

Gdynia, 1 października 2018r.

dr hab. inż. Ireneusz Czarnowski, prof. UMG
Katedra Systemów Informatycznych
Uniwersytet Morski w Gdyni
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Krzywickiego
pt.: „*Concurrent Execution Models for Agent-Based Computing Systems*”.

Podstawą do przygotowania niniejszej recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie nr IEiT.510-5/15/345/2018 z dnia 25 czerwca 2018r., gdzie zostałem wskazany jako recenzent rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Krzywickiego, oraz pismo nr IEiT.510-5/15/576/2018 z dnia 25 września 2018 roku potwierdzające, iż przewód doktorski mgr inż. Daniela Krzywickiego prowadzony jest w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Informatyka.

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana pod opieką promotora dr. hab. inż. Marka Kisiel-Dorochnickiego, prof. AGH, oraz promotora pomocniczego dr. inż. Romana Dębskiego. Została ona przedstawiona w formie zbioru wieloautorskich artykułów, opublikowanych w czasopismach naukowych określonych przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Zbiór ten tworzy 5 artykułów, w tym 4 artykuły opublikowane w czasopismach z listy A oraz jeden artykuł opublikowany w czasopiśmie z listy B:

- A1. **Daniel Krzywicki**, Aleksander Byrski, Marek Kisiel-Dorohinicki, Computing agents for decision support systems, Future Generation Computer Systems, 2014. MNiSW list A, 40 punktów, IF 2.786
- A2. **Daniel Krzywicki**, Wojciech Turek, Aleksander Byrski, Marek Kisiel-Dorohinicki, Massively concurrent agent-based evolutionary computing, Journal of Computational Science, 2015, MNiSW list A, 30 points, IF 1.078
- A3. Wojciech Turek, Jan Stypka, **Daniel Krzywicki**, Piotr Anielski, Kamil Pietak, Aleksander Byrski, Marek Kisiel-Dorohinicki, Highly scalable Erlang framework for agent-based metaheuristic computing, Journal of Computational Science, 2016 MNiSW list A, 30 punktów, IF 1.748
- A4. Jan Stypka, Piotr Anielski, Szymon Mentel, **Daniel Krzywicki**, Wojciech Turek, Aleksander Byrski, Marek Kisiel-Dorohinicki, Parallel patterns for agent-based evolutionary computing, Computer Science, 2016, MNiSW list B, 12 punktów
- A5. **Daniel Krzywicki**, Łukasz Faber, Roman Dębski, Concurrent agent-based evolutionary computations as adaptive data flows, Concurrency and Computation: Practice and Experience, MNiSW list A, 25 punktów, IF 1.133

1. Problematyka naukowa rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy modelowania złożonych systemów wieloagentowych. Celem pracy doktorskiej było zbadanie, jak różne modele współbieżnego wykonywania, różniące się sposobem wymiany informacji pomiędzy agentami oraz interakcjami pomiędzy tymi agentami, wpływają na właściwości systemu, w tym efektywność obliczeń. W szczególności badaniu poddano wybrane (proponowane przez Doktoranta) modele interakcji. Celem pracy było również sformułowanie ogólnych założeń dla współbieżnych i równoległych modeli interakcji w agentowych systemach obliczeniowych.

Jako model obliczeniowy systemu agentowego przyjęto tzw. Ewolucyjny System Wieloagentowy (ang. Evolutionary Multi-Agent Systems, EMAS). Modele obliczeniowe EMAS dedykowane są rozwiązywaniu trudnych obliczeniowo problemów optymalizacyjnych i stanowią one połączenie algorytmów ewolucyjnych z elementami systemów agentowych. Tym samym, w ramach rozprawy doktorskiej badania skoncentrowano na ocenie zaproponowanych modeli interakcji pomiędzy agentami w populacji agentów, oraz wpływie zastosowanego modelu interakcji na efektywność obliczeń systemu EMAS.

Prace badawcze podjęte przez Doktoranta poświęcone zostały analizie i zwiększeniu efektywności systemów wieloagentowych. Jest to zatem praca doktorska z dyscypliny Informatyki. Paradygmat agentowy lokuje zakres merytoryczny pracy w obszarze sztucznej inteligencji. Charakter badań lokuje pracę także w obszarach: algorytmika oraz architektura procesów. Z uwagi na możliwość wykorzystania uzyskanych wyników do ulepszania oprogramowania opartego na paradygmacie agentowym, w tym ukierunkowanego na poprawę jego efektywności i funkcjonalności obliczeniowej, pracę można również ulokować w obszarze inżynieria oprogramowania.

