

Madryt, 5 września 2017 r.

Dr David Camacho Fernández
Wydział Informatyki
Uniwersytet Autonomiczny w Madrycie, UAM

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Krystiana Jobczyka

Planowanie temporalne z ograniczeniami typu rozmytego i preferencjami

1. Wprowadzenie

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Krystiana Jobczyka, zatytułowana „*Planowanie temporalne z ograniczeniami typu rozmytego i preferencjami*”. Rozprawa ma na celu rozwinięcie dwóch wzajemnie alternatywnych podejść do reprezentacji planowania czasowego (temporalnego) z ograniczeniami rozmytymi (typu rozmytego) o charakterze czasowym oraz preferencjami. Dyscypliną naukową rozprawy jest informatyka, a ściślej sztuczna inteligencja.

Planowanie stanowi jedną z kluczowych form racjonalnego zachowania, w szczególności wnioskowania. Planowanie i wykonywanie planów to środki do osiągnięcia celów; zachowanie zorientowane na cele stanowi podstawę dla racjonalnego i inteligentnego podmiotu sprawczego.

Intuicyjnie często odwołujemy się do planowania jako do rozmyślnego procesu polegającego na wyborze i organizacji działań w celu osiągnięcia pożądaných lub wymaganych celów. Działania wykonywane są w danej domenie planowania. Wykonywanie działań modyfikuje pierwotne domeny, tj. stan świata. Na przykład działanie „*ruch*” może zmienić położenie robota/satelity.

Naturalnym rozszerzeniem planowania (klasycznego) jest planowanie czasowe. Mówiąc nieformalnie, planowanie czasowe można postrzegać jako planowanie klasyczne, w którym uwzględniane są aspekty czasowe. Specyfikację czasu można rozumieć na wiele sposobów, np. jako czas trwania działania (przedział czasu) lub jako ograniczenia czasowe nałożone na realizację działania. *Planowanie czasowe* ma na celu rozwiązywanie różnych problemów. Najbardziej typowe są następujące:

- optymalizacja czasowa wykonywania działań (planowanie optymalne czasowo),
- typy ograniczeń czasowych, które mogą być nakładane na wykonywanie działań,
- reprezentacja ograniczeń czasowych,
- konstruowanie planów spełniających wymagane ograniczenia czasowe.

Generalnie ograniczenia czasowe dzielą się na dwie klasy: *jakościowe* oraz *ilościowe*.

W celu urealnienia badań planowanie czasowe często rozważane jest wraz z nowym elementem nazywanym „*preferencjami*”. Wprowadzają one pewien stopień racjonalności w planowaniu czasowym. Preferencje mogą dotyczyć wykonywania działań, realizacji zadań lub wyboru różnych elementów takich jak sytuacje, rozwiązania itd. Dla intuicji plan spełniający wszystkie ograniczenia

czasowe jest *dopuszczalny* i może istnieć wiele takich planów. W tym punkcie można zastosować preferencje w celu wyboru jednego planu do wykonania.

Niestety planowanie czasowe niekiedy jest działaniem w stanie niepewności. Pojęcie „niepewności” może odnosić się do różnych sytuacji w planowaniu czasowym. Może ono oznaczać, że nasze preferencje zostały ustalone nieprecyzyjnie, lub że ograniczenia czasowe nałożone na wykonywanie działań nie są sztywne. Wszystkie te sytuacje są przedmiotem *planowania czasowego z ograniczeniami rozmytymi oraz preferencjami*.

2. Struktura i treść rozprawy

Rozprawa składa się z dwóch części. Pierwsza z nich jest związana z reprezentacją i modelowaniem planowania czasowego i rozmytych ograniczeń czasowych oraz preferencji w kategoriach modeli spłotowych, oraz z badaniem pewnych aspektów obliczeniowych i programistycznych tego podejścia spłotowego. Druga część rozprawy ma na celu reprezentację elementów planowania czasowego – preferencji, ograniczeń czasowych – w kategoriach wielowartościowej logiki Halperna-Shohama, modelowanie ich za pomocą nowo zaproponowanej przedziałowej semantyki włóknistej, oraz przedstawienie ogólnej metody konstruowania hybrydowego kontrolera planów z wykorzystaniem zaproponowanego podejścia.

