

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Mateusza Starzec
pt. „Ant Colony Optimization with Distributed Pheromones Matrix for Discrete Large-scale Optimization Problems”

1. Przedmiot recenzji i podstawa jej przygotowania

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Starzec pod tytułem „Ant Colony Optimization with Distributed Pheromones Matrix for Discrete Large-scale Optimization Problems” przygotowana na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Funkcję promotora pełni prof. dr hab. inż. Aleksander Byrski, natomiast promotora pomocniczego – dr inż. Kamil Piętaś.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi spójny tematycznie zbiór artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych:

1. [Starzec2019a] M. Starzec, G. Starzec, A. Byrski, W. Turek: Distributed ant colony optimization based on actor model. In: Parallel Computing, 2019 vol. 90 art. no. 102573, s. 1–9.
2. [Starzec2019b] M. Starzec, G. Starzec, A. Byrski, W. Turek, M. Kisiel-Dorohinicki: Distributed ant system for difficult transport problems. In: Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019 vol. 37 iss. 6, s. 7347–7356.
3. [Starzec2020a] M. Starzec, G. Starzec, A. Byrski, W. Turek, K. Pietaś: Desynchronization in distributed Ant Colony Optimization in HPC environment. In: Future Generation Computer Systems, 2020 vol. 109, s. 125–133.
4. [Starzec2020b] M. Starzec, G. Starzec, M. Paciorek: Desynchronization of simulation and optimization algorithms in HPC Environment. In: Computer Science 21(3) 2020: 307-322.

Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie pisma nr RD.ITiT.WIEiT.510-23/19/17/2021 z dnia 26.01.2021 r., które skierował do mnie Przewodniczący Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja – prof. dr hab. inż. Marek Kisiel-Dorohinicki.



2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa koncentruje się na zagadnieniu efektywnego wykorzystania algorytmów metaheurystycznych do rozwiązywania wybranych problemów obliczeniowo trudnych. W szczególności swoją uwagę skupia na algorytmach mrówkowych, stanowiących jedną z bardziej znanych i efektywnych grup metod, których skuteczność udowodniono przy rozwiązywaniu wielu problemów ze wspomnianej powyżej grupy, szczególnie tych, dających opisać się za pomocą grafu, np. szeroko rozumianych problemów z obszaru transportu i logistyki.

Podstawą sukcesu wykorzystania algorytmów mrówkowych jest ich zdolność do eksploracji przestrzeni rozwiązań za pomocą wielu niezależnych agentów (sztucznych mrówek), które w kolejnych iteracjach tworzą nowe propozycje rozwiązań. Wykorzystując zgromadzoną w czasie poszukiwania rozwiązania kolektywną wiedzę reprezentowaną w postaci mapy feromonowej, w kolejnych iteracjach są one w stanie wypracować coraz lepsze rozwiązania, poszukując ich w najbardziej obiecujących obszarach przestrzeni poszukiwań wykorzystując strategię umożliwiającą im poruszanie się w pewien ukierunkowany sposób.

Struktura i sposób organizacji algorytmów mrówkowych z jednej strony, a możliwości obliczeniowe nowoczesnych klastrów obliczeniowych lub środowisk HPC z drugiej strony, zachęcają do zrównoleglenia obliczeń prowadzonych przez te algorytmy przy wykorzystaniu wspomnianych wyżej środowisk. Potwierdzeniem tego są badania prowadzone w różnych ośrodkach naukowych w zakresie zrównoleglenia i rozproszenia obliczeń prowadzonych generalnie przez algorytmy metaheurystyczne, w tym mrówkowe. Prace prowadzone przez Doktoranta zaprezentowane w rozprawie doktorskiej wpisują się również w ten nurt badań, poprzez propozycje modyfikacji algorytmów mrówkowych, które, dzięki rozproszeniu i desynchronizacji dostępu do kolektywnej wiedzy w klastrach obliczeniowych/środowiskach HPC, byłyby zdolne do uzyskiwania rozwiązań co najmniej takiej samej jakości lub większej niż algorytmy sekwencyjne, jednocześnie zachowując wysoką skalowalność algorytmu.

Dobór tematu przez Doktoranta jest moim zdaniem trafny i został przez Niego właściwie uzasadniony. Stwierdzam też, że tematyka rozprawy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja, w szczególności w obszarach inteligencji obliczeniowej oraz obliczeń równoległych.

