



**WMP
SNS**
UKSW

Wydział Matematyczno-Przyrodniczy.
Szkoła Nauk Ścisłych
**UNIwersytet KARDYNAŁA
STEFANA WYSZYŃSKIEGO
W WARSZAWIE**

Warszawa, 5 grudnia 2023 r.

dr hab. inż. Krzysztof Trojanowski, prof. uczelni
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie

Szanowny Pan
dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni
Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechnika Warszawska

Szanowny Panie Przewodniczący Rady Naukowej,

przesyłam w załączeniu recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Jagodzińskiego pt. „Metoda optymalizacji inspirowana algorytmami ewolucji różnicowej oraz CMA-ES”, której wykonanie powierzyła mi Rada Naukowa Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej na posiedzeniu w dn. 27 czerwca 2023 r. Oceniam przedłożoną rozprawę doktorską jako spełniającą wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) z późniejszymi zmianami w brzmieniu z dnia 15 września 2017 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789.), zgodnie z Art. 175. 1. Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 r. poz. 1669). Wniosuję o dopuszczenie autora do dalszych etapów postępowania o nadanie tytułu doktora. Szczegółowa opinia zawarta jest w recenzji.

Z wyrazami szacunku,

dr hab. inż. Krzysztof Trojanowski, prof. uczelni

UKSW

Warszawa, 5 grudnia 2023 r.

dr hab. inż. Krzysztof Trojanowski, prof. uczelni
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy. Szkoła Nauk Ścisłych
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie
ul. Wóycickiego 1/3, 01-938 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Dariusza Jagodzińskiego pt.
„Metoda optymalizacji inspirowana algorytmami ewolucji różnicowej oraz CMA-ES”

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy metod optymalizacji heurystycznej należących do rodziny algorytmów ewolucyjnych: strategii ewolucyjnych, ewolucji różnicowej oraz nowej metody stanowiącej twórczo rozbudowaną hybrydę dwóch pierwszych. Pisząc to, pojawia się natychmiast skojarzenie dotyczące dziesiątek nowych metod optymalizacji heurystycznej inspirowanych naturą, które co roku pojawiają się w publikacjach (listę takich metod można znaleźć np. w *Nature-Inspired Algorithms*, v.2, A. Tzanetos, repozytorium Mendeley Data). Przypadek prezentowany w pracy zdecydowanie odróżnia się od publikacyjnego tła celami, które postawił sobie autor. Inspirując się szczególnie skuteczną ewolucyjną strategią adaptacji macierzy kowariancji (CMA-ES), proponuje on nową metodę, która nie jest jednak tak złożona pod względem obliczeniowym, ponieważ wprowadził do niej zmiany inspirowane wybranymi komponentami z również bardzo efektywnej, a znacznie prostszej obliczeniowo ewolucji różnicowej (DE). To uszczegółowienie nadal jeszcze nie w pełni prezentuje poziom trudności ambitnie postawionego celu, ponieważ nowość w pracy nie sprowadza się jedynie do złożenia wybranych składowych dwóch znanych algorytmów w nową całość. Autor założył, że możliwe jest takie kreatywne ich rozwinięcie, dla którego można wykazać, że w proponowanej nowej metodzie procesy adaptacji punktu środkowego oraz macierzy kowariancji w kolejnych populacjach pracy algorytmu są modelowane identycznie jak w CMA-ES. W konsekwencji nowa metoda osiąga podobnie wysoką efektywność optymalizacji, jednak przy znacząco niższym nakładzie obliczeniowym charakterystycznym dla drugiego z wybranych klasycznych podejść ewolucyjnych. Tak też rozumiem hipotezę badawczą postawioną w tej pracy, która choć nie pojawia się *explicite* we Wstępie, jest jednak łatwa do zidentyfikowania z opisu wykonanej pracy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Jagodzińskiego jest napisana w języku polskim i liczy 127 stron. Na rozprawę składają się wprowadzenie, trzy rozdziały, zakończenie i bibliografia oraz Dodatki A i B zawierające informacje o części eksperymentalnej pracy (ustawienia parametrów i szczegółowe wyniki). Bibliografia zawiera 61 pozycji, z czego trzy to prace, w których doktorant jest współautorem. Struktura pracy jest regularna, właściwa dla tekstów technicznych.

We wprowadzeniu, identyfikowanym jako rozdział pierwszy, autor zaprezentował problem badawczy i motywację wyboru właśnie tych dwóch wiodących metaheurystyk populacyjnych: CMA-ES i DE, następnie wskazał cel i zakres prac oraz omówił układ całej pracy. W drugim rozdziale zaprezentowane zostały CMA-ES i DE: dla jednej i drugiej przedstawione zostały pseudokody prezentujące zarysy algorytmów, a także nakłady obliczeniowe dla kluczowych kroków tych algorytmów oraz linie rozwojowe, czyli

rozwinienia tych algorytmów mające na celu usprawnienie ich słabych stron. Twierdzenia: 2.1.1 (dotyczące wzoru na aktualizację macierzy kowariancji) i 2.2.1 (dotyczące charakteryzacji rozkładu wektorów różnicowych przez wartość oczekiwaną i macierz kowariancji) znajdujące się w tym rozdziale są w następnym rozdziale wykorzystane do modelowania macierzy rank-1 w nowym algorytmie.

