

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Wojciecha Korczyńskiego  
**pt. „Agent-based memetic computing in continuous optimization”**

**Podstawa przygotowania recenzji**

Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie pisma nr IEiT.510-17/15/20/2017 z dnia 17 marca 2017 r., skierowanego przez Prodziekana ds. Nauki Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH w Krakowie – dr hab. inż. Krzysztofa Winczę, prof. nadzw AGH.

**Ogólna charakterystyka rozprawy**

Recenzowana rozprawa koncentruje się na zagadnieniach obliczeń z wykorzystaniem metod opartych na ewolucji populacji do rozwiązywania wybranych trudnych problemów optymalizacyjnych o charakterze ciągłym. W szczególności, przedmiotem zainteresowania Autora są algorytmy memetyczne, zwane również hybrydowymi algorytmami ewolucyjnymi, oparte na paradygmacie agentowym. Rozprawa wpisuje się zarówno w obszar inteligencji obliczeniowej, w tym obliczeń ewolucyjnych, jak również systemów wieloagentowych.

Autor, dostrzegając duży potencjał powyższych metod, wyrażający się skutecznością rozwiązywania określonych zagadnień za ich pomocą, dostrzega też ich poważne ograniczenia, związane zwykle z wymaganiami dużych nakładów obliczeniowych podczas poszukiwania rozwiązania problemu. Stąd celem jego badań było zaproponowanie oraz ocena nowych algorytmów memetycznych opartych na paradygmacie agentowym, w których zastosowanie dedykowanych operatorów przeszukiwania lokalnego może przyczynić się do poprawy wydajności tych algorytmów (w porównaniu do ewolucyjnych systemów wieloagentowych i klasycznych algorytmów ewolucyjnych), umożliwiając uzyskanie lepszych wyników w krótszym czasie.

Podjęcie badań mających na celu zaproponowanie i zbadanie nowej klasy algorytmów metaheurystycznych uważam za celowe i trafne, bowiem obszar algorytmów opartych na ewolucji populacji, chociaż dobrze ugruntowany wieloma implementacjami nakreślonymi już wiele lat temu, w dalszym ciągu stanowi intensywne pole prac badawczych prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych. Jest to wynikiem ciągłego, nieustannego wykorzystywania

tych algorytmów w wielu dziedzinach, jak również przekonaniem, że mogą one (często w połączeniu z innymi metodami) ciągle stanowić skuteczne i wydajne narzędzie rozwiązywania trudnych problemów optymalizacji. Rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Korczyńskiego wpisuje się w nurt tych prac, stanowiąc, moim zdaniem, ich ważne uzupełnienie.

Praca jest napisana poprawnie pod względem formalnym, zgodnie z wymaganiami stawianymi rozprawom doktorskim. Generalnie wywód prowadzony jest w sposób przejrzysty, spójny i uporządkowany, dążący do pokazania osiągnięcia postawionego celu. Praca jest napisana również poprawnie pod względem językowym. Na uwagę zasługuje wysoki poziom edytorski pracy.

## **Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa napisana jest w języku angielskim, obejmuje 157 stron i składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów, podsumowania, spisu rysunków, spisu tabel, bibliografii oraz podsumowania aktywności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej Autora.

W rozdziale 1 Autor dokonuje wprowadzenia do koncepcji przeszukiwania i rozwiązywania obliczeniowo trudnych problemów optymalizacyjnych, do rozwiązania których, naturalną grupę stosowanych metod stanowią metody heurystyczne. W szczególności Autor koncentruje się na metaheurystykach opartych na ewolucji populacji, uwypuklając źródło ich powstania oraz podstawowe cechy, a także przywołując ogólny algorytm wraz z zestawem operatorów wykorzystywanych w ramach tego algorytmu. Pod koniec rozdziału Autor skupia swój wywód na możliwych podejściach hybrydowych łączących wykorzystanie metaheurystyk z innymi znanymi metodami przeszukiwania. Jedno z takich podejść stanowią algorytmy memetyczne, w których algorytmy ewolucyjne wykorzystują metody lokalnego przeszukiwania, zwiększając możliwości bardziej skutecznego poszukiwania rozwiązania określonego problemu.

