalezienie rozwiązania optymalnego, umożliwia szybką reinicjalizację w przypadku zmian w przestrzeni konfiguracyjnej oraz wykorzystuje wiedzę z wcześniejszych poszukiwań dla przyspieszenia działania. Autor rozpoczyna od omówienia znanych z literatury algorytmów D\* stanowiących podstawę dalszych modyfikacji i bazę do porównań, w szczególności skupia się na algorytmie D\* Lite, który posiada cechy reinicjalizacji i wykorzystania wcześniejszych poszukiwań. Wprowadzone przez Doktoranta modyfikacje dotyczą kilku kluczowych elementów algorytmu: wykrycia zmiany kosztu przypisanego gałęzi grafu, odpowiedniego odcięcia gałęzi i zaznaczenia jako niezbadanej jeśli koszt się zwiększył (co sumarycznie okazuje się mniej kosztowne obliczeniowo niż poszukiwanie przyczyny tego zwiększenia) lub przeznaczenia jej do ponownego przeszukania gdy się zmniejszył (co jest jeszcze obwarowane dalszymi warunkami na ponowne przeszukanie gałęzi). Logika działania algorytmu zostaje najpierw omówiona na prostym przykładzie z pojawianiem się lub znikaniem pojedynczej przeszkody, zaś dalej dokładnie przetestowana na serii symulacji wykonanych dla różnych modelowych przestrzeni z losowymi przeszkodami zgodnie z procedurą sugerowaną przez Sturtevantę. Zaproponowany algorytm D\* Extra Lite działa szybciej od dwóch standardowych rozwiązań znanych z literatury zarówno w przypadku zadania eksploracji nieznanego terenu, jak i w większości przypadków losowego pojawiania się lub znikania przeszkód w trakcie ruchu robota. Jedynie w przypadku losowych map niewielkiej gęstości przeszkód (10%) lepiej wypada algorytm D\* Lite.

Idea odcinania gałęzi grafu została także zastosowana w algorytmie AD\*-Cut pracującym w trybie inkrementalnym i zapewniającym wynik „w dowolnej chwili” (ang. anytime) co omówiono w rozdziale 5 dysertacji. Potrzeba stosowania tego typu algorytmów pojawia się w przypadku realizacji zadań w czasie rzeczywistym gdzie szybkość uzyskania rozwiązania (choćby zgrubnego) jest ważniejsza niż optymalność tego rozwiązania. Zaproponowane rozwiązanie czerpie z zalet znanego algorytmu anytime repairing A\* (ARA\*) i wcześniej wyprowadzonego D\* Extra Lite. Kolejne iteracje przeszukania grafu odbywają się dla zmieniających wartości współczynnika wagowego wyznaczającego heurystykę ARA\*, wartość początkowa i krok zmian współczynnika są parametrami ustawianymi przez algorytmy zewnętrzne (np. na podstawie wiedzy o mapie środowiska lub zmianach). Na iteracje, które poprawiają globalny wynik znalezionego rozwiązania nałożono wcześniej omówione procedury dotyczące gałęzi, w których wykryto zmiany kosztu. Dla algorytmów AD\*-Cut i AD\* wykonano szereg testów dla 3 modeli symulacyjnych. Zaproponowany przez Doktoranta algorytm AD\*-Cut zapewnia krótszy czas uzyskania pierwszego rozwiązania, krótszy czas poszukiwań i rozwiązanie bliższe optymalnego.

Kolejny rozdział dotyczy planowania ruchu robota w dynamicznym środowisku i stanowi realizację tezy 3 rozprawy. Autor wprowadza nomenklaturę właściwą tej szczególnej tematyce oraz przedstawia znane z literatury metody uwzględniające zmiany środowiska

zachodzące w czasie pracy robota w planowaniu jego ruchu. Na tym tle proponuje własne rozwiązanie oparte na uzupełnieniu przestrzeni stanów robota przestrzenią zdarzeń związanych z pojawianiem się i znikaniem przeszkód w danej konfiguracji. Dla takiej przestrzeni Doktorant definiuje bezpieczne interwały, w których dana konfiguracja nie jest w kolizji z przeszkodą oraz udowadnia, że ich liczba jest co najwyżej o 1 większa od liczby ruchomych przeszkód w przestrzeni robota. Dalej określa także metody przeszukiwania stworzonej przestrzeni i planowania ruchu robota.

