

Wrocław, 16 czerwca 2017 r.

dr hab. inż. Bogdan Trawiński, Prof. PWr.  
Wydział Informatyki i Zarządzania  
Politechnika Wrocławska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław  
e-mail: bogdan.trawinski@pwr.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Wojciecha Korczyńskiego  
p.t.**

**„Agent-based memetic computing in continuous optimization”**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Korczyńskiego o podanym wyżej tytule, która została przygotowana na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. pod kierunkiem naukowym Pana dr. hab. inż. Aleksandra Byrskiego.

Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie pisma Pana dr. hab. inż. Krzysztofa Winczy, Prof. AGH, Prodziekana Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie z dnia 17 marca 2017 r.

**PRZEDMIOT ROZPRAWY**

Przedmiotem rozprawy są ewolucyjne metody heurystyczne, służące do poszukiwania optymalnych rozwiązań trudnych problemów. Zgodnie z twierdzeniem "no-free-lunch" Wolperta i Macready'ego nie ma możliwości opracowania metaheurystyki, która byłaby najlepszym rozwiązaniem dla wszystkich problemów. Dlatego też Autor podjął się zadania opracowania metod pozwalających znajdować lepsze rozwiązania, aniżeli techniki klasyczne i z niższym nakładem obliczeniowym. Zadanie to wykonuje dla wieloagentowego systemu ewolucyjnego EMAS, opracowanego i rozwijanego na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, wprowadzając do niego techniki memetyzacji. Ponadto, Autor opracował metodę przyspieszenia obliczeń poprzez delegację ich najkosztowniejszych części do urządzeń GPU i FPGA. Następnie zaproponował sposób na zwiększenie wydajności metaheurystyk poprzez zrównoleglenie obliczeń.

Zasadniczym celem rozprawy było wykazanie, że zastosowanie dedykowanych operatorów przeszukiwania lokalnego wraz z buforowaniem wartości funkcji przystosowania umożliwia zwiększenie efektywności przeszukiwania przestrzeni rozwiązań w agentowych systemach obliczeniowych w porównaniu do ewolucyjnych systemów wieloagentowych oraz klasycznych algorytmów ewolucyjnych. W pracy autor przeprowadził eksperymentalną ewaluację zaproponowanych metod przy wykorzystaniu trudnych, wielowymiarowych (5000 wymiarów) funkcji ciągłych.

## UKŁAD I ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 157 strony i składa się z pięciu rozdziałów, a każdy z rozdziałów z szeregu podrozdziałów oraz spisu treści, wprowadzenia, podsumowania, wykazu rysunków (23 pozycje), wykazu tabel (14 pozycji), spisu literatury (195 pozycji) oraz życiorysu naukowego Doktoranta. Rozprawa została napisana w języku angielskim, w sposób jasny i zrozumiały. Jest poprawna pod względem językowym.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia podstawowe pojęcia związane z rozwiązywaniem trudnych problemów optymalizacyjnych i wprowadza do metaheurystyk populacyjnych. Autor używa zamiennie pojęć „algorytm ewolucyjny” oraz „metaheurystyka ewolucyjna”. Omawia różne kryteria zatrzymania tych metaheurystyk. Opisuje podstawowy przebieg algorytmu ewolucyjnego oraz rolę funkcji przystosowania i metody realizacji podstawowych operacji ewolucyjnych: selekcji, krzyżowania i mutacji. W końcowej części Autor pokazuje, jak wzbogacanie algorytmów ewolucyjnych o lokalne przeszukiwanie w celu polepszenia eksploatacji doprowadziło do opracowania algorytmów memetycznych. Następnie Autor rozważa cechy lokalnego przeszukiwania opartego na teorii Baldwina oraz teorii Lamarcka. W rozdziale tym autor wymienia również różnorodne obszary zastosowań praktycznych metaheurystyk ewolucyjnych, a także ich hybrydowych wariantów w postaci algorytmów memetycznych.

