prof. dr hab. Mikołaj Bojańczyk
Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki
Uniwersytetu Warszawskiego

Warszawa, 26 marca 2021

Recenzja w postępowaniu habilitacyjnym
Weryfikacja przystępna dla użytkownika
dr. Jakuba Michaliszyna

W złożonym wniosku, osiągnięcie naukowe dotyczy analizy logik mogących mieć zastosowanie przy automatycznej weryfikacji poprawności programów. Osiągnięcie naukowe podzieliłem na dwie części: pierwsza z nich odpowiada okresowi londyńskiemu Habilitanta, a druga wynikom powstałym po jego powrocie do Wrocławia.

Model checking i systemy wieloagentowe

Pierwsza część osiągnięcia dotyczy prac o *model checking*, szczególnie dla systemach wieloagentowych:

[A1] Model Checking Unbounded Artifact-Centric Systems (KR 2014)

[A2] An Epistemic Halpern–Shoham Logic (IJCAI 2013)

[A3] Decidability of model checking multi-agent systems against a class of EHS specifications (ECAI 2014)

[A4] Model Checking Multi-Agent Systems against Epistemic HS Specifications with Regular Expressions (KR 2016)

Prace te powstały we współpracy z profesorem Lomuscio, podczas trzyletniego postdoca habilitanta na w londyńskim Imperial College. Z oświadczeń habilitanta i prof. Lomuscio wynika, że wkład habilitanta we te prace był zasadniczy[1].

W pracy [A1] analizowany jest problem sprawdzania, czy baza danych ewoluująca w czasie ma daną własność. Ponieważ model ewolucji założony w pracy pozwala na nietrudne symulowanie liczników, problem okazuje się nierozstrzygalnym w ogólności, oraz w prawie wszystkich szczególnych przypadkach. Wyjątkiem jest sytuacja, gdzie sygnatura pozwala na zasymulowanie co najwyżej jednego licznika (sygnatura ma tylko jedną relację jednoargumentową i nie ma żadnych relacji o wyższych arnościach); w tej sytuacji autorzy pracy mogą rozwiązać problem korzystając ze znanych wyników dotyczących rozstrzygalności problemu *model checking* dla automatów ze stosem.

Prace [A2], [A3] i [A4] proponują wykorzystanie logiki przedziałowej (w wydaniu Halpern–Shoham, znanym doskonale Habilitantowi z jego pracy doktorskiej) dla analizy systemów wieloagentowych. Autorzy proponują dodanie modalności epistemicznych (poznawczych?) do logiki, które pozwalają wyrazić, że dana własność jest pradziwa nie tylko w obecnym przedziale, ale i w każdym przedziale, który jest równoważny z obecnym z perspektywy wiedzy danego agenta. To rozszerzenie logiki pojawia się w pracy [A1], wraz z analizą złożności problemu *model checking* dla pewnych fragmentów logiki. Przykrą cechą logik Halpern-Shoham jest mnogość fragmentów (jak autorzy sami kilkakrotnie wspominają, jest tych fragmentów cztery tysiące), skutkiem czego w pracach są liczne twierdzenia, pokazujące ograniczenia dolne i górne dla złożoności obliczeniowej. Wyniki te pokazują, że habilitant opanował solidny warsztat algorytmów dla *model checking* i głeboko zrozumiał algorytmiczną analizę logiki przedziałowej. Ze strony czysto teoretycznej trudno by jednak uznać te prace za wybitne: górne ograniczenia korzystają przeważnie ze standardowych technik (indukacja po budowie formuły, sprawdzanie wszystkich przypadków w sposób alternujący, itp.), co można też powiedzieć o redukcjach w przypadku ograniczeń dolnych (kwantyfikowane formuły zdaniowe QBF). W niektórych ciekawszych przypadkach algorytmy muszą się zmierzyć z pewną nieskończonością modelu (który opisuje ścieżki dowolnej długości w grafie), rozwiązaniem tego problemu są odpowiednie lematy o pomopowaniu (Twierdzenie 12 w pracy [A3] i Twierdzenie 14 w pracy [A4]). Jest to, w moim odczuciu, technika elementarna i raczej żmudna (ominięcie tej metodologii znajdzie się w pracy [A7]). Z prac tych najoryginalnieszą wydaje mi się praca [A4] – wkładem tutaj jest wzbogacenie logiki przedziałowej o wyrażenia regularne[2] (np. można powiedzieć za pomocą wyrażenia $(ab)^*$, że w

[1] Według oświadczeń, wkład prof. Lomuscio przeważnie ograniczał się do napisania wstępu, zakończenia i dopisania swojego nazwiska. Osobiście nie jestem zwolennikiem tego rodzaju zwyczjów, ale ewentualny krytyczny pogląd na ten temat nie rzutuje negatywnie na działalność Habilitanta – wręcz przeciwnie, uwidacznia tylko jego samodzielność.