Najważniejszymi rozdziałami rozprawy są rozdziały siódmy i ósmy, syntezujące wcześniejsze osiągnięcia w postaci hierarchicznego systemu planowania ruchów robota w dynamicznym środowisku i realizujące tezę badawczą nr 1. Autor wprowadza nomenklaturę związaną z tworzeniem struktur hierarchicznych, w szczególności dotyczącą transformacji grafów i prowadzącą do redukcji wymiaru przestrzeni poszukiwań, a następnie szczegółowo omawia znane z literatury metody planowania hierarchicznego wykorzystujące zarówno podejście top-down (startujące w wyższych warstwach abstrakcji i doprecyzowujące planowanie w warstwach niższych), jak i podejście odwrotne startujące poszukiwanie rozwiązań w warstwach najniższych ale generujące heurystyki kosztów w warstwach wyższych – Switchback bazujące na algorytmie A\*. Autor dodatkowo rozróżnia dwa przypadki: pełnej wiedzy o mapie i ruchu obiektów oraz wiedzy pozyskiwanej na bieżąco (co jest bardziej typowym rozwiązaniem dla robotów i pojazdów autonomicznych). Pierwsze porównanie metod hierarchicznych z klasycznym algorytmem A\* następuje dla przypadków modelowych (znanych z wcześniejszych rozdziałów) przy założonej pełnej wiedzy o mapie i ruchu obiektów dynamicznych – i pokazuje wyraźne zalety podejścia hierarchicznego Switchback. Takiego podejścia nie da się jednak bezpośrednio zastosować w przypadku rozpoznawania otoczenia robota na bieżąco – to wymaga kolejnej autorskiej modyfikacji algorytmu. Istotnym elementem tego planowania jest przełączanie kierunku poszukiwań przy przechodzeniu między warstwami, zaś przyszłe zastosowanie systemu w dynamicznym i nieznanym środowisku wymaga dostosowania do pracy w czasie rzeczywistym (nadania limitów czasowych) – w tym zakresie Doktorant czerpie inspiracje w pracach Bulitko i Sturtevant. Testy symulacyjne przeprowadzono na mapach wzorcowych ale z założeniem percepcji świata na bieżąco dla dwóch wersji algorytmu Real-Time Switchback. Wyniki porównano z algorytmem A\* przy pełnej wiedzy o środowisku. Wyniki są dość obiecujące gdyż w ponad 70% przypadków z dziesięcioma i mniej ruchomymi przeszkodami rozwiązanie zostało znalezione w czasie poniżej 10ms (zadanego limitu). Kolejne testy symulacyjne jakie przeprowadził Doktorant dotyczą trójwarstwowej struktury z algorytmem A\* w warstwie najwyższej, algorytmem AD\*-Cut w warstwie pośredniej i local A\* (na poziomie 0). Zostały wykonane w środowisku Robot Operating System w symulatorze Stage na modelu robota typu differential drive z modelem skanera laserowego do rozpoznawania przeszkód i tworzenia mapy otoczenia. Symulacje pokazują poprawne (choć różne) zachowanie modelu w każdej z 10 prób.

Praca jest zakończona zwięzłym podsumowaniem odnoszącym się do tezy rozprawy oraz wskazującym dalsze kierunki badań.

Za najważniejsze osiągnięcia Autora rozprawy uważam:

- Stworzenie dwóch algorytmów przeszukiwania grafów D\* Extra Lite i AD\*-Cut, które zostały symulacyjnie przetestowane i porównane z istniejącymi rozwiązaniami, prezentując lepsze wyniki. Stanowią one realizację tezy 2 rozprawy.
- Zwarty opis przestrzeni pracy robota bazujący na konfiguracji robota i zdarzeniach związanych z ruchem przeszkód, który dalej można przedstawić w formie bezpiecznych interwałów czasowych wygodnej do przeszukiwania.
- Zastosowanie stworzonych struktur i metod do realizacji hierarchicznego systemu planowania ruchu robota w czasie rzeczywistym w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu – Real-time Switchback. System został przetestowany na modelowych mapach prezentując poprawną pracę dla różnych typów środowisk przy kilku do kilkunastu ruchomych przeszkodach. Został także przetestowany w symulacji rzeczywistych pomieszczeń i dla bliskich rzeczywistym zachowań modeli robotów i czujników co daje nadzieje na bezpieczną implementację stworzonej architektury w fizycznym urządzeniu.

### 3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. Zaproponowany przez Doktoranta algorytm AD\*-Cut zapewnia krótszy czas uzyskania pierwszego rozwiązania, krótszy czas poszukiwań i rozwiązanie bliższe optymalnego. Jednak warto się przyjrzeć dużym wartościom maksymalnym niektórych czasów zestawionych w Tabeli 5.1 znacznie odbiegającym od wartości średnich a stanowiącym w moim odczuciu najgorszy przypadek w zadaniach czasu rzeczywistego.
2. Podczas omawiania wyników z Tabeli 7.2, Autor zwraca uwagę, że mediana czasu potrzebnego na replanowanie jest w przypadku obu algorytmów hierarchicznych bliska 10ms, jednak w moim odczuciu, problemem dla poprawnej pracy robota może być to, że w połowie przypadków ten czas jest większy od przyznanego limitu i sięga nawet dziesięciokrotności tej wartości.
3. W testach opisanych w rozdziale 8.3 czas poszukiwań w warstwie RT został ustawiony na 200ms co wydaje się dość długim czasem, zwłaszcza, że ta warstwa pełni zadanie omijania przeszkód w dynamicznym środowisku. Ponadto, choć mediana tej wartości jest w pobliżu limitu 200ms to jednak połowa czasów poszukiwań jest sporo większa od niej.
4. W pracy dostrzegłem niewielką liczbę usterek technicznych i językowych: str. 30 lin. 3 od dołu: *powtórzenie fragmentu tekstu*, str. 55 lin. 12 od dołu: *Nodes*, str. 59 lin. 2 od góry: *maps are*.

### 4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Wymienione uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie umniejszają podstawowych zalet rozprawy, które wymieniłem w pkt. 2. Z pełnym przekonaniem uważam, że mgr inż. Maciej

Przybylski wykazał się znakomitymi umiejętnościami prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie automatyka i robotyka. W mojej ocenie, zawartość merytoryczna przedstawionej rozprawy odpowiada w pełni wymogom stawianym przez art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.). Praca jest obszerna i bardzo starannie zredagowana, a jej przygotowanie w języku angielskim daje szansę na cytowania ważne dla rozwoju kariery naukowej Autora.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. Fran', with a long horizontal stroke extending to the right.