W rozdziale drugim Autor prezentuje koncepcję ewolucyjnego systemu wieloagentowego (EMAS), stworzonego na AGH, polegającą na wprowadzeniu mechanizmów ewolucyjnych do środowiska agentowego i poddanie procesom ewolucyjnym populacji agentów. Rozproszenie procesów ewolucji w przestrzeni systemu agentowego prowadzi do zwiększenia efektywności rozwiązywania pewnych klas problemów ewolucyjnych. W dalszej części autor opisuje sposób łączenia systemu EMAS z algorytmami memetycznymi, a także dwie metody zastosowania lokalnego przeszukiwania w czasie reprodukcji oraz w czasie życia agentów. Autor dokonuje również przeglądu licznych badań prowadzonych na AGH z wykorzystaniem systemu EMAS.

W rozdziale trzecim Autor dokonuje przeglądu technik zwiększania efektywności metaheurystyk poprzez zrównoleglanie przetwarzania, w tym opisuje równoległy algorytm ewolucyjny (PEA) oraz komórkowy algorytm ewolucyjny (CEA). W dalszej części Autor omawia środowiska programistyczne służące do zrównoległego przetwarzania ewolucyjnego. Następnie Autor przedstawia różnorodne rozwiązania hardwarowe pozwalające na szybsze przetwarzanie algorytmów ewolucyjnych, a w tym GPGPU (*general-purpose computing on graphics processing units*) oraz FPGA (*field-programmable gate array*). W końcowej części Autor opisuje sposoby efektywnego obliczania wartości funkcji przystosowania za pomocą techniki buforowania.

W rozdziale czwartym Autor przedstawia agentową platformę obliczeniową PyAgE, funkcjonującą w modelu MIMD (*multiple instruction stream, multiple data streams*), którą wykorzystał do przeprowadzenia eksperymentów ewaluacyjnych. W dalszej części Autor opisuje sposoby implementacji na platformie PyAgE algorytmów populacyjnych, agentowych i memetycznych, buforowania wartości funkcji



przystosowania, zrównoleglenie przetwarzania oraz integracji z urządzeniami GPGPU i FPGA. Rozdział ten ma charakter raportu inżynierskiego, jest zilustrowany kilkoma schematami przetwarzania i zawiera 23 listingi kodu.

W rozdziale piątym Autor opisuje eksperymenty ewaluacyjne, które przeprowadził w celu wykazania tezy rozprawy. Przedstawia plan eksperymentu z wykorzystaniem czterech trudnych funkcji benchmarkowych: Rastrigina, Ackleya, Schwefela i De Jonga (dla 5000 wymiarów) oraz pięciu algorytmów ewolucyjnych: PEA, EMAS i ich trzech wariantów memetycznych. Następnie dokonuje szczegółowej analizy uzyskanych rezultatów oraz rozważa wpływ parametrów algorytmów memetycznych na efektywność znajdowania optymalnych rozwiązań. W końcowej części Autor zamieszcza przykład praktycznego zastosowania memetycznych metaheurystyk do optymalizacji kształtu wirującego dysku. Rozdział ten stanowi podstawę do stwierdzenia Autora, że teza jego rozprawy doktorskiej została eksperymentalnie wykazana.

### **ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA**

Badania w ramach pracy doktorskiej zostały wykonane na Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie, w zespole, który od kilku lat rozwija ewolucyjny system wieloagentowy (EMAS) i przeprowadza eksperymenty z jego wykorzystaniem. Do głównych osiągnięć Doktoranta należy:

