

Prof. dr hab. Inż. Maciej Ogorzałek
Zakład Technologii Informatycznych
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytetu Jagiellońskiego
Ul. Prof. S. Łojasiewicza 11
30-348 Kraków

RECENZJA
Roprawy doktorskiej
mgra inż. Adama Żychowskiego
pt. “ Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w wielokrokowych
Grach Obronnych Stackelberga”

Niniejsza recenzja została wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej (pismo Przewodniczącego Rady prof. J. Arabasa z dnia 30 czerwca 2022).

1. Tematyka rozprawy

Praca mgra Adama Żychowskiego dotyczy, interesującego z punktu widzenia naukowego i praktycznego, problemu poszukiwania stanu równowagi w modelach zwanych wielokrokowymi grami obronnymi Stackelberga. Gry obronne Stackelberga rozgrywane są pomiędzy dwoma niesymetrycznymi graczami nazywanymi obrońcą i atakującym. Obrońca wybiera swoją strategię jako pierwszy, a następnie atakujący, znając strategię obrońcy, wybiera własną. Celem gry jest znalezienie w kolejnych krokach równowagi Stackelberga czyli takiej pary strategii obrońcy i atakującego, dla których zmiana strategii przez któregośkolwiek z graczy pogorszy jego oczekiwany rezultat.

Wśród zastosowań gier obronnych Stackelberga należy wymienić tworzenie rzeczywistych scenariuszy, takich jak zabezpieczenie lotnisk, walka z kłusownictwem w Afryce czy ochrona statków pasażerskich.

W przypadku klasy gier rozważanych w rozprawie udowodniono, że poszukiwanie równowagi jest problemem NP-trudnym, stąd zainteresowanie tworzeniem metod dających zadowalające aproksymacje rozwiązania optymalnego. Podjęcie tego tematu przez doktoranta należy uznać za zadanie ambitne i ciekawe naukowo. Podjęta tematyka należy do istotnych zadań badanych w wielu laboratoriach w świecie, a nowe koncepcje i podejścia do rozwiązania problemu budzą duże zainteresowanie.

Rozwiązania problemu opisane dotąd w literaturze skupione były wokół znajdowania rozwiązań dokładnych przy pomocy programowania liniowego i całkowitoliczbowego. Tego typu podejścia mają ograniczony zakres zastosowań ze względu na czasochłonność obliczeń i wymagania pamięci, dlatego rozmiar możliwych do rozwiązania problemów jest niewielki a w zastosowaniach ogranicza się do wąskich klas problemów takich jak np. gry jednokrokowe o sumie zerowej. W literaturze istnieje bardzo mało metod, które pozwalałyby na efektywne przybliżone znajdowanie rozwiązań dla większych wielokrokowych gier obronnych.

Propozycję użycia algorytmów ewolucyjnych należy uznać w tej dziedzinie za istotne novum. Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych otwiera możliwości rozwiązywania gier o dużych rozmiarach oraz zastosowania opracowanych algorytmów do szerokiej klasy problemów.

Analizując problematykę badawczą ujętą w pracy należy zwrócić uwagę na aspekt, który w moim przekonaniu stanowi istotną nowość. Jest to stworzenie algorytmu, który pozwala na rozwiązywanie gier o większych rozmiarach,

Autor wymienia wymagane cechy tego algorytmu:

1. skuteczność - bardzo dobra jakość wyników, powtarzalne uzyskiwanie rezultatów bliskich strategii optymalnej,
2. uniwersalność - zastosowanie bez istotnych modyfikacji do wielu wariantów gier,
3. efektywność obliczeniowa i pamięciowa - krótszy (w porównaniu do istniejących rozwiązań) czas działania i mniejsze zużycie pamięci.

Tematyka punktu 3 wymienionego powyżej jest moim zdaniem najciekawsza, gdyż bardzo niewiele badań tego typu zostało dotąd opisanych i opublikowanych.

2. Teza pracy

Na podstawie analizy literatury przedmiotu Autor sformułował zagadnienie badawcze, które zawarł w następującej tezie pracy:

Możliwe jest zastosowanie algorytmów ewolucyjnych do efektywnej aproksymacji strategii w stanie równowagi, w wielokrokowych grach obronnych Stackelberga.

