

Recenzja rozprawy doktorskiej

„Model Checking for Reaction and Multi-Agent Systems”

10 GRUDNIA 2019

Autor rozprawy: mgr Artur Męski (Instytut Podstaw Informatyki PAN)
Autor recenzji: prof. dr hab. Andrzej Szałas (Wydział Matematyki, Informatyki
i Mechaniki Uniwersytetu Warszawskiego)

1 TEMATYKA I ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY

1.1 TEMATYKA ROZPRAWY

Rozprawa dotyczy przede wszystkim opracowania i eksperymentalnej weryfikacji algorytmów weryfikacji modelowej dla wariantów logik temporalnych skonstruowanych dla systemów reakcji. Systemy reakcji, wprowadzone przez Ehrenfeuchta i Rozenberga (2007), modelują zachowanie systemów w oparciu o ciągi reakcji. Każda reakcja nad zbiorem S jest reprezentowana przez trzy niepuste podzbiory S : R – substratów (*reactants*), I – inhibitorów i P – produktów. Zakłada się, że zbiory substratów i inhibitorów są rozłączne. Reakcje są rozumiane jako reguły:

jeśli bieżący stan $T \subseteq S$ zawiera wszystkie substraty reakcji ($R \subseteq T$)
i nie zawiera żadnego z jej inhibitorów ($I \cap T = \emptyset$),
to reakcja zachodzi i w jej wyniku powstają produkty P
(i zanikają substraty nie będące produktami).

W przypadku wielu reakcji wynikowy stan powstaje przez teoriomnogościowe zsumowanie produktów wszystkich reakcji. W procesie wynikającym z zachodzenia ciągów reakcji pod uwagę bierze się też konteksty reakcji. Ich celem jest modelowanie środowiska, w którym zachodzą reakcje.

Aby wnioskować o ciągach/drzewach reprezentujących możliwe przebiegi reakcji, w rozprawie zostały wprowadzone:

- rozszerzenia systemów reakcji wspomagające modelowanie rozważanych klas zjawisk;
- logiki temporalne specjalizowane dla badanych wariantów systemów reakcji;
- algorytmy weryfikacji modelowej adekwatne dla opracowanych logik temporalnych.

Ponieważ problemy weryfikacji modelowej okazują się PSPACE-zupełne, rozprawa zawiera szereg badań eksperymentalnych wskazujących na możliwości i ograniczenia opracowanych metod algorytmicznych.

Przeprowadzone badania polegają głównie na rozszerzeniach/adaptacji formalizmów znanych z literatury, w tym logicznych, stosowanych analizy własności ciągów reakcji. Ponieważ jednak te badania – po stronie modelowania – wymagały opracowania nowych wariantów systemów reakcji oraz – po stronie weryfikacji – pokonania wielu trudności technicznych zarówno w warstwie logicznej, jak i algorytmicznej, uważam że wybrana tematyka stworzyła możliwość przeprowadzenia niebanalnych badań w ramach prac nad rozprawą doktorską.

1.2 POSTAWIONY PROBLEM

Autor postawił następującą hipotezę badawczą (podrozdział 1.1):

„Formal verification methods based on model checking will allow for verification of reaction systems.”

Ze względu na złożoność obliczeniową problemów weryfikacji modelowej dla badanych w rozprawie formalizmów (PSPACE), hipoteza jest weryfikowana poprzez badania eksperymentalne. Aby jednak mogły one być przeprowadzone – musiały zostać poprzedzone badaniami teoretycznymi, obejmującymi analizę złożoności, konstrukcję formalizmów logicznych oraz opracowanie algorytmów weryfikacji.

1.3 ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY

Poza wprowadzeniem do rozprawy, analizą źródeł i przedstawieniem podstawowych definicji, poszczególne rozdziały (3–6) są poświęcone:

3. systemom reakcji i logice rsCTL będącej wariantem CTL, w którym modele odzwierciedlają systemy reakcji wzbogacone o konteksty;
4. systemom reakcji dla systemów rozproszonych i logice rsCTLK, będącej wariantem epistemicznej CTL, w której rozważa się weryfikację działań synchronicznych i asynchronicznych, zakładając że konteksty mogą być generowane przez specjalnie dobraną klasę automatów;
5. systemom reakcji z wielokrotnością reaktantów i logice rsLTL, będącej wariantem LTL;
6. parametrycznym systemom reakcji, dla których używa się logiki rsLTL.

