

dr hab. inż. Elżbieta Roszkowska, prof. nadzw. P.Wr.
Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydział Elektroniki
Politechnika Wrocławska

Wrocław, 19.05.2018 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Przybylskiego pt.
"Mobile Robot Motion Planning in a Dynamic Environment"

1. Problematyka naukowa i przedmiot rozprawy

Pomimo wielu lat badań związanych z planowaniem ruchu pojazdów autonomicznych, problem ten wciąż stanowi wyzwanie w dziedzinie robotyki. Istnieje potrzeba modyfikacji i dostrajania znanych metod do celów i ograniczeń konkretnych zastosowań. Różne środowiska mogą wymagać różnego podejścia, przy czym nie jest oczywiste, które podejście sprawdza się lepiej niż inne w danej sytuacji. Celem prowadzonych poszukiwań jest też usprawnienie procesu planowania ruchu robotów oraz podniesienie jakości i efektywności uzyskiwanych planów.

W pracach teoretycznych i rozwiązaniach praktycznych wyróżnić można dwa główne podejścia do planowania ruchu robotów: analityczne, w którym ścieżki robotów wyznaczone są w oparciu o mapę środowiska, oraz reaktywne, gdzie ruch robotów kształtowany jest w sposób regułowy, w oparciu o bezpośrednią interpretację danych dostarczanych przez sensory. Najcenniejszą własnością drugiej grupy algorytmów jest to, że roboty mogą poruszać się w zupełnie nieznanym środowisku, reagując na przeszkody w oparciu o sygnały z czujników zbliżeniowych przetwarzane w czasie rzeczywistym. Ze względu na brak całościowego modelu świata, nie jest jednak w pełni możliwe zagwarantowanie poprawności i efektywności tak zaplanowanego działania robotów. W przeciwieństwie do podejścia reaktywnego, algorytmy analityczne pozwalają na optymalizację ruchu robotów, przy czym jakość uzyskiwanych rozwiązań zależy od rozdzielczości mapy, której wzrost powoduje wzrost czasu obliczeń, ograniczając możliwość zastosowania tego typu algorytmów w systemach czasu rzeczywistego. Dlatego też często stosowaną metodą jest rozdzielenie problemu planowania na dwa poziomy - globalny i lokalny. Na poziomie globalnym uwzględnia się reprezentację całego środowiska, natomiast zostają pominięte lub uproszczone pewne elementy modelu takie jak ograniczenia kinodynamiczne, czy dokładny kształt robota. Dane uzyskiwane przez algorytmy globalne pozwalają zredukować część obliczeń bardziej dokładnego poziomu lokalnego, a także poprawić ich jakość, np. uniemożliwiając osiągnięcie minimów lokalnych.

Metody analityczne planowania ścieżek bazują głównie na reprezentacji środowiska w postaci grafu, modelującego zdyskretyzowaną przestrzeń (lub czaso-przestrzeń) stanu

i wskazującego możliwe przejścia pomiędzy jej punktami. Ze względu na swój matematyczny formalizm odnośnikiem dla algorytmów wyszukiwania ścieżek jest Algorytm Dijkstry, który jednak wymaga przeszukiwania całych grafów, co w przypadku ich większych rozmiarów skutkuje znacznym czasem obliczeń. Aby ograniczyć niepotrzebne eksplorowanie obszarów mapy, które nie prowadzą do celu, wielu autorów ulepszyło koncepcję Dijkstry, dodając heurystyczną ocenę pozostałej odległości do celu, stosując np. odległości Euklidesowe lub Manhattanu. Te ewolucje Algorytmu Dijkstry tworzą rodzinę algorytmów A^* i używane są w szeroko rozumianym planowaniu trasy, wychodzącym także poza obszar robotyki, np. w logistyce, czy nawigacji GPS. Rozwinięciem tych metod w kierunku ich zastosowań w środowiskach dynamicznych jest rodzina algorytmów wyszukiwania przyrostowego klasy D^* . W przypadku wykrycia przez robota zmian w przestrzeni ruchu w stosunku do posiadanej mapy, umożliwiają one przeplanowanie ścieżki z zachowaniem jej optymalnego charakteru. W bardziej złożonych środowiskach dynamicznych, gdzie wyszukiwanie lub aktualizacja optymalnego rozwiązania wymagałaby nadmiernego czasu obliczeń, kompromisowym podejściem są szybkie sub-optymalne algorytmy poszukiwania ścieżek typu 'anytime'. Sytuacja taka występuje w szczególności w przypadku nawigacji w środowisku z ruchomymi przeszkodami, gdzie czas modyfikacji ścieżek jest czynnikiem krytycznym.