3. Konstrukcja rozprawy i jej zawartość

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim i liczy 110 stron. Praca została podzielona na dwie części, a układ pracy został zdeterminowany przez cztery publikacje, na których oparta została recenzowana rozprawa. I tak, w pierwszej części rozprawy (Rozdziały 1-5) został zamieszczony rozbudowany przegląd wspomnianych publikacji, w którym Doktorant opisuje motywacje i tło badań, przedstawia cele i ich realizację oraz prezentuje uzyskane rezultaty wraz ze stosowną dyskusją wyników. W drugiej części rozprawy natomiast (Rozdziały 6-9) zostały umieszczone opublikowane przez Doktoranta artykuły w ich oryginalnej postaci. Dodatkowo, na początku pracy przedstawiono, oprócz strony tytułowej i dedykacji, streszczenia w języku angielskim oraz polskim oraz spis treści. Na końcu pracy, natomiast, znajduje się: spis rysunków (19 pozycji), spis tabel (4 pozycje), bibliografia (44 pozycje) oraz krótki życiorys naukowy Autora.



Przyjęta konstrukcja rozprawy jest zasadniczo poprawna, tj. Doktorant przedstawiając do oceny rozprawę, na którą składa się zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, uzupełnia je o rozszerzone streszczenie. Konstrukcja taka może stanowić pewne wyzwanie zarówno dla Autora, jak również Recenzenta. Z punktu widzenia Recenzenta, dostrzegając pewne mankamenty w prowadzonych przez Autora badaniach lub uzyskanych wynikach, trzeba przyjąć, że zostały one już opublikowane, a więc zostały już zrecenzowane przez co najmniej kilku recenzentów czasopism. Z punktu widzenia Autora, z jednej strony, streszczenie nie musi, a nawet czasami nie powinno, odzwierciedlać struktury poszczególnych artykułów naukowych, poddawanych ocenie. Z drugiej strony, wprowadzając streszczenie, nie sposób nie uniknąć pewnych powtórzeń występujących w opublikowanych artykułach. Jednakże biorąc pod uwagę powyższe, myślę, że Doktorant dosyć umiejętnie powiązał rozszerzone streszczenie z treściami prezentowanymi w poszczególnych artykułach, będących podstawą prezentowanej rozprawy doktorskiej, właściwie rozkładając akcenty.

Część pierwsza rozprawy obejmuje pięć rozdziałów.

Rozdział 1 rozprawy jest faktycznie wprowadzeniem w tematykę podejmowaną przez Doktoranta. Zawiera krótką charakterystykę algorytmów metaheurystycznych, w szczególności opartych na ewolucji populacji, podkreślając ich uniwersalny charakter, jak również wskazując na ich powszechne i skuteczne wykorzystanie do rozwiązania wybranych problemów obliczeniowo trudnych. Przedstawia również motywację podjętych badań, w której podkreśla znaczenie skalowalności, która może być ograniczona przy rozwiązywaniu rzeczywistych problemów z wykorzystaniem tej grupy algorytmów, w szczególności skupiając się na algorytmach mrówkowych. W rozdziale tym Doktorant przedstawia hipotezę, którą postawił do weryfikacji, jak również metodologię badań. Przedstawia również strukturę pozostałej części rozprawy.

Rozdział 2 generalnie poświęcony jest przedstawieniu autorskich propozycji Doktoranta dotyczących modyfikacji wprowadzonych do standardowych algorytmów mrówkowych. Rozpoczyna się przeglądem najnowszych osiągnięć w zakresie wykorzystania środowisk HPC do uruchamiania algorytmów mrówkowych. Następnie, mając na względzie dążenie do uzyskania wysokiej skalowalności algorytmów oraz efektywnego wykorzystania zasobów, np. środowisk HPC, wykorzystuje model współbieżności aktora do opisu architektury systemu rozproszonego z uwypukleniem komunikacji między aktorami, wprowadza i omawia koncepcje rozproszonej macierzy feromonowej oraz zdesynchronizowanego dostępu do niej.

Rozdział 3 przedstawia najważniejsze uzyskane wyniki w rezultacie przeprowadzonych wszystkich eksperymentów obliczeniowych, zarówno w zakresie skalowalności, jak również jakości uzyskanych rozwiązań. Rozdział zawiera też wnioski wyciągnięte przez Doktoranta z tych eksperymentów.

Rozdział 4 nakreśla możliwości zastosowania koncepcji desynchronizacji do innych algorytmów, jak Particle Swarm Optimization i Social Cognitive Optimization – algorytmów wykorzystujących do poszukiwania rozwiązania zbiór niezależnych agentów oraz globalną wiedzę. Innym obszarem potencjalnego wykorzystania koncepcji desynchronizacji wskazanym przez Doktoranta jest symulacja oparta na agentach, co prezentuje na przykładzie gry w życie Johna Hortona Convaya.