Ponadto rozdział 7 zawiera opis bibliotek implementujących badane metody weryfikacji modelowej.

Na uwagę zasługuje fakt, że wprowadzane w rozprawie pojęcia są bogato zilustrowane przykładami. Z jednej strony daje to obraz możliwości zastosowań użytych formalizmów, a z drugiej – bardzo ułatwia ich czytanie i rozumienie.

2 OCENA ROZPRAWY

2.1 SILNE STRONY ROZPRAWY

2.1.1 ORYGINALNY WKŁAD AUTORA PRACY

Podstawą rozdziałów 3–6 są współautorskie publikacje, w których Autor rozprawy odgrywał wiodącą rolę (por. uwagę na początku podrozdziału 1.3.1), obejmujące:

- artykuł w *Fundamenta Informaticae* (rozszerzony artykuł konferencyjny) – rozdział 5;
- artykuł przedstawiony na konferencji *Unconventional Computation and Natural Computation* – rozdział 6;
- dwa raporty techniczne – rozdziały 3, 4.

Rozdział 7 prezentuje autorskie implementacje opracowanych algorytmów.

2.1.2 NAJCIEKAWSZE WYNIKI

Do najciekawszych wyników przedstawionych w rozprawie zaliczam:

1. PSPACE-zupełność weryfikacji modelowej dla rsCTL (Tw. 3.4.3), rsCTLK (Tw. 4.4.4), rsLTL (Tw. 5.2.13);
2. kodowanie problemów jako formuł Boolowskich (podrozdziały 3.6, 4.6, 5.3), które stało się jedną z ważnych podstaw konstrukcji algorytmów weryfikacji.

W szczególności bardzo podobają mi się dowody Lematów 3.4.2 i 4.4.3, w których przynależność do klasy PSPACE pokazuje się poprzez konstrukcję algorytmów niedeterministycznych, a następnie korzysta z klasycznego twierdzenia Savitcha. Wprawdzie oryginalny dowód twierdzenia Savitcha jest „rozrzutny” z czysto algorytmicznego punktu widzenia, samo twierdzenie pozwala na przeprowadzenie eleganckich rozumowań. Dużo bardziej wydajne metody algorytmiczne są zresztą prezentowane dalej, poprzez BDD i algorytmy spełnialności dla formuł Boolowskich.

Bardzo jest też interesujące podejście do parametrycznego modelowania i weryfikacji systemów reakcji, omówione w rozdziale 6 rozprawy. Rozważany jest tu m.in. problem syntezy parametrów na podstawie obserwacji, niewątpliwie ważny w zastosowaniach.

2.1.3 PODSUMOWANIE

Zaprezentowane w rozprawie badania są bardzo interesujące i obejmują zarówno aspekty teoretyczne, jak i eksperymentalne, wykazując bardzo dobre opanowanie warsztatu naukowego przez Autora. Co ważne – nie ogranicza się on do badania zastanych formalizmów, ale także rozwija je w nowych, dobrze umotywowanych kierunkach.

2.2 UWAGI KRYTYCZNE

2.2.1 UWAGI MERYTORYCZNE

W trakcie lektury rozprawy nasunęło mi się kilka uwag wartych – moim zdaniem – dyskusji/szerszego uzasadnienia.

1. Pierwsza moja uwaga dotyczy konstrukcji badań eksperymentalnych. Choć bez wątplenia są one bardzo wartościowe, jako pokazujące zachowanie opracowanych algorytmów, jednak nie odnoszą się do wyników obcych. Nawet jeśli nie ma rozwiązań zewnętrznych bezpośrednio dotyczących weryfikacji modelowej dla modeli rozważanych w rozprawie, można znaleźć wiele takich, dla których wyniki eksperymentalne są znane, a narzędzia przeprowadzenia eksperymentów są dostępne. Widziałbym więc niemałe pole do porównań, polegające na:
 - (a) wyborze problemów, dla których przeprowadzono badania eksperymentalne używając konkurencyjnych formalizmów;
 - (b) formalizacji tych problemów w wybranych wariantach systemów reakcji;
 - (c) porównaniu wyników.

Dałoby to obraz nie tylko wydajności obliczeniowej opracowanych algorytmów, ale również zasadności użycia metod opartych o systemy reakcyjne jako narzędzia weryfikacji dla rozważanej klasy zagadnień.

