Dr hab. inż. Wojciech Jamroga, prof. IPIPAN
Instytutu Podstaw Informatyki PAN
wojciech.jamroga@ipipan.waw.pl

Gdańsk, 4.04.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej

Iwo Błądka

zatytułowanej:

Machine Learning and Formal Verification for Acquisition of Knowledge in Heuristic Program Synthesis

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Niniejsza rozprawa rozważa problem automatycznej syntezy programów w oparciu o podejścia heurystyczne, w szczególności podejścia związane z algorytmami genetycznymi. Automatyczna synteza programów ze specyfikacji jest problemem znanym i badanym od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Jako że problem ten charakteryzuje się wysoką złożonością obliczeniową, najbardziej obiecujące wydają się metody heurystyczne. W metodach tych przeszukiwanie przestrzeni możliwych rozwiązań nie jest czysto losowe, ale opiera się na zadanej z góry funkcji oceny. Wiele spośród znanych klas heurystyk inspirowanych jest procesami biologicznymi; przykładem takiej klasy są m.in. właśnie algorytmy genetyczne, zwane również ewolucyjnymi.

Autor rozprawy koncentruje się na czterech podklasach heurystyk ewolucyjnych. Są to:

a) ewolucyjne szkicowanie programów (*evolutionary program sketching*), czyli synteza fragmentów kodu do zadanego szablonu programistycznego przy użyciu redukcji do problemu spełnialności formuł logicznych pod zadanymi założeniami (*Satisfiability Modulo Theories*);

b) programowanie genetyczne kierowane kontrprzykładami (*counterexample-driven genetic* programming), czyli synteza programów podczas której poprawność częściowych rozwiązań weryfikowana jest przy użyciu solwera SMT, zaś ustalone w ten sposób kontrprzykłady służą do dynamicznego polepszania heurystyki;

c) regresja symboliczna kierowana kontrprzykładami (*counterexample-driven symbolic regression*), czyli rozszerzenie poprzedniego podejścia do bogatszych niż binarne funkcji oceny poprawności programu;

d) programowanie genetyczne wspierane sztuczną siecią neuronową (*neuro-guided genetic programming*), w którym pewne elementy heurystyki genetycznej zadane są poprzez przygotowaną uprzednio sieć neuronową.

Problem programowania genetycznego stanowi poważne wyzwanie naukowe. Należy także zaznaczyć, że wyżej wymienione podklasy tego problemu wymagają zaawansowanej wiedzy teoretycznej, znakomitego opanowania aparatu matematycznego i znaczących umiejętności programistycznych. Przedstawione w pracy badania mają również bezpośredni walor praktyczny, z potencjalnymi zastosowaniami w generowaniu rutynowych fragmentów kodu, czy syntezie prostych strategii w interakcji autonomicznych agentów.

2. Wkład autora

Wkład autora w niniejszej rozprawie koncentruje się na trzech powiązanych ze sobą kierunkach. Po pierwsze, precyzyjne definicje problemów i opracowanie podejść, służących do ich rozwiązania. Po drugie, implementacja algorytmów i wybór właściwych wartości parametrów, w szczególności wybór obiecujących kombinacji, które należy poddać eksperymentom. Po trzecie, eksperymentalna ewaluacja wybranych podejść i oparta o nią analiza porównawcza badanych podklas heurystyk ewolucyjnych.

W każdym z tych kierunków wkład autora oceniam jako znaczący. Kandydat wykazał się znakomitym rygorem formalnym, logiczną i przejrzystą prezentacją kontekstu formalnego i własnych pomysłów rozwiązań, jak również intuicją w doborze konkretnych rozwiązań niskopoziomowych (to ostatnie sądząc po obiecujących wynikach eksperymentów). Dyskusja otrzymanych wyników czyta się dobrze i jest zrozumiała nawet dla czytelnika spoza kręgu *genetic programming*.

Osobiście za najciekawszy uważam zestaw wyników, zaprezentowany w rozdziale 6 (*Counterexample-Driven Genetic Programming*). Autor dokonał twórczego połączenia technologii *soft computing* z metodologią weryfikacji formalnej, co wymagało bardzo dobrej znajomości obu dziedzin i tradycji metodologicznych. Zaprezentowane wyniki są obiecujące; co więcej, sugerują, że podobne podejście może okazać się owocne w pokrewnych dziedzinach analizy, np. w weryfikacji strategicznych własności systemów wieloagentowych.

Należy również podkreślić, że wyniki prezentowanych w dysertacji badań zostały opublikowane w bardzo dobrych międzynarodowych czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych, co dodatkowo podkreśla ich wartość.