Zakres tematyczny pracy doktorskiej stanowi obszar aktywny badawczo. Wpisuje się on w trendy i kierunki badań nad złożonymi i rozproszonymi systemami, w tym systemami agentowymi, oraz systemami rozwiązującymi trudne problemy kombinatoryczne.

Uzyskane i przedstawione w rozprawie nowe, zarówno teoretyczne jak i analityczne wyniki, wnoszą dodatkowe istotne znaczenie poznawcze i praktyczne.

2. Treść rozprawy

Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim. W pracy zawarto streszczenie w języku angielskim oraz w języku polskim.

Opracowanie Doktoranta obejmuje 131 stron i składa się z:

- 5 rozdziałów, w tym wstępu i zakończenia,
- pięciu prac (artykułów) włączonych w strukturę opracowania,
- wykazu bibliografii, w której zawarto 34 pozycje literaturowe – z wyłączeniem wykazów bibliografii zawartych w poszczególnych artykułach, oraz
- spisu treści.

W rozdziale pierwszym rozprawy Doktorant uzasadnia podjętą problematykę badań. Następnie formułuje zakres pracy oraz cele badań, z których wynika hipoteza badawcza rozprawy - choć

Doktorant nie formułuje jej wprost w rozprawie. W rozdziale pierwszym Autor odnosi się również do struktury pracy.

W rozdziale drugim pracy zawarto ogólną charakterystykę Ewolucyjnego Systemu Wieloagentowego oraz na przykładzie studium przypadku przedstawiono działanie EMAS. W rozdziale drugim Doktorant omówił również zagadnienie interakcji w systemach wieloagentowych oraz ogólny model interakcji dla współbieżnego wykonywania.

W rozdziale trzecim rozprawy Doktorant odwołuje się do proponowanych modeli współbieżnego wykonywania i podejmuje się wykazania istoty rozdziału pomiędzy semantyką obliczeń w systemach obliczeniowych a modelem wykonywania, wprowadzając tym samym pojęcie tak zwanej funkcji zachowań oraz funkcji spotkań.

W szczególności podrozdział 3.1 obejmuje omówienie typowej implementacji agentowego systemu obliczeniowego, opartej na dzieleniu populacji agentów na grupy o podobnym zachowaniu oraz z wykorzystaniem tzw. funkcji zachowań. Po czym każda z grup z osobna jest przekształcana, korzystając przy tym z tzw. funkcji spotkań, w konsekwencji nowi agenci pojawiający się w wyniku łączenia poszczególnych podgrup, tworzą nową populację rozwiązań.

Następnie - podrozdział 3.2, przedstawia model synchronicznego wykonywania obliczeń w systemie agentowym. Merytoryczna dyskusja takiej implementacji synchronicznego modelu interakcji w obliczeniowym systemie agentowym została przedstawiona w artykule A1. Artykuł ten w opracowaniu Doktoranta został ulokowany po podrozdziale 3.2.

A1.Artykuł dotyczy systemów wspomagania decyzji oraz roli metaheurystyk w tych systemach. W artykule przedstawiono algorytm EMAS, jego strukturę, oraz omówiono rolę poszczególnych agentów w systemie. Kolejny, trzeci rozdział artykułu odnosi do aspektu zrównoleglenia oraz rozproszenia obliczeń. Dalej przedstawiono wybrane biblioteki dedykowane równoległej i rozproszonej implementacji systemów agentowych. W kolejnej części artykułu – rozdział piąty, omówiono synchroniczną i asynchroniczną implementację algorytmu EMAS. W części poświęconej eksperymentom obliczeniowym skoncentrowano się na ocenie jakości uzyskiwanych wyników dla scenariusza obliczeń opartego na synchronicznym i asynchronicznym modelu komunikacji w algorytmie EMAS, oraz na ocenie jego skalowalności. Eksperyment przeprowadzono dla problemu benchmarkowego z funkcją Rastrigina.

Rozdział 3.3 poświęcono proponowanemu tzw. aktorowemu modelowi współbieżności. Ten model interakcji opiera się na modelu obliczeniowym, którego działania niezbędne do wykonania w systemie są identyfikowane przez tak zwanych aktorów. W proponowanym modelu aktorzy mogą być przypisywani agentom, ich zachowaniom lub interakcjom. Model oparty na aktorach pozwala na ustalenie działań niezbędnych do realizacji przez poszczególnych agentów. Tym samym dany aktor jest w stanie ocenić, jakie interakcje i działania są niezbędne do wykonania grupowo – współbieżnie. W konsekwencji tworzone są nowe agenty dedykowane stawianym zadaniom oraz usuwane są te, które nie dostarczają w danym momencie odpowiednich zachowań. Merytoryczna dyskusja powyższego modelu stanowi zawartość artykułów A2 i A3.