Rozważania zawarte w rozprawie oscylują wokół problemów planowania czasowego z różnymi elementami. Rozprawa koncentruje się również na metodach ich modelowania. Omówienie skupia się na formalnym modelowaniu ograniczeń i preferencji oraz na analizie ich nietrywialnych właściwości.

Rozprawa dzieli się na dwie główne części: przegląd wybranego materiału dotyczącego obecnego stanu wiedzy oraz przedstawienie wkładu Autora. Szczegółowa treść rozdziałów rozprawy jest następująca:

- **Wprowadzenie 1.** Ten rozdział stanowi koncepcyjne i (częściowo) historyczne wprowadzenie do problemów planowania czasowego jako unikatowego rozszerzenia planowania klasycznego. Opisane jest planowanie klasyczne w różnych paradygmatach. W szczególności omówiono planowanie klasyczne jako przeszukiwanie grafu (na przykład w oparciu o system STRIPS) oraz jako spełnialność (poprzez procedurę Dajisa-Putnama). Na końcu przedstawiono planowanie czasowe jako rozszerzenie planowania klasycznego o aspekty czasowe działania.
- **Wprowadzenie 2.** Ten rozdział stanowi wprowadzenie do ograniczeń czasowych i rozmytych ograniczeń czasowych oraz ich taksonomii. Opisuje on również preferencje jako oddzielny element wnioskowania czasowego oraz planowania czasowego. Rozmyte ograniczenia czasowe dzielą się na dwie klasy: ograniczenia ilościowe oraz jakościowe. Ilościowe ograniczenia czasowe krótko omówiono w kategoriach problemu spełnienia ograniczeń oraz jego specyfikacji w tak zwanym *prostym problemie czasowym* (Simple Temporal Problem, STP). Jakościowe rozmyte ograniczenia czasowe – główny temat tego rozdziału – należycie omówiono w kategoriach rozmytych relacji Allena. Przedstawiono tu dwa różne podejścia do ich reprezentacji: integralne przedstawienie Ohlbacha oraz przedstawienie DeCocka-Schockaera w kategoriach rachunku relacyjnego oraz norm t .
- **Wkład. Rozdział 1.** Ten rozdział ma charakter pośredni między „Wprowadzeniem 1” i

„Wprowadzeniem 2” a dalszymi częściami rozprawy doktorskiej. Wykryte i krótko omówione zostały różne trudności związane z wczesnymi podejściami do planowania czasowego oraz rozmytych ograniczeń czasowych. Jedną z trudności jest brak specyfikacji tematycznej planowania czasowego, które zwykle postrzegane jest w bardziej metodologiczny sposób. Stanowi to czynnik motywujący do zaproponowania zarysu niewielkiej taksonomii problemów tematycznych planowania czasowego. Wprowadzono klasy problemów: problemy klasy *czasowego problemu komiwojażera* (Temporal Traveling Salesman Problem, TTSP) oraz problemy należące do *problemu wieloagentowego planowania harmonogramu* (Multi-Agent Schedule-Planning Problem, MA-SP-P). Oba problemy paradygmatyczne (TTSP oraz MA-SP-P) są również szczegółowo zdefiniowane. Na koniec wysunięto w tym rozdziale pewne wskazówki dotyczące sposobu ich reprezentacji i modelowania.

- **Wkład. Rozdział 2.** Ten rozdział wprowadza nowe podejście matematyczne do rozmytych ograniczeń czasowych oraz preferencji. Najpierw rozmyte relacje Allena reprezentowane są przez normy odpowiednich splotów całkowalnych funkcji Lebesgue'a – w polemicznym odniesieniu do idei Ohlbacha. Dalej opracowano nowe holistyczne podejście do rozmytych ograniczeń czasowych na podstawie reprezentacji splotowej rozmytych relacji Allena. To nowe holistyczne podejście stanowi kombinację ilościowych i jakościowych rozmytych ograniczeń czasowych. Pierwsze z nich to ograniczenia MA-SP-P. Są one kodowane w odpowiednich przedziałach rozmytych. Ograniczenia jakościowe to po prostu rozmyte relacje Allena nałożone na te przedziały rozmyte.