Rozdział 5 obejmuje podsumowanie badań przeprowadzonych przez Doktoranta zaprezentowanych w rozprawie oraz argumentację przemawiającą za pozytywną weryfikacją postawionej hipotezy.

W drugiej części rozprawy, w Rozdziałach 6-9 przedstawione zostały w oryginalnej postaci opublikowane artykuły naukowe wchodzące w skład recenzowanej rozprawy doktorskiej ([Starzec2019a], [Starzec2019b], [Starzec2020a], [Starzec2020b]).

Podsumowując tę część recenzji, uważam, że rozprawa mgr. inż. Mateusza Starzec jest napisana generalnie poprawnie pod względem formalnym, zgodnie z wymaganiami stawianymi rozprawom doktorskim. Konstrukcja rozprawy, jej struktura i zawartość poszczególnych rozdziałów stanowią dosyć spójną całość a wywód jest prowadzony w sposób logiczny, oczywiście uwzględniając przyjętą formę rozprawy.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Punktem wyjścia dla badań Doktoranta prezentowanych w rozprawie było dostrzeżenie iż algorytmy oparte na ewolucji populacji w naturalny sposób są predystynowane do implementacji na platformach równoległych. Przykładowo, takim podejściem może być podział populacji na subpopulacje a następnie uruchomienie ich na osobnych węzłach klastra, z jednoczesną wymianą określonych informacji pomiędzy populacjami. Skupiając się na samych algorytmach mrówkowych bazujących na kolonii agentów – sztucznych mrówek, również nietrudno dostrzec, iż praca, którą taka kolonia wykonuje w celu poszukiwania rozwiązania również można zrównoleglic stosując różne strategie.

Fundamentalną cechą algorytmów mrówkowych jest zdolność niezależnych agentów-mrówek do sukcesywnego budowania tymczasowych rozwiązań instancji problemu i jednocześnie budowania globalnej wiedzy w postaci pozostawiania i aktualizacji śladu feromonowego gromadzonego w macierzy feromonowej, dostępnej w kolejnych iteracjach dla wszystkich agentów-mrówek. Jak słusznie zauważa Doktorant, z punktu widzenia konstrukcji wydajnych implementacji algorytmów mrówkowych na dużych klastrach lub środowiskach HPC, wyzwaniem może być fakt, iż agenty-mrówki potrzebują regularnego dostępu do macierzy feromonowej, zarówno w zakresie wykonania operacji odczytu, jak również zapisu. Zwykle pierwsza z tych operacji wykonywana jest w każdym kroku konstrukcji rozwiązania, natomiast druga – w każdej iteracji.

Powyższej zarysowane ogólnie rozważania doprowadziły Doktoranta do sformułowania hipotezy, która brzmi: *„Wprowadzenie rozproszonej macierzy feromonowej do algorytmu mrówkowego umożliwi skalowalne rozproszenie obliczeń w ramach klastra lub środowiska superkomputerowego, pozwalając na poprawienie jakości uzyskanych wyników w porównaniu do wyników uzyskiwanych z wykorzystaniem referencyjnych algorytmów sekwencyjnych.”* Hipoteza ta, moim zdaniem, została postawiona poprawnie.

Z uwagi na fakt, iż główny punkt ciężkości w swoich badaniach Doktorant położył na możliwość uzyskania skalowalnych algorytmów przeznaczonych do rozwiązywania rzeczywistych algorytmów optymalizacyjnych, gdzie czas obliczeń jest równie ważny, jak jakość uzyskiwanego rozwiązania, w przypadku algorytmów mrówkowych dostęp do dzielonej globalnej wiedzy może ograniczać taką skalowalność na dużych klastrach lub środowiskach HPC. Stąd dostrzegając powyższe ograniczenia, Doktorant w swoich badaniach dążył do

zapropowania skutecznego, wydajnego i skalowalnego podejścia do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych z wykorzystaniem algorytmów mrówkowych. W trakcie prowadzonych prac, swoje koncepcje modyfikacji standardowych algorytmów mrówkowych stopniowo rozbudowywał, skupiając uwagę głównie na rozproszeniu macierzy feromonowej w ramach klastra lub środowiska HPC oraz desynchronizacji dostępu do niej.