- opracowanie dwóch modeli obliczeń memetycznych w EMAS, poprzez zastosowanie lokalnego przeszukiwania w czasie reprodukcji oraz w czasie życia agentów,
- opracowanie metody poprawy wydajności metaheurystyk poprzez efektywne obliczanie wartości funkcji przystosowania za pomocą techniki buforowania,
- rozszerzenie agentowej platformy obliczeniowej PyAgEa poprzez zaimplementowanie w niej algorytmu memetycznego, buforowania wartości funkcji przystosowania, zrównoleglenie przetwarzania oraz integracji z urządzeniami GPGPU i FPGA, które przyspieszają przetwarzanie zaproponowanych metod,
- zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów porównawczych pięciu algorytmów ewolucyjnych: PEA, EMAS i ich trzech wariantów memetycznych z wykorzystaniem czterech wielowymiarowych trudnych funkcji benchmarkowych, a następnie analiza uzyskanych wyników,
- analiza wpływu parametrów algorytmów memetycznych na efektywność znajdowania optymalnych rozwiązań,
- praktyczne zastosowanie memetycznych metaheurystyk do optymalizacji kształtu wirującego dysku.

### **UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE**

Poniższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na wysoką ocenę tej pracy doktorskiej:

#### **Teza pracy**

Autor sformułował następującą tezę swojej rozprawy doktorskiej:

*„Zastosowanie dedykowanych operatorów przeszukiwania lokalnego umożliwi zwiększenie efektywności przeszukiwania przestrzeni rozwiązań w agentowych systemach obliczeniowych w porównaniu do ewolucyjnych systemów*

wieloagentowych oraz klasycznych algorytmów ewolucyjnych, umożliwiając jednocześnie osiągnięcie lepszych rozwiązań w krótszym czasie.”

Końcowe stwierdzenie tezy „umożliwiając jednocześnie osiągnięcie lepszych rozwiązań w krótszym czasie” mogłoby spowodować u czytelnika błędne zrozumienie, że w rozprawie rozważane są zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej (*ang. multi-objective optimization*).

### Przegląd prac związanych

Przedmiotem rozprawy są algorytmy ewolucyjne, przeznaczone do rozwiązywania wielowymiarowych trudnych problemów globalnej optymalizacji. Badania nad tymi algorytmami były intensywnie prowadzone w ciągu minionych dwóch dekad. Dlatego też, zamieszczenie w rozprawie literaturowego przeglądu najnowszych dokonań w tym zakresie, ze szczególnym naciskiem na udoskonalane warianty algorytmów memetycznych, mogłoby wzbogacić jej rozdział pierwszy. Przykładem prac z kilku ostatnich lat są:

[1] D. Molina, M. Lozano, A. M. Sánchez, F. Herrera: *Memetic algorithms based on local search chains for large scale continuous optimisation problems: MA-SSW-Chains*. *Soft Computing*, vol. 15, Iss. 11, pp 2201–2220, 2011

[2] H. Wang, Z. Wu, S. Rahnamayan: *Enhanced opposition-based differential evolution for solving high-dimensional continuous optimization problems*. *Soft Computing*, vol. 15, Iss. 11, pp. 2127-2140, 2011

[3] M. Lastra, D. Molina, J. M. Benítez: *A high performance memetic algorithm for extremely high-dimensional problems*. *Information Sciences*, vol. 293, pp. 35-58, 2015

[4] A. LaTorre, S. Muelas, J.-M. Peña: *A comprehensive comparison of large scale global optimizers*. *Information Sciences*, vol. 316, pp. 517-549, 2015

[5] G. A. Trunfio: *Metaheuristics for Continuous Optimization of High-Dimensional Problems: State of the Art and Perspectives*. In *Big Data Optimization: Recent Developments and Challenges, Studies in Big Data*, vol. 18, pp 437-460, Springer 2016

### Opis eksperymentów

Przedstawiony w Rozdziale 5 opis przeprowadzonych eksperymentów pozostawia pewien niedosyt. Doktorant stwierdza, że do eksperymentów użył czterech trudnych wielowymiarowych ciągłych funkcji benchmarkowych: Rastrigina, Ackleya, Schwefela, and De Jonga, jednakże nie uzasadnia tego wyboru.