Rozdział 2 koncentruje się na wykorzystaniu metaheurystyk ewolucyjnych opartych na paradygmacie agentowym. Podstawową przesłanką wykorzystania przez Autora koncepcji agentowości była możliwość uzyskania zadowalających rozwiązań określonych problemów przy wykorzystaniu mniejszych nakładów obliczeniowych. W rozdziale tym Autor prezentuje wieloagentowy system ewolucyjny (EMAS), zaprojektowany przez zespół naukowców z AGH, którego większa skuteczność w rozwiązywaniu obliczeniowo trudnych problemów, w porównaniu do klasycznych metaheurystyk opartych na ewolucji populacji, została wcześniej wykazana w wielu pracach. Ważną częścią tego rozdziału stanowi zaprezentowanie możliwości połączenia wspomnianego EMAS z algorytmami memetycznymi przy wykorzystaniu lokalnego przeszukiwania w trakcie reprodukcji lub w dowolnym momencie czasu życia agenta.

W rozdziale 3 Autor nawiązuje do jednego z podstawowych problemów związanych z wykorzystaniem metaheurystyk, dotyczącego dużego nakładu obliczeń, niezbędnego do uzyskania zadowalającego rozwiązania określonego problemu w rozsądnym czasie. W wielu przypadkach klasycznego wykorzystania metaheurystyk, ich wydajność może być niezadowalająca, stąd działania zmierzające do jej zwiększenia są zwykle pożądane i stosunkowo często spotykane przy projektowaniu nowych algorytmów należących do tej grupy. W pierwszej części tego rozdziału przedstawiony jest równoległy algorytm ewolucyjny



wraz z różnymi modelami zrównoleglenia obliczeń ewolucyjnych. Autor dokonuje też przeglądu popularnych architektur odpowiednich do wykorzystania w przypadku algorytmów wymagających dużych nakładów obliczeniowych. Istotną część tego rozdziału stanowi też pokazanie przez Autora, w jaki sposób możliwe jest przyspieszenie działania hybrydowych algorytmów ewolucyjnych przez wykorzystanie GPGPU oraz FPGA. Wreszcie w ostatnim podrozdziale tego rozdziału, Autor proponuje technikę buforowania funkcji przystosowania, pozwalającą na zmniejszenie liczby wykonywanych operacji ewolucyjnych, uzupełnioną o pokazanie, jak technika ta pozwala zredukować złożoność algorytmów memetycznych.

Rozdział 4 poświęcony jest agentowej platformie obliczeniowej PyAgE, opracowanej również na AGH, którą Autor na początku rozdziału krótko scharakteryzował (jednocześnie odsyłając do pozycji literatury, w której zawarto bardziej dokładny opis), a następnie zaprezentował sposoby implementacji na niej: algorytmów opartych na ewolucji populacji, algorytmów opartych na paradygmacie agentowym, wreszcie algorytmów memetycznych. W rozdziale tym zaprezentowano również realizację zaproponowanej techniki buforowania, jak również wspomniano o możliwościach implementacji zrównoleglenia obliczeń oraz hybrydyzacji z GPGPU oraz FPGA w ramach platformy PyAgE

Wreszcie rozdział 5 koncentruje się na części eksperymentalnej. Zaprezentowano w nim założenia oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych, pozwalających na dokonanie oceny zaproponowanych przez Autora rozwiązań. Dodatkowo zaprezentowano wyniki eksperymentów, których celem było wykazanie, w jaki sposób wybrane parametry algorytmów memetycznych wpływają na proces poszukiwania rozwiązania i uzyskiwane wyniki. Eksperymenty przeprowadzono z wykorzystaniem czterech wielowymiarowych funkcji (Rastrigin, Ackley, Schwefel oraz De Jong), dla których poszukiwano globalnego minimum. Uzyskane rezultaty poddano szczegółowej analizie, w tym z wykorzystaniem analizy statystycznej. Warty odnotowania jest również to, iż chociaż punkt ciężkości w tym rozdziale położono na eksperymenty przeprowadzone na wspomnianych wyżej czterech funkcjach benchmarkowych, w ostatnim podrozdziale pokazano również możliwość efektywnego wykorzystania algorytmów memetycznych opartych na paradygmacie agentowym do rozwiązania rzeczywistego problemu inżynierskiego.