W pracy po nakreśleniu tła rozważań Autor w sposób przekonujący uzasadnił tę tezę rozwijając w nowatorski sposób podejścia wcześniej nie stosowane do tego typu problemów, budując oryginalny model oraz jego implementację a w końcu przeprowadzając w oparciu o badania symulacyjne eksperymentalną walidację zaproponowanego przez siebie podejścia.

3. Struktura pracy

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 10 rozdziałów. Podział i przedstawienie materiału jest logiczne, pozwala osobie czytającej na łatwą analizę materiału.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie prezentujące tematykę rozprawy, jej zakres oraz sformułowanie hipotezy badawczej. W rozdziale 2 zawarto wstęp teoretyczny oraz omówienie poruszanych zagadnień z zakresu teorii gier, problemów optymalizacyjnych i algorytmów ewolucyjnych. Rozdział 3 definiuje równowagę Stackelberga oraz gry obronne oraz wymienia ich praktyczne zastosowania.

Rozdział 4 zawiera przegląd opisanych w literaturze metod poszukiwania równowagi Stackelberga. W kolejnych rozdziałach Autor zawarł opis własnych koncepcji rozwiązania postawionego problemu oraz wyniki przeprowadzonych różnorodnych eksperymentów.

Rozdział 5 przedstawia ogólny schemat proponowanego rozwiązania w oparciu o procesy ewolucyjne. Wyniki eksperymentów weryfikujących jakość proponowanego algorytmu ewolucyjnego na grach o różnej charakterystyce zostały

Przystawione w rozdziale 6. Rozdział 7 zawiera dokładniejszą analizę zaproponowanego algorytmu pod kątem wrażliwości na zmiany poszczególnych

parametrów, analizę jego zbieżności oraz stabilności. Omówione zostały także dodatkowe modyfikacje algorytmu.

Badaniu zagadnienia ograniczonej racjonalności w grach obronnych Stackelberga jest poświęcony rozdział 8. Zaproponowano w nim rozszerzenie opisywanej metody o sztuczną sieć neuronową oceniającą jakość weryfikowanych w procesie ewolucji rozwiązań.

Rozdział 9 prezentuje nowe, koewolucyjne podejście do badanego zagadnienia oraz ocenę jego skuteczności. W rozdziale 10 zawarto podsumowanie przeprowadzonych badań oraz przedyskutowano możliwości dalszego rozwoju zaprezentowanych prac badawczych.

Praca zawiera także dość obszerny spis literatury zawierający 91 pozycji (tylko kilka jest odniesień do literatury z ostatnich pięciu lat oprócz cytowania własnych prac Autora z lat 2020 i 2021).

Strona edytorska jest bardzo dobra. Praca zawiera dobrze przygotowany zestaw wykresów i rysunków na każdym etapie prowadzonych rozważań, jest bardzo dobrze opracowana graficznie.

4. Oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy

Najważniejsze samodzielne i oryginalne osiągnięcie Doktoranta to:

1. Zaproponowanie ogólnej postaci algorytmu ewolucyjnego rozwiązującego gry obronne Stackelberga, nazwanego EASG (Evolutionary Algorithm for Security Games).
2. Rozważenie scenariusze, dla których przejrzenie wszystkich strategii prostych Atakującego jest zbyt czasochłonne lub praktycznie niemożliwe oraz zaproponowanie efektywnego rozwiązania przy użyciu przybliżonej metody oceny jakości rozwiązania – oszacowania wypłaty Obrońcy. Autor zaproponował dwa nowe podejścia:
 - (1) wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej uczonej estymowania wypłaty Obrońcy na podstawie jego strategii oraz definicji gry,
 - (2) zastosowanie podejścia koewolucyjnego, w którym populacja strategii Obrońcy jest oceniana względem wybranych, reprezentatywnych strategii z równoległe rozwijanej populacji strategii Atakującego.
3. Wykonanie licznych eksperymentów weryfikujących skuteczność zaproponowanego oryginalnego algorytmu ewolucyjnego (EASG) dla pięciu różnych typów gier obronnych Stackelberga w tym gier rozgrywanych na grafach w przestrzeni dyskretnej - WHG (WareHouse Games), SEG (Search Games) i FIG (Flipit Games), oraz na płaszczyźnie w przestrzeni ciągłej SGP (Security Games on a Plane) oraz tzw. gier SGS (Security Games with Signaling).
4. W każdym z testowanych typów zastosowań Autor dokonał adaptacji algorytmu ewolucyjnego, tak by mógł on być efektywnie zastosowany. Wykonał także liczne badania wariantów algorytmu dla różnych wartości parametrów zmienianych w szerokim zakresie.
5. W oparciu o wykonane eksperymenty wykazano skalowalność czasowa i pamięciową algorytmu ewolucyjnego. Czas działania algorytmu jest mniejszy niż w przypadku konkurencyjnych metod, co uwidacznia się szczególnie w przypadku gier o większych rozmiarach.