Jednym z pierwszych kroków w kierunku konstrukcji/modyfikacji algorytmu mrówkowego było dostrzeżenie możliwości, a następnie ciekawe wykorzystanie modelu aktora do konstrukcji swojego systemu. W tym celu wykorzystał język Scala oraz zbiór bibliotek Akka. W systemie tym wyróżnił kilka rodzajów aktorów, odpowiedzialnych m.in. zarządzanie globalnym procesem obliczeń (*Computation Master*), za zarządzanie innymi aktorami i procesem obliczeń w ramach jednego węzła (*Computation Local*), zarządzanie macierzą feromonową (*Pheromone Manager*), zarządzanie cyklem życia agenta-mrówki (*Ant Manager*), czy też za iteracyjne konstruowanie tymczasowych rozwiązań (*Ant*).

W zaproponowanym systemie, komunikacja wewnątrz każdego węzła koncentruje się głównie (poza inicjalizacją i gromadzeniem danych do wyznaczenia wartości pewnych wskaźników) na przekazywaniu możliwych dopuszczalnych do wykonania ruchów przez agenta mrówkę oraz aktualizacji śladu feromonowego i przebiega pomiędzy aktorami *Problem Description Manager* <-> *Ant* oraz *Pheromone Manager* <-> *Ant*, natomiast komunikacja między węzłami ma miejsce wyłącznie pomiędzy agentami *Pheromone Manager* umieszczonych na osobnych węzłach, wymieniającymi się danymi dotyczącymi śladów feromonowych wyznaczonych w poszczególnych węzłach.

Dążąc do wyeliminowania ograniczenia architektury *master-slave*, pozwalającej na równoleglenie obliczeń agentów konstruujących rozwiązanie dopuszczalne, gdzie w poszczególnych węzłach znajdują się kolonie mrówek konstruujące tymczasowe rozwiązania, a dodatkowo w węźle *master* przechowywana jest macierz feromonowa, która musi być przekazana do wszystkich innych węzłów, w zaproponowanym przez siebie modelu Doktorant zakłada, że macierz feromonowa może być rozproszona na inne węzły. W tym względzie proponuje On oryginalny sposób rozproszenia takiej macierzy pomiędzy węzły, polegający na tym, że macierz jest dzielona na części, które następnie dystrybuowane są równomiernie pomiędzy węzły. Tym samym, pojedynczy punkt dostarczający wszystkie dane z takiej macierzy jest eliminowany na korzyść zdecentralizowanych operacji odczytu i aktualizacji na końcu każdej iteracji.

Chociaż rezultaty otrzymane dla wersji algorytmu z rozproszoną macierzą feromonową były obiecujące, Doktorant dostrzegł cały czas problem związany z koniecznością synchronizacji danych gromadzonych przez poszczególnych agentów w różnych węzłach na koniec każdej iteracji, jednocześnie upatrując szans na poprawienie wyników poprzez wprowadzenie mechanizmu desynchronizacji w dostępie do rozproszonej macierzy feromonowej. Jego autorski, oryginalny pomysł zakłada, że gdy dowolny agent mrówka (*Ant*) zakończy konstrukcję swojego rozwiązania w pewnej iteracji, w przeciwieństwie do wersji z globalnym punktem synchronizacji, niezwłocznie rozpoczyna konstruowanie kolejnego rozwiązania, wykorzystując dotychczasowe wartości z macierzy feromonowej. Taki zabieg, w zamysle Doktoranta, miał wyeliminować czas "bezczynności" agentów-mrówek oczekujących na rezultat zakończenia obliczeń przez pozostałych agentów.

Warto w tym miejscu podkreślić, iż kolejne kroki czynione przez Doktoranta w kierunku proponowania kolejnych ulepszeń w swoich podejściach często wynikały z obserwacji

zachowania aktualnej wersji oraz wyników eksperymentów obliczeniowych, które przeprowadzał w celu oceny zaproponowanych przez Siebie propozycji modyfikacji algorytmów mrówkowych. Przeprowadzone eksperymenty miały dostarczyć argumentów za pozytywną weryfikacją postawionej hipotezy.

Generalnie eksperymenty obliczeniowe skupiały się na dwóch aspektach. Pierwszy z nich dotyczył określenia skalowalności zaproponowanych algorytmów, natomiast drugi – ich skuteczności w rozwiązywaniu problemów optymalizacyjnych, mierzonej jakością uzyskiwanych rozwiązań. Moim zdaniem, eksperymenty zostały przeprowadzone prawidłowo, zarówno w zakresie postawionych celów, jak również samej realizacji, chociaż drobne zastrzeżenia w tym zakresie zgłaszam w części „Uwagi i pytania dotyczące recenzowanej rozprawy”.