Kolejne sekcje tego rozdziału przedstawiają czasowe i preferencyjne rozszerzenia systemu STRIPS oraz procedury Davisa-Putnama w przedstawieniu teoretycznym. Dodatkowo omówiono również pewne meta-logiczne właściwości rozszerzeń.

Jakościowe ograniczenia czasowe są reprezentowane przez relacje Allena i są one nakładane na ograniczenia ilościowe. Ta kombinacja pozwala nam wprowadzić nową definicję *rozmytych ograniczeń czasowych oraz preferencji* na podstawie ostatniej definicji.

- **Wkład. Rozdział 3.** Dociekania przedstawione w tym rozdziale są koncepcyjną kontynuacją rozdziału 2 i odnoszą się do obliczeniowych oraz programistycznych aspektów rozmytych ograniczeń czasowych i ich reprezentacji. Najpierw splotowe przedstawienie rozmytych relacji Allena zostaje zastosowane do systemu STRIPS i procedury Davisa-Putnama w odpowiednim rozszerzeniu czasowym i preferencyjnym. Dalej przedstawione są solwery w języku PROLOG dla wybranych przypadków wieloagentowego problemu planowania harmonogramu. Analizy tego rozdziału przeprowadzone są w kontekście tematycznym wieloagentowego problemu planowania harmonogramu.
- **Wkład. Rozdział 4.** Ten rozdział zajmuje się alternatywnym algebraiczno-logicznym podejściem do reprezentacji ograniczeń czasowych oraz preferencji. Elementy te ujęte są w kategoriach nowej wielowartościowej (preferencyjnej) logiki Halperna-Shohama. „Rozmytość” jest tu wprowadzana przez preferencje. Ten formalny system jest dalej interpretowany w przedziałowej semantyce włóknistej. Pozwala nam to rozważać kombinowane formuły reprezentujące zarówno preferencje, jak i działania – ograniczone czasowo. Dociekania przedstawione w tym rozdziale oscylują wokół problemu komiwojażera oraz jego modelowania.

- **Wkład. Rozdział 5.** Ten rozdział opisuje ogólną metodę konstruowania hybrydowego kontrolera planów oraz rozszerza czysto teoretyczne dociekania rozdziału 4 w kierunku obszaru zastosowań. Konstruowanie kontrolera przebiega następująco:
 1. Najpierw środowisko ruchu robota zostaje określone w liniowej logice czasowej (Linear Temporal Logic, LTL) rozszerzonej o logikę Halperna-Shohama (HS).
 2. Ten opis LTL+HS jest kodowany przez odpowiedni automat Büchiego i reprezentuje on wymaganą planowaną sytuację.
 3. Następnie konstruowany jest drugi automat Büchiego dla rzeczywistej sytuacji wykonywania zadania przez robota.

Te dwa automaty stanowią podstawę konstrukcyjną dla ich automatów wynikowych. Ich reprezentacja w kategoriach języka PROLOG odgrywa rolę pożądanego kontrolera planów.

- **Wkład. Rozdział 6.** Ten rozdział opisuje próbę syntezy wcześniejszych podejść do rozmytych ograniczeń czasowych oraz preferencji. Omówiono tutaj, jak reprezentacje analityczne oraz logiczne mogą się uzupełniać przy konstruowaniu kontrolera planów.

Na przykład trajektorie ruchu agenta w opisie logicznym mogą być interpretowane jako odpowiednie funkcje w przestrzeniach Sobolewa.

- **Wkład. Rozdział 7.** Ten rozdział zawiera uwagi końcowe i przedstawia pewne obiecujące kierunki przyszłych badań.
- **Dodatki.** Rozprawa zawiera również 8 Dodatków. Dodatki 1–7 zawierają bardziej zaawansowane wyniki z zakresu tematycznego rozprawy, takie jak właściwości meta-logiczne systemów logiki rozmytej dla relacji Allena. Dodatek 8 zawiera kilka definicji matematycznych wykorzystywanych we właściwej treści rozprawy.