Pracę kończy podsumowanie, w którym Autor zawarł wnioski z przeprowadzonych eksperymentów, odniósł się do zakładanych celów, jak również wskazał kierunki potencjalnych przyszłych badań.

### **Ocena merytoryczna pracy**

Recenzowana rozprawa dotyczy obliczeń z wykorzystaniem metod opartych na ewolucji populacji do rozwiązywania wybranych problemów optymalizacyjnych o charakterze ciągłym. Zaproponowane i wykorzystane przez Autora podejście hybrydowe stanowi połączenie podejść agentowego z podejściem opartym na ewolucji populacji i wpisuje się w nurt badań nad poszukiwaniem coraz bardziej efektywnych i wydajnych algorytmów do rozwiązania trudnych zagadnień optymalizacyjnych.

Proponując podejście metaheurystyczne, Autor musiał zmierzyć się z szeregiem wyzwań, które niesie ono z sobą. Z jednej strony, duża popularność metaheurystyk, wynikająca z ich ogólnego charakteru, potencjalna przydatność do rozwiązywania różnych problemów, jak również udowodniona skuteczność w działaniu, mogą skłaniać do ich wykorzystania.



Z drugiej strony, ograniczenia związane m. in. z możliwą ich stosunkowo niską wydajnością, szczególnie przy wykorzystaniu metaheurystyk opartych na ewolucji populacji, mogą stanowić barierę w ich wykorzystaniu.

W recenzowanej rozprawie, Autor, dostrzegając ograniczenia podejść metaheurystycznych opartych na ewolucji populacji, podejmuje próby zwiększenia ich wydajności. Jednym z kierunków które podejmuje, jest wykorzystanie paradygmatu agentowości, pozwalającego na osiągnięcie lepszych wyników niż metody klasyczne, przy mniejszym nakładzie obliczeniowym. Innym zaś, wykorzystanie algorytmów memetycznych, rozszerzających możliwości klasycznych algorytmów ewolucyjnych.

Od pierwszego wykorzystania algorytmów memetycznych przez Pablo Moscato w 1989 roku, stały się one jednymi z bardziej popularnych i skutecznych metod wśród heurystyk wykorzystywanych do rozwiązywania obliczeniowo trudnych problemów optymalizacyjnych. Stały się one również inspiracją dla tworzenia nowych metod lub podejść hybrydowych, których byłyby one częścią. Stąd podjęcie tematu połączenia algorytmów memetycznych z podejściem wieloagentowym wydaje mi się z jednej strony, dosyć naturalną drogą, z drugiej zaś, podejściem oryginalnym o niemałym potencjale.

Analizując strukturę pracy, jak również zawartość poszczególnych rozdziałów, stwierdzam, że propozycja hybrydyzacji algorytmów memetycznych z podejściem wieloagentowym, została poprzedzona wnikliwą i rzeczową analizą dokonaną przez Autora zagadnień dotyczących m.in. metod heurystycznych wykorzystywanych w rozwiązywaniu problemów optymalizacyjnych, systemów wieloagentowych, czy też sposobów, które pozwalają zwiększyć skuteczność, czy też wydajność określonych algorytmów. Chociaż rozdziały 1, 2 i 3 w większości mają charakter przeglądowy, ich treść oraz kolejność przedstawiania zagadnień stanowi spójne wprowadzenie, ukierunkowane na główne zadania badawcze, podjęte przez Autora. Potwierdza to, moim zdaniem, że autor w sposób przemyślany podszedł do ich opracowania. Jednocześnie, dobierając reprezentatywne pozycje literatury w bibliografii, a także umiejętnie je przywołując, wykazał się znajomością rozważanej tematyki.