Większość eksperymentów została przeprowadzona na wybranych instancjach problemu TSP z biblioteki TSPLIB, czyli problemu dla rozwiązania którego skonstruowano pierwszy algorytm mrówkowy. Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły Doktorantowi uzyskać kilka interesujących wyników, zarówno dotyczących skalowalności, jak również jakości uzyskiwanych rozwiązań.

Jeden z pierwszych eksperymentów dotyczący skalowalności został przeprowadzony na czterech instancjach problemu TSP o rozmiarach od 666 do 3038 miast (instancje: *gr666*, *u1432*, *pr2392*, *pcb3038*) i miał pokazać wpływ rozmiaru problemu na skalowalność algorytmu z rozproszoną macierzą feromonową. O ile dla niewielkiej liczby węzłów (do 5) wszystkie instancje zachowywały podobną liniową zależność, o tyle dla większej liczby węzłów taka tendencja utrzymywała się tylko dla problemów o większym rozmiarze, przy czym, jak pokazał eksperyment, zależność taka była obserwowana do 30 węzłów.

Interesująco wypadło również porównanie algorytmu mrówkowego z rozproszoną macierzą feromonową z algorytmem z dodatkowo zdesynchronizowanym dostępem do niej w zakresie skalowalności, które przeprowadzono na instancji TSP o rozmiarze 2392 (instancja *pr2392*). Porównanie wartości przyśpieszenia dla obu wersji algorytmu pokazało, iż obie wersje zachowują liniową skalowalność do 50 węzłów. Koncentrując się na obliczeniach z wykorzystaniem większej liczby węzłów (od 100 do 400), algorytm mrówkowy z rozproszoną macierzą feromonową z dodatkowo zdesynchronizowanym dostępem do niej, jak pokazały wyniki eksperymentu, wykazuje stopniowy spadek wartości przyśpieszenia, jednakże zachowując niezłą ok. 75% wydajność.

Druga grupa eksperymentów dotyczyła jakości uzyskiwanych rozwiązań.

Pierwszy eksperyment: porównanie klasycznego algorytmu sekwencyjnego (jak rozumiem MMAS?) z algorytmem mrówkowym z rozproszoną mapą feromonową. Eksperyment przeprowadzono na instancji o niewielkim rozmiarze (*pr152*) przy liczbie agentów-mrówek równej 500 i dwóch węzłach. Uzyskane wyniki wykazały podobne zachowanie obu algorytmów w zakresie jakości uzyskanych rezultatów. Niestety, nie dostrzegam tutaj istotnej wartości dodanej wynikającej z eksperymentu i uzyskanych wyników.

Zdecydowanie ciekawszym, moim zdaniem, był kolejny eksperyment, który koncentrował się na określeniu jakości uzyskiwanych rozwiązań przez obie wersje algorytmu (z rozproszoną macierzą feromonową oraz z dodatkowo zdesynchronizowanym dostępem do niej) oraz tempa dochodzenia do najlepszego rozwiązania dla różnych wielkości populacji kolonii mrówek.

Eksperyment przeprowadzony został na instancji *pr2392*, gdzie zakładana liczba agentów-mrówek wynosiła od 25 do 2500 dla wersji rozproszonej oraz od 25 do 10000 dla wersji zdesynchronizowanej. Analiza wyników pokazała, że w przypadku obu wersji algorytmu uzyskiwane rezultaty były uzależnione od liczby agentów-mrówek wykorzystanych w eksperymencie, im większa kolonia mrówek tym lepsze uzyskiwane rezultaty. Niestety, nie jest dla mnie do końca jasne, dlaczego w przypadku wersji pierwszej nie uruchomiono również algorytmu dla 10000 mrówek (podobnie jak dla wersji drugiej), jak również nie przeprowadzono eksperymentu dla większej liczby iteracji (200 zamiast 100, jak zrobiono to dla wersji drugiej) – por. Rys. 3.4 oraz 3.5.