3. Główny wkład rozprawy

Innowacyjność rozprawy doktorskiej można przedstawić jako połączenie następujących głównych rezultatów:

1. Zdefiniowano dwa paradygmatyczne problemy planowania czasowego (czasowy problem komiwojażera (TTSP) oraz wieloagentowy problem planowania harmonogramu (MA-SP-P)) i zaproponowano je jako podstawę tematyczną planowania czasowego z ograniczeniami rozmytymi.
2. Rozmyte relacje Allena przedstawiono poprzez normy z odpowiednich splotów w odpowiedniej przestrzeni całkowalnych funkcji Lebesgue'a.
3. Opracowano część teorii dla rozmytych relacji Allena w kategoriach analizy rzeczywistej i algebry abstrakcyjnej.
4. Opracowano hybrydowe podejście do rozmytych ograniczeń czasowych na podstawie rozmytych relacji Allena w kategoriach splotów. (W kontekście MA-SP-P.)

5. Dwie metody planowania (system STRIPS oraz procedurę Davisa-Putnama) rozszerzono o elementy czasowe i preferencyjne.
6. Opracowano hybrydowe podejście do rozmytych ograniczeń czasowych z rozmyciem wprowadzanym przez preferencje, w kategoriach preferencyjnej logiki Halperna-Shohama oraz jej modeli włóknistych. (W kontekście TTSP.)
7. Zaproponowano zarys konstrukcji kontrolera planów na podstawie podejścia logicznego do rozmytych ograniczeń czasowych.
8. Przedstawiono próbę syntezy tych dwóch podejść w kontekście konstrukcji kontrolera planów. Ta konstrukcja jest wykonywana w „kategoriach logicznych”, ale jest uzupełniana przez elementy analityczne (trajektorie ruchu agenta są reprezentowane przez odpowiednie funkcje w przestrzeniach Sobolewa).

Z metodologicznego punktu widzenia ta rozprawa doktorska wykazała wyjątkową różnorodność. Było to naturalną konsekwencją wielowymiarowości rozważań rozprawy. Zakres stosowanych metod obejmuje na przykład metody obliczeniowe teorii miary oraz analizy rzeczywistej (szczególnie w odniesieniu do obliczeń splotowych), formalizację w kategoriach logiki LTL i HS, metody konstrukcji automatów Büchiego z formuł LTL – dzięki ideom M. Vardięgo. Te metody są również wspierane przez pewne metody programowania logicznego – w paradygmacie deklaratywnym – takim jak język PROLOG.

Ponadto przedstawiono pewne bardziej skomplikowane metody, takie jak *metoda dowodu kompletności w stylu Pavelki-Hajka* lub *sprawdzanie spełnialności poprzez redukcję do problemu spełnialności kwantyfikowanej formuły boolowskiej*.

4. Ocena rozprawy

4.1 Uwagi ogólne

Rozprawa dotyczy istotnego problemu o poważnym charakterze w dziedzinie współczesnej informatyki. Temat rozprawy wybrano w prawidłowy sposób. Treść pracy ma wysoką wartość i dowodzi głębokiej wiedzy autora w jego dyscyplinie.

Pierwsze podejście przedstawione w rozprawie Krystiana Jobczyka wykorzystuje różne metody i narzędzia analizy matematycznej do reprezentacji tak zwanych rozmytych relacji Allena (jako wyjątkowego typu ograniczeń czasowych opartych na reprezentacji czasu przedziału) w nowy sposób. Rozważania te prowadzone są w kontekście wieloagentowego problemu planowania i harmonogramowania jako podstawy tematycznej tej analizy. Rozważana jest również reprezentacja formalna oraz obliczeniowe i programistyczne aspekty problemu wieloagentowego.

Druga propozycja wysunięta przez Autora prezentuje klasę podejść logicznych do reprezentacji planowania czasowego z ograniczeniami rozmytymi i preferencjami. Wprowadzono nowe rezultaty w kategoriach logiki Halperna-Shohama oraz liniowej logiki czasowej. Te rezultaty umożliwiają modelowanie rozszerzonego czasowo problemu komiwojażera. W końcu przedstawiono konstrukcję kontrolera do planowania czasowego z wykorzystaniem tych systemów logicznych.