2. Użycie w pracy terminu „Multi-agent Systems” (MAS), w szczególności w rozdziale 4, jest dyskusyjne:
 - (a) w rzeczywistości badania dotyczą dość klasycznych systemów rozproszonych, na dodatek z dzieloną pamięcią (Definicja 4.2.2), co samo w sobie praktycznie powinno wykluczać użycie terminu MAS, bowiem systemy wieloagentowe zakładają prawdziwe rozproszenie przetwarzania i wspólne rozwiązywanie problemów będących poza zasięgiem pojedynczych (inteligentnych) agentów;
 - (b) w pracy zostały pominięte takie zjawiska, jak rzeczywiście stosowana w MAS komunikacja (np. ACL, KQML), współpraca, modele działania agentów (choćby BDI) i wiele innych;
 - (c) systemy reakcji są niskopoziomowe w stosunku do wymagań formalizacji współczesnych systemów MAS, dla których oczekuje się specyfikacji i modelowania wysokopoziomowego;
 - (d) wprawdzie badane są wątki epistemiczne, ale naturalne jest pytanie czy inne własności charakterystyczne dla MAS, a nie występujące w klasycznych systemach rozproszonych są możliwe do wyrażania i badania w rozważanych formalizmach?
3. O ile podejście do parametrycznych systemów reakcji jest bardzo interesujące, niestety jego eksperymentalna ocena pozostawia niedosyt – pojawiają się pytania:
 - na ile uzyskiwane wyniki są adekwatne w przypadku reakcji biochemicznych, będących podstawową inspiracją dla systemów reakcji?
 - na ile wydobywanie reakcji na podstawie danych jest możliwe do przeprowadzenia na (zwykle bardzo dużych) zbiorach danych uzyskiwanych w czasie przeprowadzania rzeczywistych reakcji?

2.2.2 UWAGI REDAKCYJNE

1. Hipoteza badawcza (podrozdział 1.1.) jest – w moim odczuciu – nieco zbyt ogólna i mogłaby być uszczegółowiona.
2. Przykład 2.2.1, jako pierwszy, jest niezbyt szczęśliwie wybrany – wprawdzie systemy reakcji mogą być użyte do modelowania różnorodnych zjawisk, ale jednak główną motywacją było modelowanie reakcji.
3. Definicja 3.3.2: definiowane pojęcia powinny mieć nazwy niosące ich znaczenie; tymczasem $c(\phi)$ jest określone przez niezbyt szczęśliwe sformułowanie „the size of the largest set Ψ of the subformulae...”, nie w pełni oddające sens definicji.
4. Część definicji wygląda bardzo podobnie (np. 3.3.8, 3.5.5, 4.3.7, 4.5.3, czy nawet 5.2.3). Dla pokazania właściwej perspektywy warto było się pokusić o wspólne generyczne definicje i instancjonować je dla poszczególnych logik.
5. Przypis 1 str. 41: problem spełnialności QBF jest dość zasadniczy w rozprawie i raczej nie powinien być definiowany w przypisie.
6. Appendix (str. 97–99) zawiera tabele z wynikami eksperymentów bez żadnej dyskusji. Nie przemawia do mnie uzasadnienie dla dodatków („might affect the readability of the graphs”). Wolałbym, aby tabele były przedstawione (i przedyskutowane) w głównym tekście rozprawy.
7. Nie zauważyłem opisu konfiguracji sprzętu i oprogramowania, z użyciem których były wykonywane eksperymenty. W tej sytuacji same czasy wykonania dają bardziej jakościową niż ilościową informację o wydajności algorytmów.

3 PODSUMOWANIE I WNIOSEK

Rozprawę doktorską p. A. Męskiego uważam za ciekawą i wartościową. Pokazuje ona bardzo dobre opanowanie warsztatu naukowego Autora zarówno od strony umiejętności modelowania, posługiwania się niebanalnymi technikami teoretycznymi (złożoność, metody logiczne), jak i w zakresie konstrukcji algorytmów i ich eksperymentalnej weryfikacji. Dlatego, mimo przedstawionych uwag krytycznych, stwierdzam że rozprawa spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi i pokazuje oryginalne rozwiązania postawionych problemów naukowych. Dlatego wnoszę o dopuszczenie Autora do dalszych faz przewodu doktorskiego.



A. SZAŁAS