[2] Czytając o wyrażeniach regularnych, nasunęło mi się pewne skojarzenie, które w pewnej wersji występuje też w konkluzjach pracy [A7]. Znanym wariantem wyrażeń regularnych są wyrażenia bezgwiazdkowe, gdzie zabroniona jest gwiazdka Kleene'go, w zamian zaś dozwolona jest negacja. Wyrażenia bezgwiazdkowe mają bardzo przyzwoitą teorię, między innymi definiują te same języki co logika pierwszego rzędu. Wydaje się, że można w naturalny sposób uzupełnić logikę Halpern–Shoham o wyrażenia bezgwiazdkowe, poprzez dodanie operatora następującego operatora, będącego w duch *separation logic*: "przedział I można podzielić na

danym przedziale na przemian prawdziwe są a i b). Okazuje się, że wzbogacenie to podlega podobnej analizie jak logika niewzbogacona, w szczególności techniki pompujące z pracy [A3] stosują się też w obecności wyrażeń regularnych.

Ostatnią z prac w tej tematyce, powstałą już po powrocie z Londynu, jest

[A7] Decidability of Model Checking Multi-Agent Systems with Regular Expressions against Epistemic HS Specifications (IJCAI 2019)

W pracy tej autorzy dowodzą, że problem rozważany w pracy [A4] w szczególnych przypadkach, jest rozstrzygalny w ogólności. Pomysł z pracy [A7] polega na zanurzeniu logiki Halpern–Shoham w logice monadycznej na drzewie nieskończonym, a następnie skorzystaniu z twierdzenia Rabina. Pomysł jest naturalny – gdyż modele rozważane w pracy są drzewami regularnym (rozwinięcia drzewiaste skończonych grafów) – a większość operatorów rozważanej logiki daje się z łatwością zanurzyć w logice monadycznej. Pewne trudności występują z operatorem epistemicznym; rozwiązanie przyjęte w pracy polega na użyciu kwantyfikacji monadycznej by zastąpić obecną ścieżkę w modelu przez dowolną inną ścieżkę od niej nierozróżnialną (kluczowe jest tutaj to, że ustalony jest skończony model, którego drzewiaste rozwinięcie jest rozważane). Praca ta odróżnia się korzystnie od poprzednich prac z serii; zastosowane jest właściwe narzędzie, dzięki czemu unika się szczegółowej i żmudnej kombinatorycznej analizy przypadków oraz pompowania. Oczywiście skorzystanie z logiki monadycznej wiąże się z pewną ceną – algorytm ma złożoność nieelementarną. Czy cena ta jest konieczna, nie wiadomo. Autorzy nie pokazują dolnych ograniczeń, choć wskazują na pokrewieństwo z wyrażeniami regularnymi z negacją, dla których problem spełnialności nie jest elementarny. (Przy okazji, warto zauważyć, że nieelementarna trudność nie potrzebuje gwiazdki, co zdaje się sugerować Sekcja 6 z pracy [A7]. Nieelementarną złożoność dla wyrażeń bezgwiazdkowych pokazał Stockmeyer w Twierdzeniu 4.27 ze swojej pracy doktorskiej.)

Automaty ważone i uczenie

Druga część osiągnięcia dotyczy teorii automatów, ze szczególnym uwzględnieniem wariantów automatów ilościowyc:

[A5] Average Stack Cost of Büchi Pushdown Automata (FSTTCS 2017)

[A6] Non-deterministic Weighted Automata on Random Words (CONCUR 2018, oraz wersja czasopismowa [A9] w JCSS 2020)

[A8] Approximate Learning of Limit-Average Automata (CONCUR 2019)

[A10] Learning Deterministic Automata on Infinite Words (ECAI 2020)

konkatenację przedziałów I_1 oraz I_2, takich, że I_1 spełnia formułę φ_1, a I_2 spełnia formułę φ_2".

Przez automaty ilościowe[3] mam na myśli automaty, które produkuję liczbę zamiast wartości „tak” czy „nie”.