Zdaniem recenzenta takie uzasadnienie jest niezbędne, bowiem w literaturze można znaleźć zestawienia licznych funkcji benchmarkowych dla problemów globalnej optymalizacji. Przykładowo Ali i inni [6] wymieniają 50, a Jamil i Yang [7] – 175 (w tym 48 separowalnych) takich funkcji.

[6] M. Montaz Ali, C. Khompatraporn, and Z. B. Zabinsky: *A Numerical Evaluation of Several Stochastic Algorithms on Selected Continuous Global Optimization Test Problems*. *Journal of Global Optimization* (2005) 31: 635–672. DOI 10.1007/s10898-004-9972-2

[7] M. Jamil and X.-S. Yang: *A Literature Survey of Benchmark Functions For Global Optimization Problems*. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, Vol. 4, No. 2, pp. 150–194 (2013). DOI: 10.1504/IJMMNO.2013.055204



Doktorant nie uzasadnił również, dlaczego przeprowadził ewaluację tych funkcji dla dokładnie 5000 wymiarów na kostce wielowymiarowej o określonym dla każdej funkcji zakresie wartości argumentów.

Doktorant arbitralnie podaje w tabelach 5.1 i 5.2 parametry konfiguracyjne eksperymentu i nie uzasadnia ich wyboru ani też nie podaje metody ich doboru. Dobrym przewodnikiem i standardem odniesienia mógłby być raport Li i innych [8], przeznaczony na potrzeby konkursu CEC 2013 w zakresie wielkoskalowej optymalizacji globalnej. Autorzy tego raportu przedstawili 15 benchmarkowych problemów dużej skali do oceny algorytmów globalnej optymalizacji. Raport ten zawiera również wymagania co do konfiguracji eksperymentów i sposobu prezentowania wyników badań. Wytyczne zawarte w tym raporcie obowiązywały w kolejnych konkursach, po CEC 2017 włącznie.

[8] X. Li, K. Tang, M. Omidvar, Z. Yang and K. Qin: *Benchmark Functions for the CEC'2013 Special Session and Competition on Large Scale Global Optimization, Technical Report, Evolutionary Computation and Machine Learning Group, RMIT University, Australia, 2013.*

Doktorant stwierdza, że każdy eksperyment trwał po 72 000 sekund, czyli 20 godzin i był powtórzony 11 razy aby wykazać powtarzalność wyników i przeprowadzić ich analizę statystyczną. Ale czy te liczby były wystarczające?

Można zadać pytanie, czy użyte kryterium zatrzymania - czas przetwarzania algorytmów, wynoszące 20 godzin zostało właściwie dobrane. Analogicznie, czy 11 powtórzeń daje wystarczającą liczbę obserwacji, aby przeprowadzone testy statystyczne były wiarygodne.

### **Analiza wyników**

Analiza przebiegów czasowych wartości funkcji przystosowania prezentowanych na rysunkach 5.5 (dla funkcji Rastrigina) oraz 5.7 (dla funkcji Schwefela) wskazuje, że czas przetwarzania algorytmów był zbyt krótki, by można było z całą pewnością stwierdzić ich zbieżność.

Obie funkcje mają minimum globalne dla wartości 0. Jednakże zgodnie z wykresami na rysunkach 5.5 i 5.7 algorytmy zakończyły przetwarzanie dla wartości funkcji przystosowania równych odpowiednio powyżej 10 oraz powyżej  $10^4$ . Wartości te wydają się być dość odległe od globalnego optimum. Zdaniem recenzenta więcej można byłoby się dowiedzieć o zbieżności algorytmów, gdyby przeprowadzono dodatkowe eksperymenty, w których kryterium stopu byłaby pewna wartość progowa, np. 0.1 lub 0.01. Wyjaśnienia Doktoranta w tekście rozprawy, z użyciem trybu warunkowego: „*lokalne przeszukiwanie mogłoby zapewnić w kolejnych krokach satysfakcjonujące rozwiązanie, ponieważ algorytmy MemEMAS i MemPEA zmniejszają wartości swoich funkcji przystosowania*” są niewystarczające.