Oceniana praca doktorska pana mgr inż. Macieja Przybylskiego bardzo dobrze wpisuje się w przedstawiony powyżej nurt badań. Zgodnie z jej tytułem, dysertacja dotyczy planowania ruchu robotów mobilnych w środowisku dynamicznym. Bazując na sprawdzonej koncepcji podejścia hierarchicznego i ogólnej postaci grafowych algorytmów stosowanych w tej dziedzinie, Doktorant wprowadził nową koncepcję dyskretyzacji czaso-przestrzeni, a zatem także konstrukcji reprezentującego ją grafu, opracował nowe algorytmy wyszukiwania, zaproponował własną koncepcję 3-poziomowego systemu planowania ruchu robotów mobilnych implementującą powyższe rozwiązania oraz wykazał eksperymentalnie wyższą efektywność skonstruowanego systemu w stosunku do rozwiązań istniejących.

Podjęcie tej tematyki badawczej przez mgr. inż. Macieja Przybylskiego było wyjątkowo trafne i ważne zarówno z punktu widzenia naukowego jak i zastosowań praktycznych.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa jest napisana po angielsku, co bardzo podnosi jej walor ze względu na umożliwienie dostępu do uzyskanych wyników całemu środowisku związanemu z omawianą tematyką. Praca została skonstruowana w sposób bardzo przemyślany, dojrzały i logiczny. Składa się z 9 rozdziałów uzupełnionych streszczeniem, spisem literatury, spisem użytych symboli, spisem algorytmów i indeksem. Wyznaczone cele pracy Autor zrealizował w 5 rozdziałach (rozdziały 4-8), natomiast rozdziały 1-3 i 9 stanowią uzupełnienie dyskusji.

Ponieważ pojęcie 'planowania ruchu robotów' nie ma jednoznacznej interpretacji w literaturze, w rozdziale 1, który stanowi wprowadzenie, autor wyjaśnia, co rozumie przez środowisko dynamiczne i jakich zagadnień dotyczy rozprawa. Istotne jest to, że proponowana metodologia nie odnosi się jedynie do abstrakcyjnych agentów mobilnych, a pozwala

planować ruch rzeczywistych robotów, prowadząc do wyznaczenia ścieżki realizowalnej dla robota o określonych ograniczeniach kinematycznych i dynamicznych.

Główne składniki rozdziału 2, "Zakres Badań", to 3 tezy rozprawy, które postulują możliwość osiągnięcia pewnych wyników, oraz lista osiągnięć uzyskanych w pracy, która pokazuje ich zgodność. W szczególności dotyczą one technik przyspieszenia procesu wyszukiwania ścieżek w grafie oraz kompozycji algorytmów prowadzącej do kompromisu pomiędzy jakością rozwiązania i czasem jego obliczeń. Materiał ten sygnalizuje czytelnikowi rozprawy, jeszcze przed jej przestudiowaniem, jakie elementy są szczególnie istotne i nowatorskie zdaniem Autora. Natomiast szersze omówienie tego tematu jest zawarte w rozdziale ostatnim, podsumowującym pracę.

Rozdział 3 stanowi przegląd problemów związanych z planowaniem ruchu i podejść stosowanych do ich rozwiązywania. Wprowadzone zostają koncepcje, na których opiera się dalsza część pracy, w tym pojęcie przestrzeni stanów i algorytmy jej przeszukiwania. Spośród dyskutowanych rozwiązań zostaje wybrane podejście oparte na rastrowej dyskretyzacji przestrzeni stanu i heurystycznych algorytmach wyszukiwania.