3. Poprawność

Wyniki, zaprezentowane w niniejszej pracy, są bardzo starannie przedstawione, a ich analiza nie pozostawia pola do zarzutu. Praktycznie wszystkie wyniki są rezultatem eksperymentów programistycznych w oparciu o znane i ogólnie przyjęte benchmarki. Dyskusja i wnioski charakteryzuje się starannością, o czym świadczy drobiazgowa analiza porównawcza wyników osiągniętych przy różnych ustawieniach parametrów wejściowych badanych algorytmów.

Autor nie robi tajemnicy z faktu, że odpowiedni dobór parametrów jest kluczowy dla osiągniecia zadowalającej efektywności algorytmów syntezy. Taki przekaz podkreśla, że w przypadku syntezy programów naukowe metody osiągają największy potencjał tylko wtedy, gdy potrafimy je umiejętnie zastosować.

4. Wiedza kandydata

Niniejsza dysertacja dowodzi, że wiedza kandydata jest na wysokim poziomie. Praca wyróżnia się pod kątem staranności w definiowaniu problemów, będących przedmiotem badań. Na poziomie ogólnym poświęcone są temu rozdziały 2, 3 i 4. Ponadto każdy z późniejszych rozdziałów, przedstawiających oryginalne wyniki doktoranta, rozpoczyna się od systematycznego przedstawienia kontekstu omawianych badań. Bibliografia wydaje się dobrze ilustrować istniejący stan prac w dziedzinie.

Warto również podkreślić, że przedstawione w dysertacji koncepcje i wyniki wymagają wiedzy z *dwóch* gałęzi informatyki, mianowicie metod heurystycznych i metod formalnych. Użycie technologii SMT wiąże się z zaawansowanymi wyzwaniami natury logicznej i matematycznej. Kandydat ewidentnie posiada niezbędną wiedzę i umiejętności.

5. Inne uwagi

W mojej ocenie przedstawiona praca doktorska jest znakomita. Badany problem jest istotny, badania naukowe pierwszorzędnie zdefiniowane i zaplanowane, a wyniki eksperymentalne bardzo obiecujące. Dysertacja jest świetnie napisana nie tylko pod względem rygoru formalnego, logicznej prezentacji pomysłów i wyników oraz spójnej notacji i terminologii, ale również przystępności. Mogłaby z powodzeniem służyć jako materiał wprowadzający do zagadnień programowania genetycznego dla czytelników spoza ścisłego kręgu zagadnień syntezy programów i algorytmów ewolucyjnych.

Szczegółowe uwagi:

- Str. 37: Weryfikacja modelowa niekoniecznie musi opierać się na wyczerpującym przeszukiwaniu przestrzeni wszystkich możliwych rozwiązań, czego przykładem są np. tzw. weryfikacja symboliczna (McMillan) czy też redukcje częściowo-porządkowe (Peled).

- Str. 37: Podobnie rzecz ma się z weryfikacją systemów o nieskończonej ilości stanów: istnieje cały szereg prac, które rozważają ten problem.

- Rozdział 5: byłoby interesujące porównać wyniki z efektywnością podejścia ewolucyjnego z syntezą programów za pomocą „czystego” SMT.

- Str. 64: Jako że specyfikacje wejścia/wyjścia są (na poziomie logicznym) po prostu bardzo długimi koniunkcjami prostych predykatów, zaprezentowana metoda sprowadza się do zliczania ilości poprawnych przypadków testowych. W takim ujęciu funkcja zdrowia nie wydaje się być binarna.

- Rozdział 8: czy zaprezentowane tu podejście nie mogłoby dać ciekawych wyników w połączeniu z metodami, prezentowanymi w poprzednich rozdziałach?

W pracy występuje również niewielka ilość literówek i błędów gramatycznych, które przekażę kandydatowi do poprawy w postaci adnotacji na manuskrypcie.

6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez artykuł 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (z późniejszymi zmianami) [1] moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

A. Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problem naukowego? (wybierz jedną opcję stawiając znak **X**)

[X]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
Zdecydowanie TAK	*Raczej TAK*	*Trudno powiedzieć*	*Raczej NIE*	*Zdecydowanie NIE*

B. Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja?

[X]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
Zdecydowanie TAK	*Raczej TAK*	*Trudno powiedzieć*	*Raczej NIE*	*Zdecydowanie NIE*

C. Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

[X]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
Zdecydowanie TAK	*Raczej TAK*	*Trudno powiedzieć*	*Raczej NIE*	*Zdecydowanie NIE*

Ponadto, biorąc pod uwagę interesującą tematykę i zaprezentowane w pracy znakomite wyniki badawcze na pograniczu teorii i praktycznych zastosowań, rekomenduję wyróżnienie rozprawy doktorskiej.



Podpis

[1] http://www.nauka.gov.pl/g2/oryginal/2013_05/b26ba540a5785d48bee41aec63403b2c.pdf