Doktorant również przeprowadził eksperyment, w którym porównał uzyskane wyniki dla zaproponowanego algorytmu mrówkowego w wersji rozproszonej i zdesynchronizowanej z wynikami sekwencyjnego algorytmu MMAS. Podobnie jak poprzednio, eksperyment przeprowadzono na instancji *pr2392*, wykazując możliwość poprawienia rezultatów uzyskiwanych przez algorytm sekwencyjny poprzez zastosowanie zaproponowanej przez Doktoranta koncepcji rozproszenia macierzy feromonowej i desynchronizacji dostępu do niej, z jednoczesnym wykorzystaniem większej populacji agentów-mrówek. Pozwalając sobie na dygresję w tym miejscu, wydaje mi się, iż Tabela 3.3 jest chyba jedynym miejscem, gdzie Doktorant publikuje wartość optymalną dla badanej w eksperymencie instancji TSP. Uznając, iż owszem, zarówno wersja rozproszona, jak zdesynchronizowana przewyższają algorytm MMAS pod względem jakości uzyskiwanych wyników, jednakże dzięki znajomości wartości optymalnej, możemy dodatkowo stwierdzić, iż wszystkie badane algorytmy w podanych konfiguracjach, uzyskują wyniki jednak istotnie gorsze niż rozwiązanie optymalne.

Wreszcie, jako ostatni eksperyment, do którego chciałbym się odnieść, był, w przeciwieństwie do wcześniejszych, wykonany na dużych instancjach TSP, tj. oprócz *pr2392*, również na *usa13509*, *pla33810* oraz *pla85900*, także pochodzących z biblioteki TSPLIB. Dodatkowo, również w przeciwieństwie do wcześniejszych eksperymentów, wykorzystano w nim dedykowane elementy dla TSP jak np. operator *2-opt*. Uzyskane przez Doktoranta wyniki były zdecydowanie bliższe optimum, niż w poprzednich przypadkach. Niestety, nie jest dla mnie jasne, której wersji algorytmu (rozproszonej czy też dodatkowo zdesynchronizowanej) użyto w eksperymencie.

Zanim przejdę do podsumowania tej części, chciałby krótko tylko wspomnieć o interesującej, wskazanej przez Doktoranta, możliwości zastosowania koncepcji desynchronizacji do innych algorytmów opartych na ewolucji populacji lub symulacji. Ten fragment traktuję jako zapowiedź możliwych kierunków przyszłych Jego, ale być może również innych, prac badawczych.

W podsumowaniu tej części stwierdzam, iż temat podjęty przez Doktoranta jest interesujący i ważny w kontekście projektowania skutecznych i wydajnych algorytmów do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych, a sam Doktorant w przemyślany sposób podszedł do rozwiązania postawionego problemu badawczego. Do najważniejszych Jego osiągnięć zaprezentowanych w rozprawie zaliczyłbym:

- Twórcze wykorzystanie modelu aktora do modelowania algorytmu mrówkowego z wykorzystaniem języka Scala i zbioru bibliotek Akka.
- Wprowadzenie koncepcji rozproszonej macierzy feromonowej, prowadzącej do równomiernego rozłożenia pracy związanej z aktualizacjami śladów feromonowych między węzłami obliczeniowymi,

- Wprowadzenie koncepcji zdesynchronizowanego dostępu do macierzy feromonowej, pozwalającego na eliminację globalnego punktu synchronizacji przy aktualizacji śladu feromonowego,
- Eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanych rozwiązań pozwalającej na potwierdzenie uzyskania wysokiej skalowalności zaproponowanych algorytmów, jak również możliwości uzyskiwania konkurencyjnych rozwiązań w stosunku do wersji sekwencyjnej algorytmu MMAS,
- Propozycje interesujących rozszerzeń opracowanego podejścia i możliwości wykorzystania zaproponowanych podejść do innych algorytmów opartych na ewolucji populacji oraz symulacji.

Moim zdaniem, przedstawione osiągnięcia w pełni uzasadniają stwierdzenie, iż postawiona hipoteza badawcza została zweryfikowana pozytywnie.

Odnosząc się jeszcze krótko do miejsc publikacji artykułów naukowych składających się na recenzowaną rozprawę, warto podkreślić, iż artykuły te zostały opublikowane w czasopiśmie naukowych, w większości wysokopunktowanych, które wg aktualnej punktacji MNiSW/MEiN mają przypisane 140 pkt. (*Future Generation Computer Systems*), 70 pkt. (*Parallel Computing* oraz *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*) oraz 20 pkt. (*Computer Science*). Wszystkie prace są wieloautorskie (w tym we współautorstwie z promotorem), przy czym we wszystkich artykułach Doktorant występuje jako pierwszy Autor, a jednocześnie na początku każdego z rozdziałów 6-9, Doktorant wskazuje, na czym polegał Jego wkład w powstanie każdego artykułu.

5. Uwagi i pytania dotyczące recenzowanej rozprawy

Jak można wywnioskować z dotychczasowego tekstu recenzji, generalnie poziom merytoryczny rozprawy, jej konstrukcję, sposób prowadzenia wywodu i przytaczaną argumentację oceniam pozytywnie. Poniżej przedstawiam kilka uwag o charakterze dyskusyjnym, pytania dotyczące wybranych zagadnień prezentowanych w rozprawie, jak również dostrzeżone uchybienia.

