

Częstochowa, dn. 5 grudnia 2022 r.

prof. dr hab. inż. Rafał Scherer  
Katedra Inteligentnych Systemów Informatycznych  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki  
Politechnika Częstochowska  
al. Armii Krajowej 36  
42-200 Częstochowa

## **Recenzja**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jana Karwowskiego, pt.: Aproksymacja stanu równowagi Stackelberga w grach wielokrokowych o sumie niezerowej z niepełną informacją z użyciem metod Monte Carlo.

Niniejszą recenzję opracowano na wniosek Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej, która na posiedzeniu dnia 21 czerwca 2022 roku powołała mnie na recenzenta. Promotorem jest prof. dr hab. inż. Jacek Mańdziuk.

### **1. Charakterystyka tematu, celu i tezy badawczej rozprawy**

Stan równowagi Stackelberga jest to stan, w którym dwóch lub więcej graczy pragnie osiągnąć najlepsze możliwe rozwiązanie dla swoich interesów. W tym stanie, każdy gracz działa w sposób, który pozwala im maksymalizować ich korzyści, biorąc pod uwagę działania pozostałych graczy. Zastosowanie stanu równowagi Stackelberga jest szerokie i może dotyczyć różnych dziedzin, takich jak ekonomia, politologia czy inżynieria. Recenzowana praca dotyczy znajdowania przybliżonego rozwiązania wybranych rodzin gier.

### **2. Zawartość rozprawy**

Recenzowana praca mgr inż. Jana Karwowskiego składa się ze streszczeń, pięciu rozdziałów, bibliografii oraz dodatku. Dokument liczy 165 stron.

Pierwszy rozdział zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki teorii gier oraz równowagi Stackelberga. Omawia zastosowania teorii gier w najróżniejszych dziedzinach życia i techniki. Doktorant zauważa, że zastosowania skupiają się na grach jednokrokowych, w tym tą cechą mają zastosowania w grach obronnych. Występuje wyraźny brak metod pozwalających na obliczanie równowagi Stackelberga w grach wielokrokowych. Wprowadzono również pojęcie

Monte Carlo Tree Search (MCTS) i najbardziej spektakularne zastosowania. Dalej opisany jest cel rozprawy, którym jest stworzenie metod aproksymujących równowagę Stackelberga w grach wielokrokowych z niepełną informacją o sumie niezerowej. Aproksymacja w tym przypadku to poszukiwanie strategii lidera przy założeniu optymalnej gry naśladowcy. Problem ten jest problemem NP-trudnym. Dalej omówiono hipotezę badawczą, przedstawiono oryginalne wyniki rozprawy, podano zestawienie publikacji Autora oraz omówiono układ rozprawy.

Rozdział 2 jest omówieniem pojęć związanych z teorią gier. Omówiono podstawowe definicje jak sama gra, gra o sumie zerowej, niezerowej, jednokrokowe, wielokrokowe, z pełną informacją, z niepełną informacją oraz niekooperacyjne. Omówiono reprezentację gier jednokrokowych, pojęcia strategii prostej i mieszanej. Opisano gry sekwencyjne czyli wielokrokowe, w tym gry ekstensywne z przykładem. Następnie jest omówiona równowaga Nasha i Stackelberga, oraz silna równowaga Stackelberga w grach skończonych oraz związek równowagi Stackelberga z dwupoziomym problemem optymalizacyjnym. Doktorant przedstawił również powody dla których problem optymalizacji jest problemem NP-trudnym. Rozdział kończą rozważania na temat możliwości wystąpienia braku racjonalności przeciwnika, co często występuje w realnym świecie.

Rozdział 3 jest przeglądem istniejących metod rozwiązywania Gier Stackelberga. Pierwszą rodziną są metody rozwiązujące wiele programów liniowych, których problemem jest ich niska skalowalność. Następnie omówiona jest metoda Decomposed Optimal Bayesian Stackelberg Solver (DOBSS) rozwiązująca jeden mieszany program liniowy. Ponieważ nie ma tu konieczności przeglądu wszystkich możliwych strategii, czas obliczeń jest krótszy. Następną metodą jest metoda Accelerated SPars Engine (ASPEN), w której iteracyjnie dodaje się zmienne przedstawiające najbardziej obiecujące strategie lidera. Metoda ta używana do klas gier Security Problems with ARbitrary Schedules (SPARS) pozwala na dalsze skrócenie czasu obliczeń. Autor bardzo szczegółowo przeanalizował metodę, pokazując przyczyny przyspieszania obliczeń, analizując mechanizm generowania kolumn i metody podziału i ograniczeń. Następnie analizowane są metody wykorzystujące strategie brzegowe, w których wektory pokrycia celów są definiowane jako strategie brzegowe. Autor pokazuje również użycie strategii brzegowych do obronnej gry wielokrokowej typu Stackelberg Model of the Oil-Siphoning problem (SMOS). Następnie mówiono o rozszerzeniu polegające na generowaniu ograniczeń i abstrahowaniu gry. Dalej Autor omawia autorskie uogólnienie metody SMOS do sumy niezerowej, które zostało zaprezentowane na prestiżowej konferencji AAAI. Modyfikacja polega na dopuszczeniu sumy niezerowej, oraz tym, że zostały zdefiniowane możliwe trasy statków oraz na wyborze czasu i statku przez ustaloną liczbę rund. Dalej Doktorant omawia rodzinę metod wykorzystujących podwójną wyrocznię oraz dedykowanych klasie gier wielokrokowych o sumie niezerowej.