A2.W artykule w jego pierwszym rozdziale, odniesiono się do aspektów przetwarzania rozproszonego opartego na systemach wieloagentowych. Następnie, odwołano się do

ewolucyjnego systemu wieloagentowego oraz do aspektów implementacji takich systemów, w szczególności wykorzystujących asynchroniczny model obliczeniowy. Rozdział drugi stanowi przegląd bibliotek oraz platform dedykowanych implementacji systemów agentowych. Kolejny rozdział przedstawia strukturę podejścia EMAS (rozdział 3). W kolejnym, czwartym rozdziale artykułu, opisano implementację systemu agentowego opartego na ocenie zachowań agentów, ich grupowaniu z użyciem funkcji spotkań oraz ich łączeniu (tzw. reprodukcji), celem uzyskania nowych zachowań pozwalających realizować we fragmentach lub w całości określony cel. Rozważono trzy przypadki dla implementacji proponowanego podejścia: sekwencyjne, hybrydowe oraz współbieżne. Podejścia te różnią się sposobem i stopniem zrównoleglenia wykonywania obliczeń w ramach definiowanych procesów (aktorów). Ostatnie z podejść – współbieżne, cechuje się asynchronicznością procesów, w tym asynchronicznością iteracji pomiędzy aktorami w systemie. Rozdział piąty artykułu zawiera wyniki eksperymentów obliczeniowych. W konkluzji pracy podkreślono, że uzyskane wyniki wskazują na wyraźną wydajność aktorowego modelu współbieżności opartego na podejściu równoległym.

- A3. Artykuł ten omawia wybrane podejścia, związane z budowaniem agentowych modeli obliczeniowych (przeznaczonych do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych) i opartych na implementacji z użyciem języka Erlang, a także ocenia te podejścia z punktu widzenia skalowalności docelowego systemu. Rozdział drugi artykułu prezentuje ogólne założenia dla ewolucyjnego systemu agentowego, w tym charakteryzuje jego standardowy model interakcji. Kolejny, trzeci rozdział, zawiera opis implementacji systemu EMAS w oparciu o cztery wybrane podejścia implementacji współbieżności. Następnie, przedstawiono wyniki eksperymentów oceny skalowalności implementowanych systemów. Eksperymenty te przeprowadzono w oparciu o problem benchmarkowy z funkcją Rastrigina oraz na przykładzie rzeczywistego problemu zarządzania ruchem. Ostatni rozdział zawiera konkluzje.

Rozdział 3.4 dedykowano kolejnemu proponowanemu modelowi współbieżności wykorzystującemu tzw. równoległe szkielety algorytmiczne. Model wykorzystujący równoległe szkielety algorytmiczne opiera się na analizie programów i ich modyfikacji, sprowadzając je do bardziej efektywnych, bez zmiany ich zachowania. Przykładem takiej modyfikacji może być podmiana fragmentu kodu, realizowanego sekwencyjnie na kod wykonywany równoległe bez utraty ogólnego kierunku przetwarzania aplikacji. Merytoryczna dyskusja modelu opartego na równoległych szkieletach algorytmicznych została zawarta w artykule A4.

- A4. W artykule omówiono ideę współbieżnej implementacji algorytmu opartego na populacji rozwiązań, paradygmacie agentowym oraz wykorzystującego ideę szkieletów algorytmicznych. W rozdziale 2 artykułu, przedstawiono ogólną charakterystykę EMAS. Następnie, w rozdziale 3, scharakteryzowano wybrane biblioteki implementacji systemów agentowych. Rozdział 4 artykułu przedstawia ogólną koncepcję podejścia opartego na szkieletach algorytmicznych. Implementacja modelu w ramach architektury EMAS została przedstawiona w rozdziale 5. Rozwiązanie implementacyjne podejścia opartego na szkieletach algorytmicznych zrealizowano z wykorzystaniem biblioteki języka Erlang. Biblioteka ta dostarcza możliwości do oprogramowania mechanizmów proponowanego modelu współbieżności. Eksperymenty obliczeniowe oraz ich wyniki, przedstawiono

w rozdziale 6 artykułu. Wyniki eksperymentów potwierdziły korzystność stosowania modelu współbieżności opartego, na równoległych szkieletach algorytmicznych.