Należy odnotować, iż główny temat rozprawy oraz wybór metod badawczych wpisują się w

obecne trendy badawcze w dziedzinie informatyki, a szczególnie sztucznej inteligencji. Ponadto zarówno aspekty teoretyczne, jak i praktyczne nadal stanowią obiecujący i aktualny obszar eksploracji naukowej. Metodologia rozprawy jest niejednorodna, ale nie stanowi to niedociągnięcia, tylko jest naturalną konsekwencją (istnienia) wielu różnych metod i problemów w tym obszarze badawczym. Przedstawiona dokładna analiza, dobrze ugruntowana matematycznie, jest unikatowa i oryginalna oraz dowodzi wiedzy i umiejętności Autora.

Przedstawione rozważania są zilustrowane fragmentami kodu (w języku Prolog) oraz opisami i dowodami matematycznymi, a kilka szczegółów technicznych przedstawiono w oddzielnych dodatkach.

4.2 Sposób przedstawienia, język i styl

Sposób przedstawienia materiału jest bardzo staranny, dobrze zaplanowany i szczegółowy. Rozważania teoretyczne są zilustrowane opisem formalnym algorytmów oraz opisami matematycznymi proponowanych modeli.

Język techniczny rozprawy jest prawidłowy i potwierdza biegłość techniczną Autora. Z drugiej strony rozprawa jest niekiedy trudna do czytania, ponieważ specyficzna dyscyplina wymaga pogłębionej wiedzy zarówno w dziedzinie matematyki, jak i sztucznej inteligencji, a zrozumienie dowodów i opisów matematycznych przez osoby, które nie są ekspertami w tym obszarze, stwarza pewne trudności. Wszystkie te opisy i dowody matematyczne są jednak technicznie poprawne i tworzą w rozprawie formalizm, który stanowi dodatkową wartość na tle ogólnych rezultatów przedstawionych w tej pracy.

4.3 Drobne problemy i sugestie

W manuskrypcie rozprawy odkryto niewielką liczbę drobnych problemów i błędów drukarskich. Chociaż wszystkie te problemy są drobne i nie wpływają na jakość pracy, poniżej przedstawiam ich krótki opis:

- Rozprawa posiada trzy różne wprowadzenia – Rozdział 0, który przedstawia krótki opis motywacji, sformułowanie problemu, cele rozprawy itd., oraz dwa inne wprowadzenia do planowania czasowego i ograniczeń czasowych, co jest nieco dezorientujące (wygląda to jak część dwóch różnych rozpraw). Interesujące byłoby połączenie ich wszystkich w jeden ogólny rozdział – „Wprowadzenie”.
- Wprowadzenia rozprawy są zbyt skupione na klasycznych modelach planowania, takich jak system STRIPS, i przedstawiają opis języków PDDL oraz PDDL+, jednak istnieją inne, bardziej współczesne podejścia związane z probabilistycznym, czasowym lub nawet wieloagentowym podejściem do planowania.
- Inne problemy, bardziej realistyczne i naprawdę bliskie problemowi rozważanemu w tej rozprawie, takie jak problem wyznaczania trasy pojazdu, nie zostały dokładnie przeanalizowane.
- Przykłady podawane w rozprawie (takie jak przykład ze światem bloków) są zbyt proste i nie pozwalają zrozumieć, jak podejścia autora mogłyby działać w rzeczywistych obszarach.
- Różne algorytmy i metody zostały starannie opisane z perspektywy matematycznej i formalnej.

Brakuje jednak analizy efektywności i skalowalności tych podejść w dużych lub złożonych scenariuszach.