Rozdział 4 jest pierwszym z pięciu rozdziałów, które przedstawiają nowe oryginalne rozwiązania Autora. Została tu szczegółowo omówiona koncepcja, struktura i własności algorytmu planowania przyrostowego D^* Extra Lite. Jego nowatorstwo w stosunku do innych algorytmów rodziny D^* polega na reinicjalizacji grafu poprzez usunięcie całej gałęzi, która utraciła zgodność, zamiast wyszukiwania i usuwania dotkniętych tym pojedynczych węzłów. Jak teoretycznie udowodnił Doktorant, podejście takie pozwala utrzymać optymalny charakter wyników, a szeroko zakrojony eksperyment porównawczy pokazał, że w większości przypadków D^* Extra Lite pozwala na znacznie krótszy czas planowania ścieżki niż inne podobne algorytmy.

Kolejnym oryginalnym rozwiązaniem Autora jest algorytm AD^* -Cut opisany w rozdziale 5. Algorytm ten jest sub-optymalną wersją D^* Extra Lite, łącząc w sobie jego metodę reinicjalizacji przeszukiwanego grafu z techniką 'anytime'. Podobnie jak D^* Extra Lite, AD^* -Cut został starannie przetestowany, a przeprowadzone eksperymenty wykazały znaczne skrócenie obliczeń w stosunku do podobnego algorytmu AD^* .

Rozdział 6, "Planowanie w środowisku dynamicznym" przedstawia i rozwiązuje problem planowania z uzależnieniem czasowym, tj. w środowisku z ruchomymi przeszkodami. Wcześniej skonstruowana przestrzeń stanu zostaje poszerzona o wymiar czasu, prowadząc do abstrakcji przestrzeni, której elementami są pary stan-czas i która może być przeszukiwana za pomocą algorytmów grafowych. Podejście takie nie jest nowe, natomiast oryginalną propozycją Autora jest zdarzeniowy sposób dekompozycji powyższej przestrzeni zamiast stosowanego dotąd regularnego podziału osi czasu. Uważam tę koncepcję za wartościową zarówno od strony teoretycznej, jak i praktycznej. Wyróżnienie zdarzeń blokowania i zwalniania stanów pozwala wyróżnić momenty, w których zachodzą zmiany istotne z punktu widzenia unikania przeszkód ruchomych, oraz ukryć przejściowe momenty czasu, co zmniejsza rozmiar problemu. W zdarzeniowo opisanym przestrzeni stanowo-czasowej

Doktorant wyróżnia tzw. warstwy przeszkód (ang. obstacle layers), w oparciu o które konstruowany jest tzw. graf bezpiecznych przedziałów (ang. safe interval graph). Podobny graf może być zbudowany poprzez wyróżnienie przedziałów bezpiecznych w klasycznie (tj. w oparciu o regularny podział osi czasu) opisanej przestrzeni, co jednak prowadzi do większej liczby węzłów i zwiększa złożoność jego przeszukiwania. Fakt ten dobrze pokazuje atrakcyjność koncepcji zdarzeniowej proponowanej przez Autora. Podejście takie tworzy również logiczną podstawę planowania ruchu robotów w środowisku dynamicznym, które zostaje sprowadzone do problemu synchronizacji akcja-zdarzenie. Autor szczegółowo rozwija tę koncepcję dla różnych przypadków synchronizacji i, co istotne, pokazuje możliwość jej zastosowania w planowaniu ruchu robota w czasie rzeczywistym. Jak w poprzednich rozdziałach, rozważania teoretyczne są poparte starannie przygotowanymi i przeprowadzonymi eksperymentami.

Elementy grafowego planowania ruchu robotów przedstawione we wcześniejszych rozdziałach zostają połączone w jednolitą koncepcję w rozdziale 7, "Planowanie hierarchiczne w środowisku dynamicznym". Doktorant udowodnił, że określone wyniki uzyskane za pomocą przeszukiwania przestrzeni stanów mogą być użyte jako heureka w procesie przeszukiwania przestrzeni stanowo-czasowej i wykorzystał to w konstrukcji złożonych algorytmów. Poprzez połączenie lokalnego algorytmu A^* z D^* Extra Lite i lokalnego A^* z AD^* -Cut i ich implementację w technice Switchback Autor uzyskał hierarchiczne algorytmy planowania w czasie rzeczywistym. Obie kombinacje zostały poddane testom, które wykazały ich przydatność w planowaniu ruchu robotów w środowisku dynamicznym.