Rozdział 3.5 związany jest z czwartym spośród proponowanych przez Doktoranta modeli interakcji, tj. z modelem współbieżnego wykonywania obliczeń opartym na strumieniach danych. Model ten zasadza się na założeniu o podziale struktury danych na fragmenty i przetwarzaniu ich w odpowiedniej kolejności na wzór strumienia danych. Strumień ten postrzegany jest jako graf etapów. Poszczególne strumienie są też traktowane jako agenty o odpowiednich zachowaniach, a w zależności od funkcji zachowania, są one kierowane na etapy zbieżne pod względem zachowania. Takie rozwiązanie umożliwia w swej implementacji interakcję i wyłanianie funkcji spotkań pomiędzy agentami w sąsiednich strumieniach. Merytoryczne omówienie modelu współbieżnego wykonywania, opartego na reaktywnych strumieniach danych, przedstawiono w pracy A5.

A5. Autor w pierwszym rozdziale artykułu uzasadnił podjęte poszukiwanie nowych modeli przetwarzania w systemach agentowych, odwołując się do aktorowego modelu współbieżności, opartego na asynchronicznym i równoległym podejściu do jego implementacji. Następnie, w rozdziale 3, przedstawił nową koncepcję przetwarzania opartą na strumieniach danych. W rozdziale 4 artykułu przedstawiono wyniki eksperymentów obliczeniowych, uzyskane na danych benchmarkowych z funkcją Rastrigina oraz z funkcją Ackleya. Wyniki te zobrazowano na licznych wykresach.

Rozdział 4 rozprawy stanowi podsumowanie uzyskanych przez Doktoranta wyników badań.

Rozdział 5 rozprawy zawiera wnioski końcowe sformułowane przez Doktoranta, odnoszące się do znaczenia uzyskanych wyników badań dla rozwoju dyscypliny Informatyka.

3. Najważniejsze wyniki uzyskane w pracy

Choć w dokumentacji rozprawy nie wskazano wkładu Doktoranta w przygotowanie poszczególnych artykułów, to opierając się na strukturze pracy, jej układzie oraz komentarzach poprzedzających poszczególne artykuły stanowiące recenzowane opracowanie, do oryginalnych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- zaproponowanie formalizmu pozwalającego na definiowanie semantyki algorytmu agentowego i dającego możliwość oceny i opisu zachowań agentów oraz ich interakcji,
- zaproponowanie nowych modeli przetwarzania współbieżnego dla wieloagentowych systemów obliczeniowych, różniących się sposobem wymiany informacji pomiędzy agentami,
- zaproponowanie modeli współbieżnego wykonywania interakcji agentów, które mogą być oddzielone od semantyki algorytmu, a tym samym zaproponowanie podejścia pozwalającego na dostosowanie modelu wykonania interakcji agentów do konkretnej architektury sprzętowej lub rozmiaru problemu,
- ukazanie, że dany algorytm może być wykonany w oparciu o różne modele współbieżnego wykonywania, tym samym wykazanie, że dobór modelu wykonywania współbieżnego w systemie agentowym, może mieć wpływ na wydajność obliczeń.

Za wartościowy należy również uznać sam sposób przyjętej prezentacji wyników badań, który przekonuje mnie o zasadności przeprowadzonych badań.

Ponadto należy podkreślić, że efekty przeprowadzonych prac badawczych mogą zostać wykorzystane do ulepszenia oprogramowania służącego do obliczeń agentowych, które częściowo znalazły już komercyjne wykorzystanie.

Poza artykułami stanowiącymi zbiór recenzowanego opracowania, Doktorant jest także współautorem kilku innych artykułów, które zostały opublikowane w czasopiśmie naukowych określonych przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Prace badawcze były realizowane w ramach grantów badawczych, w których uczestniczył Doktorant.

Doktorant uczestniczył też w kilku konferencjach, podczas których prezentował otrzymane wyniki.

4. Uwagi i pytania do recenzowanej pracy

Dokonując recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Krzywickiego, można sformułować kilka uwag i pytań. Proszę Doktoranta o odniesienie się do nich podczas publicznej obrony.