- Rozprawa zawiera spis ilustracji, sugeruję dodanie spisu tabel oraz sekcji ze skrótami (rozprawa jest pełna skrótów i niekiedy czytelnikowi może być trudno pamiętać je wszystkie).
- Tabele nie mają nagłówków i nie są przywoływane w tekście.
- Sugeruję dodanie spisu równań; myślę, że w rozprawie tego typu jest on szczególnie istotny.
- Niektóre ilustracje powinny mieć zmienioną wielkość, część z nich jest wyjątkowo mała i trudna do odczytania (np. ilustracje 17, 23, 1.1, 2.4, 4.1, 5.3, 5.6, 5.7).
- Ilustracje nie mają jednolitej numeracji (ilustracje 5.3, 1.1, 2.1, 2.2 itd. w Rozdziałach 1 do 7 oraz ilustracje 1, 2, 3, ... w Rozdziale 0). Sugeruję stosowanie wspólnej numeracji.
- Ilustracja 13 ma słabą jakość; powinna ona być dołączona jako tabela.
- Chociaż rozprawa jest dobrze napisana i standard typograficzny jest naprawdę dobry, sugeruję uważne przeczytanie i poprawienie końcowego manuskryptu, ponieważ występują w nim pewne drobne błędy drukarskie, takie jak „advantages, colollary, consists, contexts, corresponds, forms, fortunately, greather invese, modelling, nowadays, unfortunately” itd.; „A blue line represents”; „**this** these relations”; „the sequence starts”; „All these facts are”; „obtained by a combinations”; „This fact approximates”; „The proper analysis is proceeding”; „it rather requires a logical”. Dysponuję tylko poprzednią wersją rozprawy w formacie pdf, więc być może część powyższych błędów drukarskich jest obecnie poprawiona. Sugeruję jednak przejrzanie tekstu w końcowej wersji rozprawy.

Sugestie opisane w tej podsekcji nie są obowiązkowe. O ile to możliwe, interesujące (choć niekonieczne) byłoby jednak zmodyfikowanie lub dołączenie niektórych z tych sugestii w końcowej wersji rozprawy. Pomimo tych drobnych uwag do rozprawy całościowa ocena tej pracy jest pozytywna, a powyższych komentarzy nie należy traktować jako problemów odbijających się na całym badaniu oraz rezultatach uzyskanych przez kandydata w trakcie tworzenia jego rozprawy.

5. Wnioski

Podsumowując, ta rozprawa przedstawia liczne elementy oryginalnego wkładu o wysokiej jakości. Główny cel tej rozprawy można podsumować jako opracowanie nowego hybrydowego sposobu reprezentacji i modelowania rozmytych ograniczeń czasowych i preferencji w kontekstach rozszerzeń czasowych problemu komiwojażera oraz problemu wieloagentowego. Przedstawiony materiał dotyczy ważnych problemów badawczych współczesnej informatyki stosowanej w dziedzinie *planowania czasowego* oraz *rozmytych ograniczeń czasowych i preferencji* w kategoriach modeli spłotowych, a także badania pewnych aspektów obliczeniowych i programistycznych tego podejścia spłotowego. Te właściwości planowania czasowego zostały zamodelowane w kategoriach wielowartościowej logiki Halperna-Shohama (na podstawie nowo zaproponowanej przedziałowej semantyki włóknistej), a ta ogólna metoda została zastosowana do zaprojektowania konstrukcji hybrydowego kontrolera planów z wykorzystaniem zaproponowanego podejścia. Przedstawione rezultaty zawierają oryginalne rozwiązania potencjalnych zastosowań praktycznych.

W podsumowaniu rozprawa definiuje istotny problem badawczy i proponuje oryginalne rozwiązanie, zarówno na poziomie koncepcyjnym (model, projekt i dowody matematyczne), jak i na poziomie implementacji. Przedstawia ona głęboki i formalny opis różnych hipotez badawczych oraz uzyskuje rezultaty istotne dla obecnego stanu wiedzy. Autor wykazał doskonałą ogólną wiedzę teoretyczną w dziedzinie sztucznej inteligencji oraz dowiódł swojej zdolności do prowadzenia niezależnych badań naukowych. Rozprawa została napisana starannie i spełnia wszystkie typowe standardy edytorskie.

Zgodnie z moją wiedzą przedstawiona rozprawa reprezentuje bardzo wysokie standardy teoretyczne oraz spełnia formalne i zwyczajowe wymagania dla rozprawy doktorskiej. W mojej opinii rozprawa ta jest wystarczająco dojrzała, by uznać ją za ukończoną i złożyć ją w ramach przewodu doktorskiego.

/nieczytelna pieczęć/

/nieczytelny podpis/

Dr David Camacho
Wydział Informatyki
Uniwersytet Autonomiczny w Madrycie
C/Francisco Tomas y Valiente, n°11
28049, Madryt (Hiszpania)
Tel. (+34) 914972288
E-mail: David.Camacho@uam.es