Dokonując merytorycznej oceny, w szczególności, jako interesujące i oryginalne uznaję propozycje dwóch metod hybrydyzacji przeszukiwania lokalnego z ewolucyjnym systemem wieloagentowym. W pierwszym z nich, implementacja lokalnego przeszukiwania, została zrealizowana w trakcie reprodukcji. Drugi, zaś, moim zdaniem, bardziej interesujący, dotyczy możliwości wykorzystania lokalnego przeszukiwania w różnych momentach życia agenta, w zależności od stanu środowiska lub innych uwarunkowań.

Innym, interesującym podejściem przedstawionym w rozprawie przez Autora, jest wykorzystanie techniki buforowania funkcji przystosowania, którą Autor twórczo zaadaptował bazując na wynikach zaprezentowanych w pracy Gallardo et al. [pozycja 82 w rozprawie]. Adaptację tę uznaję za interesujący wkład w obszar obliczeń memetycznych.

Odnosząc się do ostatniej, części pracy, w której Autor prezentuje założenia i analizuje wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych, stwierdzam, że Autor zaplanował, zorganizował i przeprowadził eksperymenty w sposób prawidłowy. Sama analiza wyników zaś, dostarcza interesujących obserwacji, potwierdzających skuteczność i wydajność zaproponowanych podejść. Eksperymenty przeprowadzono dla przedstawionych wcześniej algorytmów: dwóch algorytmów PEA oraz EMAS w wersji podstawowej oraz ich



wariantów memetycznych MemPEA, MemEMAS oraz MemEMAS\_step. W celu zbadania skuteczności oraz wydajności tych algorytmów wykorzystano je do rozwiązania czterech trudnych, wielowymiarowych, znanych funkcji benchmarkowych: Rastrigin, Ackley, Schwefel oraz De Jong. Uzyskane wyniki, co Autor szczegółowo opisuje, potwierdziły, iż w zdecydowanej większości przypadków EMAS pozwala na uzyskanie lepszych rezultatów niż PEA. Ponadto, memetyczne wersje obu algorytmów w części przypadków przewyższają te w wersji podstawowej (Ackley i Schwefel), jednakże wyniki nie wskazują jednoznacznie na taką prawidłowość dla wszystkich testowanych funkcji. Potwierdza to, że próba znalezienia uniwersalnego, najlepszego algorytmu metaheurystycznego, dla wszystkich testowanych funkcji, może okazać się niemożliwa.

Z uwagi na fakt, iż dużą część pracy Autor poświęca podejściu memetycznemu, Autor zdecydował się również na przeprowadzenie eksperymentu, w którym zbadał wpływ wartości wybranych parametrów algorytmu na uzyskiwane rozwiązania. Eksperyment przeprowadzono na jednej z testowanych poprzednio funkcji (Rastrigin). Eksperyment ten uznaję za interesujący i, co ważniejsze, potrzebny, gdyż jego rezultaty, mogą pozwolić na lepsze dostrojenie zaproponowanych algorytmów. Stanowi to często niezbędny krok przy wykorzystaniu metaheurystyk do rozwiązania określonego problemu.

Wreszcie ostatnia część tego rozdziału odnosi się do wykorzystania zaproponowanych podejść memetycznych do rozwiązania trudnego rzeczywistego problemu optymalizacyjnego, co stanowi, moim zdaniem, dodatkowy atut rozprawy. Ostateczne wyniki wskazały na przewagę algorytmów PEA+memetics, EMAS, EMAS+memetics nad PEA, jednakże nie wykazały przewagi wersji memetycznej algorytmu EMAS nad wersją klasyczną.