### **Testy statystyczne**

Doktorant przeprowadził testy statystyczne, aby potwierdzić, że wyniki eksperymentów dla poszczególnych algorytmów różnią się między sobą. W tym celu zastosował nieparametryczny test Kruskala-Wallisa H porównujący kilka grup niezależnych, a po odrzuceniu hipotez zerowych wykonał testy post-hoc Dunna dla porównań wielokrotnych. Zastosowanie takiego podejścia wydaje się być prawidłowe. Tym niemniej dla kompletności opisu, mogłoby się znaleźć stwierdzenie

spełnienia przez dane założeń testu Kruskala-Wallisa H oraz dyskusja czułości i wiarygodności testów w kontekście liczebności posiadanych danych.

W Tabeli 5.5 Doktorant przedstawił dla każdej z badanych funkcji benchmarkowych tylko najwyższe wartości p-value dla porównań par algorytmów testem post-hoc Dunna. Wydaje się, że pokazanie wartości p-value dla wszystkich par porównywanych algorytmów lepiej zilustrowałoby uzyskane wyniki.

Ponadto, recenzent chciałby zwrócić uwagę, że Garcia i inni [9] zaproponowali inne podejście to statystycznej analizy efektywności algorytmów ewolucyjnych rozwiązywania problemów optymalizacyjnych z wykorzystaniem funkcji benchmarkowych.

[9] S. García, D. Molina, M. Lozano, F. Herrera: *A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: a case study on the CEC'2005 Special Session on Real Parameter Optimization. Journal of Heuristics, vol. 15, pp. 617–644 (2009)*

### **Złożoność obliczeniowa**

Jednym z głównych celów rozprawy jest poszukiwanie metod uzyskiwania przez algorytmy ewolucyjne lepszej efektywności, w tym osiągnięcia rozwiązań w krótszym czasie. Przeprowadzenie analizy złożoności obliczeniowej algorytmów po wprowadzeniu do nich własnych usprawnień Autora oraz algorytmów, wykorzystanych do badań porównawczych, mogłoby wzbogacić rozważania prezentowane w rozprawie. Jest to istotne, ponieważ wprowadzenie memetyzacji wiąże się z dodatkowym obciążeniem związanym z wykonywaniem obliczeń w czasie lokalnego przeszukiwania.

### **KONKLUZJA**

Porównanie wymienionych powyżej oryginalnych wyników Autora o charakterze naukowym i implementacyjnym z pewnymi niedociągnięciami, czy problemami dyskusyjnymi wypada zdecydowanie na korzyść rozprawy, która wnosi wartościowy wkład do dziedziny zagadnień związanych poszukiwaniem optymalnych rozwiązań trudnych problemów, do teorii i praktyki inteligencji obliczeniowej oraz do nauki jako takiej.

Doktorant ma już dość pokaźny, szczególnie w ujęciu liczbowym, dorobek naukowy liczący 10 pozycji zaewidencjonowanych w bibliograficznej bazie **dblp** z zakresu informatyki. Wśród jest jeden artykuł opublikowany w wysoko punktowanym czasopiśmie międzynarodowym: *Journal of Computational Science* (5-year Impact Factor = 2,0 oraz 30 pkt MNiSW).

Z powyżej wymienionych powodów moja ocena przedłożonej do recenzji rozprawy jest pozytywna. Uważam też, że należy również wysoko ocenić nakład pracy Autora oraz opiekę Promotora.

W konkluzji stwierdzam, że praca doktorska „*Agent-based memetic computing in continuous optimization*”, której autorem jest mgr inż. Wojciech Korczyński, spełnia wymagania stosownej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

dr hab. inż. Bogdan Trawiński, Prof. PWr.