Rozdział 4 zawiera autorskie metody aproksymacji równowagi Stackelberga. Rozdział 4.1 omawia gry wykorzystane przy ocenie metod, a mianowicie rodzinę Warehouse Games w różnych wariantach. Podrozdział 4.2 zawiera opis autorskiej metody Mixed-UCT, zawierającą

również opis pierwotnej metody UCT, metody I2UCT, która jest modyfikacją do stosowania w grach z zadaną strategią naśladowcy oraz metodę mixed-UCT. Metodę zaimplementowano w językach Java i SCALA i porównano z metodami DOBSS i BC2015. Eksperymenty pokazały, że zaproponowana metoda działa szybciej w przypadku dłuższych gier i ma mniejsze zapotrzebowanie na pamięć niż konkurencyjne metody z literatury. Rozdział 4.3 opisuje kolejną autorską metodę nazwaną O2-UCT i służy do znajdowania strategii lidera z jak największą wypłatą w grach Stackelberga, ale bez ograniczenia na strukturę zbiorów informacyjnych. W podrozdziale 4.4 omówione są wyniki eksperymentów. Doktorant stwierdza, że proponowane metody rozwiązują dużo większe gry niż metody oparte o programowanie liniowe z powodu mniejszego zapotrzebowania na pamięć i moc obliczeniową, które rosną w tych ostatnich wykładniczo.

Rozdział 5 jest podsumowaniem rozprawy, w którym zebrano w jednym miejscu opisy poszczególnych autorskich metod i wnioski z eksperymentów. Podano również pomysły na dalszą pracę związaną z zaproponowanymi metodami, np. poprawienie przeglądu strategii naśladowcy, modyfikacja metody poprawy strategii lidera w metodzie O2-UCT czy uwzględnienie niepełnej racjonalności naśladowcy.

Pracę kończy bibliografia składająca się z 96 pozycji oraz dodatek opisujący zbiory danych.

### 3. Ocena rozprawy

W ramach rozprawy doktorskiej Doktorant zaproponował metody pozwalające na znalezienia strategii lidera w sekwencyjnych grach Stackelberga o sumie niezerowej z niepełną informacją z własnością doskonałej pamięci. Zaproponowane metody przetestował na grach testowych i porównał z wybranymi metodami z literatury. Metody te bazują na algorytmie Upper Confidence Bound applied to Trees.

Rozprawa doktorska uwidacznia wysoką ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną mgra inż. Jana Karwowskiego. Doktorant przeanalizował dorobek światowy w dziedzinie rozwiązywania równowagi Stackelberga. Zauważył problemy związane z dotychczasowymi metodami i zaproponował własne rozwiązania, które opublikował w czasopiśmie i materiałach renomowanych konferencji naukowych. Mgr Karwowski opublikował siedem prac naukowych: m.in. w czasopiśmie za 140 punktów oraz prace w materiałach konferencji, w tym trzy na konferencjach A\* rankingu CORE. Zaprezentowany materiał pokazuje, że Doktorant zrealizował cel pracy.

Rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej mgra inż. Jana Karwowskiego. Opracował wprowadzenie do tematyki i dokonał przeglądu literatury dotyczącej wybranych zagadnień teorii gier. Stworzył autorskie oprogramowanie w języku Java. Zadbał o popularyzację wyników swoich badań w wysokopunktowanych wydawnictwach.

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaproponowane metody mają duże znaczenie dla nauki, zarówno teoretyczne, jak i aplikacyjne. Podjęta tematyka może mieć wiele zastosowań w ekonomii, polityce, socjologii czy obronności. Opracowanie autorskiego oprogramowania w języku Java zwiększa możliwości aplikacyjne.

W pracy znajduje się trochę drobnych błędów, których przykłady wymienione są poniżej.

Podrozdział 4.1.1 jest jedynym w 4.1.

Nieistotne błędy literowe, np. „solvery programowani liniowego.”

Kropka jako separator dziesiętny w tabeli 4.5.

#### 4. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Jan Karwowski w rozprawie doktorskiej „Aproksymacja stanu równowagi Stackelberga w grach wielokrokowych o sumie niezerowej z niepełną informacją z użyciem metod Monte Carlo” zrealizował cel rozprawy. Zaprezentowane rezultaty stanowią oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Pan Jan Karwowski wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i wiedzą w zakresie teorii gier i metod ich aproksymacji. Recenzowana praca spełnia wymagania ustawy o tytule i stopniach naukowych w dyscyplinie naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do dalszych etapów postępowania doktorskiego. Jednocześnie, ze względu na wysoki poziom naukowy rozprawy, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