### **Najważniejsze osiągnięcia**

Oryginalny dorobek autora stanowią opracowane algorytmy, jak również wyniki badań opracowanych algorytmów oraz sformułowane na ich podstawie wnioski. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaprezentowanych w rozprawie zaliczyłbym:

- Wprowadzenie i wykorzystanie dwóch metod hybrydyzacji przeszukiwania lokalnego z EMAS (w trakcie reprodukcji i w podczas całego cyklu życia agenta),
- Zaproponowanie techniki buforowania funkcji przystosowania umożliwiającej zmniejszenie złożoności obliczeń memetycznych oraz pozwalającej na uzyskanie lepszych wyników w krótszym czasie, niż w przypadku metod ewolucyjnych i agentowych,
- Przeprowadzenie eksperymentalnej oceny zaproponowanych rozwiązań przy wykorzystaniu benchmarkowych trudnych wielowymiarowych (5000 wymiarów) funkcji ciągłych, obejmującej porównanie EMAS, klasycznych algorytmów ewolucyjnych i ich wariantów memetycznych,
- Zbadanie wpływu określonych parametrów memetycznych na uzyskane wyniki, pozwalające na właściwy dobór parametrów algorytmu,
- Zastosowanie zaproponowanych algorytmów memetycznych do rozwiązania rzeczywistego problemu inżynierskiego, wykazując skuteczność i wydajność zastosowanych podejść.

W tym miejscu warto też wspomnieć, że częściowe wyniki badań zaprezentowane przez Autora w rozprawie były uprzednio publikowane lub znajdują się w druku w dwóch artykułach w czasopismach z listy JCR (*Computing and Informatics* oraz *Journal of*



*Computational Science*) o sumarycznym IF = 1.582 oraz w publikacjach w recenzowanych materiałach konferencyjnych indeksowanych w Web of Science.

### **Uwagi i pytania dotyczące recenzowanej rozprawy**

Chociaż, jak wcześniej wspomniałem, zarówno poziom merytoryczny rozprawy, jak i jej styl, generalnie oceniam pozytywnie, poniżej przedstawiam kilka uwag i pytań dotyczących rozprawy, obejmujących te, o nieco większym znaczeniu, jak również te, mniej istotne, jednakże niekoniecznie pozytywnie wpływające na odbiór pracy lub jej części.

1. W podrozdziale 3.2 Autor nawiązuje do klasyfikacji metod hybrydowych, zaproponowanej m.in. w pracy E.-G. Talbi. A taxonomy of hybrid metaheuristics. *Journal of Heuristics*, 8(5):541–564, (2002). Jaki jest powód przytoczenia tej klasyfikacji w tym miejscu? I dlaczego akurat tej? W jakiej grupie znalazłoby się zaproponowane w pracy podejście uwzględniając np. klasyfikację zaproponowaną w pracy T.G. Crainic, M. Toulouse, Parallel Meta-heuristics. In: M. Gendreau, J.-Y. Potvin (eds.): *Handbook of Metaheuristics*, International Series in Operations Research & Management Science 146, Springer (2010)., pp. 497–541?
2. Autor w wielu miejscach rozprawy odnosi się do paradygmatu agentowego, wskazując jednocześnie zalety jego wykorzystania do rozwiązywania określonej grupy problemów. Przykładowo w streszczeniu w języku polskim można przeczytać: „Znaczący skok jakościowy w dziedzinie obliczeń ewolucyjnych przyniosło wprowadzenie koncepcji agentowości. Okazało się, że systemy agentowe są w stanie osiągać lepsze rozwiązania niż techniki klasyczne, potrzebując przy tym mniej nakładu obliczeniowego.” Z drugiej strony, jedynie we wprowadzeniu do rozdziału 2, Autor krótko odnosi się do wybranych definicji agenta, systemu wieloagentowego, czy też ich zastosowań. Proszę o uzasadnienie, co może decydować o sukcesie podejścia agentowego? Jakie cechy agentów, czy też systemów wieloagentowych mogą wpływać lub wpływają na osiąganie lepszych rezultatów i/lub osiąganie tych wyników przy mniejszym nakładzie obliczeniowym? Przyznaję, iż nieco zabrakło mi bardziej obszernego rozwinięcia tego wątku.
3. Autor wykorzystuje w swojej rozprawie ewolucyjny system wieloagentowy EMAS. Czy są Autorowi znane inne systemy/środowiska wieloagentowe służące do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych?
4. Czy zaproponowana technika buforowania funkcji przystosowania da się zastosować do rozwiązania problemów optymalizacji kombinatorycznej? Jakie problemy ewentualnie Autor widziałby w pierwszej kolejności do przebadania?
5. Wybrane uwagi do części eksperymentalnej:
  - a. Dla celów eksperymentów obliczeniowych przyjęto określone wartości parametrów wykorzystywanych algorytmów (tabele 5.1, 5.2, ale również 5.13). Nie jest jasne, na jakiej podstawie zostały te wartości dobrane w taki, a nie inny sposób?
  - b. Nie jest jasne, czy w eksperymencie opisanym w podrozdziale 5.3 była zastosowana technika buforowania.
  - c. Rysunek 5.9 nie zawiera wyników dla MemEMAS\_step. Czy jest jakiś powód takiego przedstawienia, czy też jest to pominięcie niezamierzone?
  - d. Wśród wyników przedstawionych w tabeli 5.3 można zauważyć, że w przypadku jednej funkcji, dla algorytmów MemPEA, MemEMAS oraz MemEMAS\_step