Rozdział 8 udowadnia praktyczną przydatność opracowanych algorytmów i metod w planowaniu ruchu robotów. Opracowany został system planowania ruchu wykorzystujący zaproponowane w pracy metody i algorytmy i określony dla robota o konkretnym modelu kinematycznym oraz zaimplementowany w symulatorze Stage, w architekturze opartej o ROS. Symulacje oparte o realistyczny scenariusz i z użyciem map rzeczywistego środowiska pokazały, że opracowana metodologia może być z powodzeniem stosowana do planowania ruchu robota w dynamicznym środowisku takim jak np. korytarz z poruszającymi się ludźmi.

Rozdział 9 stanowi podsumowanie, w którym Autor rozprawy przedstawia najważniejsze, jego zdaniem, wyniki swojej pracy, to jest:

- nowe przyrostowe algorytmy wyszukiwania,
- zdarzeniowy opis przestrzeni wyszukiwania,
- hierarchiczne algorytmy wyszukiwania heurystycznego
- system planowania ruchu robota w środowisku dynamicznym (praktyczna implementacja teorii).

Zgadzam się w pełni z Doktorantem oraz uważam te wyniki za istotne i nowatorskie.

Należy także podkreślić wysoką jakość prezentacji wiedzy zawartej w dysertacji. Zrozumiałe przedstawianie algorytmów i idei oraz intuicji, na jakich się opierają, nie jest rzeczą łatwą, tym nie mniej Autorowi w dużym stopniu się to udało. Ponadto szeroka dyskusja literaturowa, którą przedstawia jako tło dla własnych koncepcji, świadczy o tym, że Doktorant jest ekspertem w poruszanych obszarach tematycznych.

3. Uwagi

Nie zauważyłam w pracy żadnych błędów merytorycznych dotyczących proponowanej metodologii. Mam natomiast pewne uwagi dotyczące formalnego opisu przyjętego modelu (głównie precyzji matematycznej), które zamieszczam poniżej z odnośnikami do stron.

s. 28: Pojęcie 'akcji' nie jest dobrze określone. Elementy zbioru, w tym zbioru $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, są zawsze różne. Tymczasem dwie ścieżki generowane funkcjami $\tau(a_1, p)$ i $\tau(a_2, p)$ mogą być takie same.

s. 29: Graf $G = (V, E)$ nie jest dobrze zdefiniowany. Powinno być podane, że wymienione odwzorowania są różnowartościowe. W przeciwnym wypadku dwóm różnym akcjom może być przypisana ta sama krawędź, łącząca te same stany. Dwie różne akcje mogą oznaczać dwie różne ścieżki, a takich alternatywnych tranzycji chyba się w tej pracy nie rozważa. Analogicznie, dwóm różnym stanom może odpowiadać ten sam węzeł, czego chyba rozważany model nie przewiduje.

s. 31: Funkcja tranzycji $\gamma : S \times A \rightarrow S$ ma dwa argumenty. Dlaczego zatem używa się formy $\gamma(a_{s,s'})$ zamiast $\gamma(s, a)$?

Funkcje tranzycji i odwrotnej tranzycji nie są dobrze zdefiniowane, niczym się nie różnią i w szczególności mogą to być te same funkcje. Potrzebny jest dodatkowy warunek, np. $\gamma(s, a) = s' \Rightarrow \exists a' \in A, \gamma^{-1}(s', a') = s$.

Poza tym, przy takiej definicji akcja nie reprezentuje ścieżki. Proszę zwrócić uwagę, że zgodnie z definicją funkcje $\gamma(s_1, a) = s_2$ i $\gamma(s_3, a) = s_4$, są poprawnie określone. Wynika z tego, że ta sama ścieżka a łączy wierzchołek s_1 z wierzchołkiem s_2 oraz s_3 z s_4 .