Uwagi i pytania:

- Szkoda, że w rozdziale drugim Doktorant korzysta z terminów, które nie do końca są utarte w literaturze. Tym samym, trudno jest czytając pracę, zrozumieć istotę działania algorytmu EMAS oraz mechanizmy związane z przetwarzaniem współbieżnym. Te wyjaśnienia pojawiają się w poszczególnych artykułach, jednak w różnych miejscach, co nie koniecznie pozwala na płynne przejście po niezbędnej nomenklaturze.
- W rozdziale drugim przedstawianie istoty działania algorytmu EMAS w oparciu o pseudokod lub np. diagramy UML, pozwoliłoby lepiej zrozumieć jego działanie. Uwaga ta jest tym bardziej zasadna, że takiej formy prezentacji nie użyto również w artykułach stanowiących zbiór prac rozprawy doktorskiej.
- W rozdziale trzecim pojawiają się oznaczenia, które nie zostały wprowadzone, a zostały wykorzystane do przedstawienia istoty problemu badawczego. Na przykład na rysunku 3.2, poszczególne bloki obrazują strukturę decyzyjną tzw. funkcji zachowań. Bloki te nie zostały wyjaśnione, a użyte w nich oznaczenia są dalej konsekwentnie wykorzystywane, co nie jest komfortowe dla poznania poszczególnych proponowanych rozwiązań (na przykład, co oznacza fitness i energy na rys. 3.2?).
- Nie do końca jednoznaczne jest, jak wyznaczana jest funkcja zachowań i funkcja spotkań. Czy należy rozumieć, że funkcje te pozwalają na określenie pewnych wartości? Jeśli tak, to w jaki sposób? Szkoda, że zabrakło w opracowaniu przykładu pokazującego potencjalne rozwiązanie oraz sposób kodowania interakcji.
- Jak konstruowane są populacje agentów? Czy sposób ich konstruowania może mieć wpływ na implementacje proponowanych modeli przetwarzania współbieżnego?

- Szkoda, że na etapie eksperymentów obliczeniowych nie przedstawiono porównania proponowanych modeli na tle innych algorytmów przetwarzania współbieżnego lub równoległego, tym bardziej, że eksperymenty przeprowadzono dla benchmarków wybranych problemów optymalizacyjnych. Tym samym, jak uwzględniając typowe miary oceny efektywności zrównoleglenia obliczeń plasuje się na tle innych podejść i rozwiązań algorytmicznych system agentowy obliczeń, oparty na proponowanych modelach współbieżnego wykonywania?
- Jaki jest wpływ proponowanych modeli współbieżnego wykonywania, różniących się sposobem wymiany informacji pomiędzy agentami oraz interakcjami pomiędzy tymi agentami, na złożoność obliczeń?
- Jaki jest stopień skalowalności algorytmu EMAS dla scenariusza opartego na synchronicznym i asynchronicznym modelu wykonywania?
- W artykule A3 eksperymenty przeprowadzono między innymi na przykładzie problemu zarządzania ruchem. Jaka jest funkcja celu dla tego problemu optymalizacyjnego? Czy problem ten należy do problemów NP-trudnych?

5. Ocena redakcji rozprawy

Tak jak na początku recenzji wspomniano, przedłożona rozprawa doktorska stanowi zbiór opublikowanych artykułów. Układ pracy, a właściwie ułożenie poszczególnych artykułów w strukturze pracy zostało poprzedzone wprowadzeniem, uzasadnieniem i podkreśleniem celu podejmowanych badań. Wyniki tych badań znalazły się w załączonych artykułach - stanowiących część właściwą rozprawy. Zaproponowany układ rozprawy został przemyślany, jest on przejrzysty i logiczny.

Strona edytorska rozprawy nie budzi uwag. Wątpliwości nie budzi również strona językowa.

Spis literatury stanowi składową poszczególnych artykułów. Niemniej jednak na końcu opracowania zawarto wykaz dodatkowej literatury. Jednak wykaz ten został sporządzony w sposób niejednorodny. Występują w nim powtórzenia wybranych pozycji (na przykład pozycje [8] i [20]).

6. Konkluzja

Przedstawiona rozprawa doktorska, jak wspomniałem w preambule recenzji, ma formę spójnego tematycznie zbioru artykułów, które zostały opublikowane w czasopiśmie naukowych określonych przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Podjęty przez Doktoranta problem jest aktualny badawczo, natomiast uzyskane wyniki stanowią oryginalne rozwiązanie problemu i stanowią wyraźny wkład merytoryczny do dyscypliny Informatyka.

Uważam zatem, że rozprawa doktorska pt. „*Concurrent Execution Models for Agent-Based Computing Systems*” autorstwa mgr inż. Daniela Krzywickiego spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim w myśl Ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 poz. 1789). Przedstawione

w recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny. W konsekwencji wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony, niemniej jednak wnioskuję również, aby podczas publicznej obrony Doktorant odniósł się do jego wkładu w powstanie poszczególnych artykułów, wskazując zakres tego udziału.

Jacek CARMONSKI