Praca [A5] dotyczy automatów z stosem, gdzie litery alfabetu stosowego mają nieujemne wagi. Wagą konfiguracji automatu jest suma wag liter występujących na stosie, a wagą biegu (nieskończonego) jest średnia waga (rozumiana w odpowiedni sposób dla nieskończonych ciągów) konfiguracji w nim występujących. Model ten różni się od wcześniej rozważanego wariantu WP w taki sposób, że WPS liczy dla konfgiuracji jedynie wagę ostatniej tranzycji, a nie całość stosu. Model z pracy [A5] uogólnia WPS, a uogólnienie jest o tyle istotne, że pozwala na nieograniczone wagi konfiguracji. Głównym wynikiem pracy [A5] jest wielomianowy algorytm dla obliczania osiąglanych wag biegów automatów. Algorytm korzysta z naturalnego pompowania biegów, typowego w analizie automatów ze stosem. Ważnym aspektem jest to, że problem dotyczy wag biegów, a nie wag słów, co w odpowiada analizie automatu deterministycznego (jest to analiza znacząco łatwiejsza niż dla automatu niedeterministycznego). Cenną dla mnie rzeczą – na co sam Habilitant zwraca uwagę w swoim autoreferacie – jest prostota modelu, który powstał na podstawie wcześniejszych propozycji Henzingera i Chatterjee (szczęśliwie, szczegółowy opis tych wcześniejszych propozycji został nam oszczędzony i zostało po nim jedynie pobieżne wspomnienie w autoreferacie). W porównaniu z poprzednimi pracami, w tej pracy i następnych, daje się zauważyć rosnącą dojrzałość w modelowaniu matematycznym i doborze technik.

Dla mnie najciekawsza – chyba w całym dorobku – jest praca [A6], która porusza problem zarówno trudny jak i naturalny. Problemem tym jest analiza rozkładu automatów ważonych na słowach generowanych przez łańcuch Markowa. Trudność polega na roli niedeterminizmu w tych automatach: nawet jeśli znamy dotychczas wygenerowaną przez łańcuch Markowa część słowa, to musimy śledzić nieograniczoną liczbę biegów na tej części, aby móc obliczyć ostateczny wynik. We wcześniejszych pracach rozważane były automaty deterministyczne, gdzie analizy można dokonać za pomocą naturalnej konstrukcji produktowej. Z uwagi na niedeterminizm, konstrukcja produktowa jest niewystarczająca, w związku z czym algorytm (mówię to przede wszystkim o najciekawszym wyniku dotyczącym automatów typu *limit average*) z pracy [A6] musi dokonać bardziej zaawansowanej analizy automatu, dotyczącej przede wszystkim jego silnie spójnych składowych. Głównym pomysłem jest tutaj okresowe naruszenie ciągłości biegu, które jest możliwe dzięki temu, że automat jest silnie spójny, a algorytm

[3] Przy okazji, chciałbym polecić częstsze odwołanie się do klasycznej terminologii i literatury dotyczącej automatów ważonych. Dziedzinę tę rozpoczął Schützenberger swoją pracą z 1961, gdzie wprowadził automaty ważone i pokazał piękny algorytm minimalizacji. Praca Schützenbergera jest ciężka w lekturze, ale są późniejsze opracowania, w tym książka Sakarovitcha, gdzie teoria jest bardzo szczegółowo opisana wraz ze stosownymi odniesieniami do odpowiednich działów algebry (w tym szeregów formalnych). Niestety, Habilitant przeważnie cytuje prace ze szkoły Henzingera i Chatterjee, którzy to autorzy mają niefortunną tendencję do wprowadzania modeli bez staranniejszego rozpoznania precendensów w literaturze i właściwego ugruntowania matematycznego. Pragnę przy tym zaznaczyć, że nie wszystkie modele rozważane w dorobku dadzą się sprowadzić do klasycznego modelu automatów ważonych, ale tam gdzie jest to możliwe, warto odpowienie odwołania umieścić.

ma za zadanie jedynie przbyliżenie wartości biegu.

Cykl automatowy zamykają prace [A8] i [A10], które dotyczą uczenia się automatów, a szczególnie wariantów algorytmu Angluin (L*).

Praca [A8] dotyczy automatów ilościowych, podobnie jak w pracy [A6], lecz tym razem automaty są deterministyczne a rozważanym problemem jest uczenie się. Praca zawiera dyskusję różnych sposobów uczenia się dla przyjętego modelu. W przypadku uczenia się wyłącznie na podstawie przykładów pozytywnych, głównym wynikiem jest NP-zupełność problemu, oparta na modifikacji konstrukcji znanych z literatury. Główne wyniki dotyczą uczenia w stylu Angluin: problem jest NP-zupełny przy pewnym rozumieniu aproksymacji, ale przy innym rozumieniu staje się wielomianowy (przy użyciu tej samej konstrukcji co w oryginalnym algorytmie Angluin).