zaobserwowano duże wartości miar związanych z dywersyfikacją. Jaki może być powód takiego zachowania algorytmów?

- e. Myślę, że w celu zwiększenia czytelności, na rysunkach 5.5-5.8 przydałaby się ta sama skala na osi Y.
  - f. Podrozdział 5.4 poświęcony został zbadaniu wpływu wartości określonych parametrów algorytmów memetycznych na uzyskiwane rezultaty. Eksperyment ten przeprowadzono tylko dla jednej z testowanych funkcji (Rastrigin). Nie czyniąc zarzutu w tym miejscu (przeanalizowanie jednej z funkcji uznaję za wystarczające na potrzeby badań prezentowanych w ramach rozprawy), proponuję rozważenie w przyszłości przeprowadzenia eksperymentów na innych funkcjach, szczególnie uwzględniając różne wyniki uzyskane i zaprezentowane w tabeli 5.3.
  - g. W podrozdziale 5.4.5 przeprowadzono eksperyment, w którym badano wpływ kombinacji parametrów „Memetic mutation repetition” oraz „Mutation strength” na uzyskiwane wyniki dla funkcji Rastrigin. Nie jest jasne, jakiego algorytmu dotyczą te wyniki. Czy jest to MemEMAS\_step?
  - h. W podrozdziale 5.5 zastosowano inne oznaczenia niektórych algorytmów niż w podrozdziałach 5.3 oraz 5.4, np. PEA+memetics vs. MemPEA.
  - i. W wyniku szczegółowych eksperymentów, których wyniki zaprezentowano w rozprawie można wyciągnąć określone wnioski dotyczące zachowania zaproponowanych i zaimplementowanych podejść zastosowanych do wyznaczenia ekstremum czterech wybranych funkcji benchmarkowych. Czy znane są Autorowi wyniki zastosowania innych grup metod dla badanych funkcji? Jak na ich tle wypadają badane przez Autora podejścia pod względem skuteczności i wydajności?
6. Pozostałe, zauważone drobne uchybienia:
- a. Figures 5.5, 5.8 – powinno być: Figures 5.5-5.8 (str. 108),
  - b. EMAS\_step – powinno być: MemEMAS\_step (str. 114),
  - c. M. Kaziód – powinno być: M. Kaziród (pozycja literatury [109], str. 144).

## Podsumowanie

Podsumowując, oceniam pozytywnie rozprawę doktorską mgr. inż. Wojciecha Korczyńskiego. Podjęty przez Autora w rozprawie temat został dobrany właściwie, uważam go za aktualny i ważny. Autor wykazał, że zna literaturę przedmiotu i potrafi ją odpowiednio wykorzystać. Ponadto zna i prawidłowo stosuje metody badawcze, jak również potrafi prawidłowo zaplanować i przeprowadzić eksperymenty obliczeniowe, a następnie poprawnie zinterpretować ich wyniki.

W moim przekonaniu, w świetle Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r., Nr 65, poz. 595 z późn. zm.), recenzowana rozprawa spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania, w tym do jej publicznej obrony.