Przy proponowanej definicji akcje mogą reprezentować etykiety krawędzi grafu (którą można przydzielić dwóm różnym krawędziom), ale nie krawędzie.

Funkcje $Pred(s)$ i $Succ(s)$ powinny być zdefiniowane względem ścieżki, a nie w oparciu o funkcję $\gamma : S \times A \rightarrow S$, która sama w sobie nie wyznacza żadnego porządku.

s. 77: Ponownie pojęcie 'akcji' nie jest dobrze zdefiniowane. Zbiór A najpierw jest definiowany jako zbiór niezależny od S , przy czym zakłada się, że istnieje odwzorowanie $A \rightarrow S \times S$, a następnie elementy zbioru A , będące argumentami odwzorowania, są utożsamiane z parami stanów, będącymi wartościami tego odwzorowania, $a = (s_1, s_2)$.

Albo należy zdefiniować odwzorowanie $A \rightarrow S \times S$, którego wartości będą argumentami funkcji $\gamma()$ albo zdefiniować zbiór akcji jako relację określoną na zbiorze S , $A \subseteq S \times S$.

- s. 84: Definicje \mathcal{E}_{obs} i \mathcal{E}_{free} zakładają, że oś czasu została wstępnie zdyskretyzowana w klasyczny sposób (wyróżnia się momenty czasu $t - 1, t, t + 1$). Jest to niepotrzebne w konstrukcji systemu zdarzeniowego. Te same definicje można określić w oparciu o ciągły czas, dyskretyzując go wyróżnionymi zdarzeniami.
- s. 85: Tezy przedstawiane w formie lematu, czy propozycji (corollary) wymagają dowodu, nawet jeżeli miałyby to być zdanie “prawdziwość tezy jasno wynika z wcześniejszej dyskusji”.
- s. 50: Dowód 4.1 powinien być poprzedzony sformułowaniem udowodnianej tezy np. w postaci twierdzenia albo własności.
- s. 92: Numeracja dowodów jest niepotrzebna i myląca. Wystarczy “proof” lub “Proof of Proposition 6.4” (gdyby nie występował bezpośrednio po propozycji).

Jak wcześniej wspomniałam, praca jest napisana bardzo starannie. Tym nie mniej zauważyłam kilka drobnych niedociągnięć.

- s. 39/40: Druga część zdania “The general aim behind these algorithms ...”, rozpoczynając od ‘unless’, jest niejasna.
- s. 59: W pierwszym zdaniu sformułowanie “in which few maps is larger” jest niepoprawne i niejasne.
- s. 62: Zdanie rozpoczynające się od “Considering ...” jest za długie i zamiast “such that” powinno być “so that” albo “that is”.
- s. 68: Druga część (od “then”) zdania “This is straightforward ...” nie jest poprawnie sformułowana.
- s. 78: W dyskusji występują odwołania do Rys. 6.2, podczas gdy chodzi o Rys.6.1.
- s. 86: 6-ta linijka od dołu - powinno być $t_{free,i}$, a nie $t_{free,i}$.
- s. 88: W Definicji 6.2 występuje sformułowanie “The graph”. Powinno być określone, o jaki graf chodzi, nawet jeżeli można się tego domyśleć.
- s. 91: W Definicji 6.3 występuje pojęcie “Event-action synchronization”, natomiast w dalszej dyskusji jest używane pojęcie “Action-event” synchronization.

4. Konkluzja

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Przybylskiego stanowi kompletne rozwiązanie problemu planowania ruchu robotów mobilnych w środowisku dynamicznym. Doktorant zaproponował trafny schemat metodologiczny i w jego ramach rozwiązał szereg nowych i istotnych problemów naukowych. Przedstawiona praca jest napisana bardzo profesjonalnie i pokazuje szeroką wiedzę i bardzo dobry warsztat badawczy jej Autora. Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia z nadmiarem wymogi odpowiedniej ustawy o stopniach doktorskich w dyscyplinie automatyka i robotyka. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Macieja Przybylskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a także wyróżnienie pracy.

Elżbieta Łoszkowska