6. Ciekawym wnioskiem jest wskazanie, że dzięki temu, że algorytm ewolucyjny nie buduje drzewa gry, wykorzystuje znacznie mniej zasobów pamięciowych. Ich użycie jest w przybliżeniu stałe niezależnie od rozmiaru gry.
7. Niestychnie ciekawe są wyniki całościowej analizy zaproponowanego algorytmu ewolucyjnego - EASG. W rozdziale 7 pracy pokazano eksperymenty obejmujące badania trzech typów gier (Warehouse Games (WHG), Search Games (SEG) oraz FlipIt Games (FIG)), na podstawie których można dobrać wartości parametrów oraz określić wpływ doboru parametrów na jakość wyników i wrażliwość algorytmu na ich zmianę.
8. Przedstawiono modyfikacje metody oraz różne warianty operatorów (Rozdział 7.4) oraz rozwinięcia algorytmu przez połączenie z siecią neuronową oraz algorytm koewolucyjny (opisane w Rozdziale 9).
9. Rozdział 8 zawiera kolejne unikalne wyniki dotyczące Implementacji teorii ograniczonej racjonalności poprzez rozszerzenie algorytmu EASG.

Wykonane badania stanowią istotny przyczynek do głębszego poznania właściwości algorytmu ewolucyjnego przystosowanego do rozwiązywania różnych typów gier Stackelberga i licznych rodzajów zastosowań. Uzyskane wyniki można uznać za oryginalne i ciekawe.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W czasie czytania tak obszernej i wielowątkowej rozprawy nasuwa się szereg pytań, które mogą stanowić element dyskusji w trakcie obrony pracy ale nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę całości opracowania. Najważniejsze z pytań jakie nasunęły mi się podczas czytania rozprawy są następujące:

1. Autor wspomina o przydatności opracowanego algorytmu do rozwiązywania zadań o większych rozmiarach. Co określa wymiarowość rozważanych problemów?
2. Jakie wymiarowości spotykane są w rzeczywistych problemach wymagających tego typu strategii rozwiązań? Jak ocenić stopień komplikacji rozważanego problemu? Czy ocena liczby parametrów jest wystarczająca?
3. Jakie są realistyczne ograniczenia stosowalności proponowanych algorytmów?
4. Czy możliwe jest dalsze poprawienie otrzymywanych rozwiązań? W jakie sposób?
5. Jakie są możliwości przeprowadzenia testów na rzeczywistych danych?

Podsumowanie

Oceniając pracę należy podkreślić kilka ciekawych pomysłów teoretycznych zaproponowanych przez doktoranta, które zwiększają efektywność uzyskania rozwiązania dla wybranych gier obronnych Stackelberga. Zaprezentowane podejście ewolucyjne jest prawdopodobnie pierwszym w zastosowaniu metod ewolucyjnych do rozwiązywania wielokrokowych gier obronnych Stackelberga. Nowa metoda o szerokich możliwościach dzięki łatwej adaptacji do gier obronnych o różnej charakterystyce stanowi alternatywę dla wcześniejszych rozwiązań.

Przedstawione ciekawe rezultaty teoretyczne, nowe koncepcje algorytmów oraz wszechstronnie przeprowadzone badania symulacyjne wraz z wnioskami mają

wysoką wartość naukową i z pewnością mogą być podstawą do nadania stopnia doktora w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona przez mgra inż. Adama Żychowskiego praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odnośne przepisy. Wnoszę o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę oryginalność osiągniętych rezultatów, szerokie możliwości zastosowań proponowanego podejścia oraz uznanie jakim cieszą się uzyskane wyniki w społeczności badaczy w świecie, co potwierdzone zostało publikacją wyników w serii ośmiu artykułów w najlepszych międzynarodowych periodykach i materiałach wiodących konferencji o zasięgu i randze światowej wymienionych na stronach 3-6 pracy, wnioskuję o wyróżnienie tej pracy.

Kraków, dnia 28 września 2022