1. O ile większość tekstu w części pierwszej odnosi się do jednego z wymienionych już czterech artykułów naukowych Doktoranta, co skutkuje tym, iż w tej części przedstawia On tylko syntetyczne streszczenie prac i uzyskanych wyników, o tyle, jak rozumiem, podrozdział 3.3 stanowi nowy fragment, jeszcze niepublikowany. W takiej sytuacji spodziewałbym się jednak nieco rozwiniętej tej części pracy.
2. Zwykle przy wykonywaniu rysunków, diagramów, czy też schematów występuje problem wyboru notacji, w której należałoby je wykonać. Jedną z takich notacji jest UML. Przyglądając się rys. 2.6 oraz 2.8 zamieszczonym w rozprawie, mógłbym domniemywać, że rysunki te w istocie bazowały na tej notacji. W przypadku rys. 2.8 miałibyśmy do czynienia pewno z diagramem sekwencji UML, natomiast, przyznaję, trudno mi przypisać jakiś rodzaj diagramu UML do rys. 2.6. Zdecydowana większość symboli wskazywałaby na diagram przypadków użycia, aczkolwiek logicznie nie byłoby to poprawne, wszak wskazani aktorzy nie mogliby zostać przypisani do symbolu odpowiadającemu w istocie przypadkom użycia UML.
3. W wzorze (2.8) na str. 25 występuje *MatrixSize*. Niestety, nie znalazłem jego objaśnienia w jaki sposób jest ono wyznaczane.

4. Podobnie, na str. 25 w tekście następuje odwołanie do *Least Recently Used*, którego objaśnienia również nie znalazłem w tekście.
5. Pomimo opisu w artykule [Starzec2019b], jak również w rozprawie na str. 25 sposobu podziału macierzy feromonowej na części przekazywane do poszczególnych węzłów, niestety, jest on dla mnie dalej niejasny. Proszę o przybliżenie.
6. Na Rys. 2.6 występuje niezgodność nazw niektórych agentów z opisem np. na rysunku: *Ants Manager* czy też *Pheromones Manager*, natomiast w tekście: *Ant Manager* i *Pheromone Manager*, odpowiednio.
7. Jakie jest uzasadnienie wyboru do eksperymentów wersji algorytmu MMAS, a nie np. EAS lub ASRank?
8. Przyznaję, iż nie do końca przekonująca jest dla mnie argumentacja na str. 36 dotycząca eksperymentu i wyników prezentowanych na Rys. 3.4 i 3.5 uzasadniająca różną max. liczbę przyjętych iteracji (Rys. 3.4 – 100 oraz Rys. 3.5 – 200). Powyższe dotyczy też przyjętej różnej liczby agentów zaangażowanych w proces obliczeń (Rys. 3.4 – 2500 oraz Rys. 3.5 – 10000).
9. W eksperymencie opisanym w podrozdziale 3.3 nie jest dla mnie jasne, której wersji algorytmu (z rozproszoną macierzą feromonową czy też wersję z dodatkowo zdesynchronizowanym dostępem do niej) użyto w tym eksperymencie.
10. Przeprowadzając eksperymenty obliczeniowe, Doktorant przy różnych eksperymentach używał różnych wartości krotności powtórzeń uruchomienia algorytmów. Przykładowo: str. 32, 33, 39 – 5 powtórzeń, str. 34, 38 – 10 powtórzeń, str. 35 – 20 powtórzeń. Jaki był powód takiego podejścia? Dodatkowo, w niektórych eksperymentach, krotność powtórzeń była bardzo niska, np. 5, co może uniemożliwiać wiarygodną ocenę uzyskanych rezultatów.
11. Przeprowadzając eksperymenty obliczeniowe, częstą praktyką też jest wykonanie testów statystycznych w celu analizy uzyskanych wyników, np. po to, aby udowodnić, iż pewne wyniki różnią się od innych w sposób znaczący. U doktoranta w rozprawie oraz w artykułach nie dostrzegłem takiej analizy, a jednocześnie w kilku miejscach występują sformułowania typu „significantly outperformed” (str. 34), „significantly different” (str. 44), czy też podobne. Czy są one w pełni uzasadnione?
12. Niejasny jest dla mnie sposób doboru instancji problemu TSP z biblioteki TSPLIB do testowania zaproponowanych przez Doktoranta algorytmów. Odnosząc się do wykresów prezentujących wyniki badań, można przykładowo wskazać: Rys. 3.1 – *gr666, u1432, pr2392, pcb3038*, Rys. 3.2 – *u1432, pr2392*, Rys. 3.3 – *pr152*, Rys. 3.4 i 3.5 – *pr2392*, na których za każdym razem mamy inny zestaw testowanych instancji. Dlaczego akurat te zdecydował się Doktorant wykorzystać? Czy charakteryzują się one specyficznymi właściwościami, które pozwoliłyby nam na szczególne obserwacje lub uogólnienia wyniku? Jedyne argumenty, które widzę i który przemawiałby za ich przyjęciem to to, iż mają różny rozmiar. Biblioteka ta, nawiasem mówiąc, najbardziej popularna dla TSP, zawiera ponad 100 instancji testowych w części dotyczącej symetrycznego TSP. Ale co również ważne, instancje te mają różne właściwości, które, niewykluczone, mogłyby wpływać na jakość uzyskiwanych rozwiązań czy też badane właściwości algorytmów.
13. W różnych miejscach części pierwszej rozprawy, ale również w artykułach opublikowanych, Doktorant, z niewielkimi wyjątkami, nie podaje znanych najlepszych/optimalnych rozwiązań wykorzystywanych do eksperymentów instancji TSP. Odnosząc się w rozprawie do miar jakości uzyskiwanych rozwiązań z wykorzystaniem koncepcji przez Niego zaproponowanych, wydaje się, iż pozwalałyby one nabrać wyobrażenia, jak blisko/daleko nasze rozwiązania znajdują się od optimum. Nieco inaczej sytuacja wygląda w przypadku instancji VRPTW, dla których, z kolei, Doktorant podaje takie wartości.