Druga praca o uczeniu się, praca [A20], dotyczy przede wszystkim modelu deterministycznych ω-automatów z warunkiem Büchiego (jest to model słabszy od automatów niedeterministycznych z warunkiem Büchiego, które odpowiadają językom ω-regularnym). Problem uczenia musi ominąć przeszkodę, jaką jest brak automatów kanonicznych i NP-trudność szukania minimalnych automatów (niekanonicznych). Praca rozwiązuje tę przeszkodę poprzez dodanie nowego rodzaju zapytań dotyczącego długości pętli, skutkiem czego autorzy otrzymują algorytm wielomianowy. Choć mam pewne wątpliwości co do doboru przyjętego modelu[4], nie ulega wątpliwości, że przyjęte rozwiązanie jest pomysłowe, a jego implementacja wymaga znacznej biegłości technicznej.

Ocena działalności naukowej i pozostałego dorobku

Oprócz prac [A1–A10], Habilitant ma w swoim dorobku liczne inne prace na czołowych konferenjach informatycznych – oprócz konferencji takich jak LICS czy ICALP z czasów doktoratu, znajdziemy też konferencje typu A* jak IJCAI czy AAMAS. Cieszą też prace czasopismowe – oprócz pracy [A9] są też czasopismowe wersje wyników z czasów doktoratu, w czasopismach w bardzo dobrych czasopismach SIAM i TOCL. Wszystkie prace dotyczą głównego nurtu informatyki teoretycznej i nie ma wśród nich prac błahych. Habilitant ma też bardzo dobry dorobek dydaktyczny (m. in. kilka autorskich wykładów) oraz wyróż-

[4]Działanie i uroda algorytmu Angluin opierają się na tym, że w przypadku słów skończonych istnieje kanoniczny automat minimalny, który w dodatku charakteryzje się relacją w stylu Myhill-Nerode. Takiej kanoniczności w przypadku deterministycznych ω-automatów z warunkiem Büchiego nie ma, skąd NP zupełność problemu minimalizacji pokazana przez Schewego, oraz konieczność omijania tej trudności w pracy [A20]. Moim zdaniem, z powodu nieistnienia automatów kanonicznych, minimalizowanie deterministycznych automatów z warunkiem Büchiego jest nieporozumieniem i prowadzi do konstrukcji ad hoc i mniej interesujących (na przykład w pracy [A20] algorytm uczy się konkretnego automatu, a nie jego języka). Oczywiście minimalizować można każdą wartość, ale trudno się potem dziwić, jeśli mamy do czynienia z nieciekawą kombinatoryką. Warto przy okazji zwrócić uwagę na to, że dla ω-języków istnieją podejścia pozwalające na kanonizację. Przykładem są półgrupy Wilkego, choć rozmiar półgrup jest przeważnie wykładniczo większy od automatów. Pragnę podkreślić, że opinia wyrażona w tym przypisie jest moją osobistą opinią – na przykład sama Angluin nie ustaje w poszukiwaniach kongruencji na ω-automatach, które naśladują zachowanie słów skończonych.

niający się dorobek organizacyjny (m. in. pełnienie funkcji zastępcy dyrektora instytutu).

Podsumowanie

Habilitant ma obszerny dorobek, mieszczący się w głównym nurcie informatyki teoretycznej, typu *formal methods*. Choć być może brak w dorobku prac naprawdę wybitnych, są liczne prace dobre, świadczące o dobrym warsztacie i ambitnym programie badawczym. W moim osobistym odczuciu ciekawsze z dorobku są późniejsze prace, dotyczące uczenia i automatów ilościowych. Uważam to za świadectwo rozwoju Habilitanta: późniejsze prace mają prostsze modele, mniej twierdzeń, a dowody stają się trudniejsze i ciekawsze[5]. Podsumowując, popieram wniosek o nadanie dr. Michaliszynowi stopnia doktora habilitowanego.

Mikołaj Bojańczyk

[5] Można by złośliwie (w stosunku do bibliometrii) zauważyć, że konsekwencją tego rozwoju są mniej liczne publikacje na konferencjach rangi Core A*, takich jak IJCAI czy KR.