14. Drobna uwaga do tabel: Przyjęło się, iż podpisy tabel powinny być nad tabelą, a nie pod, jak przedstawiono to w tekście rozprawy (por. tabele 3.1, 3.2, 3.3, 3.4). Nadmieniam, iż w opublikowanych artykułach jest poprawnie.
15. Uwagi do bibliografii:
- a) Dane bibliograficzne niektórych pozycji są niepełne, przykładowo:
 - i. [32], [34], [35] – brak numerów stron, chociaż są to artykuły Doktoranta omawiane w rozprawie i w innym miejscu pracy takie numery są poprawnie podane,
 - ii. [19] – brak pełnego tytułu materiałów konferencyjnych lub pełnej nazwy konferencji,
 - iii. [28] – brak pełnych danych wydawniczych, np. edytorów.
 - b) O ile powyższe uwagi dotyczą pozycji literatury w wykazie umieszczonym na str. 105-108 rozprawy, o tyle pewną niespójność zapisów można również dostrzec w artykułach już opublikowanych, np. w artykule [Starzec2020a] niespójnie używane są zapisy dotyczące autorów: w niektórych przypadkach poszczególne pozycje literatury mają podane zarówno pełne imiona oraz nazwiska autorów (np. [3], [4], [5], [8], [10], ...), natomiast w niektórych – tylko inicjały imion oraz nazwiska (np. [1], [2], [6], ...). Oczywiście, wskazany tu brak spójności zapisu obciąża nie tylko Doktoranta, ale również do pewnego stopnia edytorów z Elsevier.
16. I na koniec, patrząc na całokształt dokonań Doktoranta, które doprowadziły Go do złożenia rozprawy doktorskiej, chętnie usłyszałbym od Niego kilka refleksji związanych z przeprowadzonymi badaniami i uzyskanymi wynikami o charakterze bardziej ogólnym, np.:
- a) Czy jakieś wyniki przeprowadzonych badań zaskoczyły Doktoranta, zarówno w sensie pozytywnym, jak również negatywnym?
 - b) Jakie elementy sprawiły Jemu największą trudność?
 - c) Jakie bariery i ograniczenia napotkał w swoich badaniach?

6. Podsumowanie

Podsumowując, rozprawę doktorską mgr. inż. Mateusza Starzec oceniam pozytywnie. W świetle art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, poz. 595 z późn. zm.), rozprawa spełnia, moim zdaniem, wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Prezentuje ona zarówno ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w zakresie metod, algorytmów i narzędzi stosowanych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, jak również umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Problem naukowy, który Doktorant postawił sobie, został przez Niego rozwiązany w sposób oryginalny. Przedstawione powyżej uwagi oraz dostrzeżone uchybienia nie umniejszają wartości całej pracy. Wnoszę zatem o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