W rozdziale trzecim został omówiony proponowany algorytm różnicowej strategii ewolucyjnej. Rozdział składa się z dwóch podrozdziałów omawiających nową metodę i jej charakterystykę zachowania.

W pierwszym z podrozdziałów, prezentującym proponowany nowy algorytm, znajdujemy analizę nie jednej, a dwóch metod. Pierwszą jest ewolucja różnicowa adaptacji macierzy kowariancji (CMA-DE). Jest to podejście, w którym generowanie kolejnych postaci macierzy kowariancji zostało zastąpione ewaluacją innych struktur danych modelujących proces adaptacji punktu środkowego oraz macierzy kowariancji, tak aby rozkłady generowanych punktów w kolejnych populacjach były zgodne z CMA-ES co do parametrów rozkładu. Autor zauważa, że słabą stroną tego podejścia jest konieczność przechowywania historii stanu tych struktur dla wszystkich przeszłych populacji, co w miarę wykonywania kolejnych generacji algorytmu powoduje rosnące zapotrzebowanie pamięciowe oraz wynikający z tego koszt obliczeniowy. To ewidentnie nie satysfakcjonowało autora, dlatego prezentuje on jeszcze jedną nową metodę. Jest to Różnicowa Strategia Ewolucyjna (DES — Differential Evolution Strategy), która ogranicza rozmiar przechowywanej historii stanu tych struktur do H ostatnich generacji. Od strony teoretycznej modyfikacja w modelowaniu rozkładu punktów należących do populacji roboczej polega na zastąpieniu wykładniczego macierzy kowariancji empirycznej, wektora anizotropowej ścieżki ewolucji oraz wektora przesunięcia punktu środkowego prostą średnią kroczącą z H ostatnich postaci tej macierzy oraz wektorów. Twierdzenie 3.1.3 dowodzi podobieństwa generowania wektorów różnicowych między CMA-DE i DES uzasadniając tym samym wprowadzone uproszczenie.

Drugi z podrozdziałów rozdziału trzeciego demonstruje charakterystykę zachowania nowych algorytmów w porównaniu z CMA-ES. W tym celu przeprowadzono dwie grupy eksperymentów. W jednej obserwowano zmiany wartości własnych empirycznej macierzy kowariancji w kolejnych generacjach trzech algorytmów: CMA-ES, CMA-DE i DES optymalizujących funkcję kwadratową. W drugiej grupie eksperymentów obserwowano zbieżność wartości bezwzględnych najlepszego dotychczas znalezionej rozwiązania dla pięciu algorytmów: DE/rand/1/bin, CMA-DE, DES, oraz CMA-ES w dwóch wariantach: z mnożnikiem kroku σ ustalonym na 1, tj. bez adaptacji, oraz z adaptacją parametru σ . Druga grupa eksperymentów została przeprowadzona na ośmiu funkcjach jednomodalnych, tj. na zadaniach weryfikujących skuteczność w optymalizacji lokalnej.

Rozdział czwarty zawiera opis części eksperymentalnej prac. Autor przeprowadził eksperymenty na trzech benchmarkach: CEC (benchmark konkursowy konferencji Congress on Evolutionary Computation — CEC), BBOB (benchmark konkursowy konferencji Genetic and Evolutionary Computation Conference — GECCO) oraz BBComp (benchmark rozwijany w latach 2015-2019 w Institut für Neuroinformatik (INI) Uniwersytetu Ruhry w Bochum). Testy zostały wykonane na zadaniach jednokryterialnych jedno- i wielomodalnych z ograniczeniami kostkowymi. Wyniki zostały przedstawione na wykresach ECDF (Empirical Cumulative Distribution Function — empirycznej dystrybucyjności).

Zakończenie zawiera potwierdzenie realizacji postawionego celu pracy, wnioski końcowe oraz kierunki dalszego rozwoju zaproponowanego algorytmu DES.

Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącą o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny, przekonujący?

Przegląd i analizę źródeł autor zamieścił w rozdziale drugim. Opisał tam dwie metaheurystyki: ewolucyjną strategię macierzy kowariancji i ewolucję różnicową, zamieścił ogólne schematy działania oraz omówił wybrane warianty algorytmów należące do tych dwóch metaheurystyk powołując się w tym opisie na 39 pozycji bibliograficznych. Dla CMA-ES autor omówił sześć rozwinięć CMA-ES mających na celu redukcję zapotrzebowania na zasoby oraz cztery mające na celu poprawę szybkości zbieżności. Dla DE — dwa mające na celu poprawę szybkości zbieżności i trzy mające na celu zmniejszenie wrażliwości na parametryzację. W trzecim rozdziale znajdujemy cztery referencje do publikacji opisujących algorytmy powstałe na bazie połączenia w jedno CMA-ES i DE. W rozdziale czwartym znajdują się natomiast opisy trzech benchmarków wraz z trzema odpowiednimi referencjami do bibliografii oraz krzywych ECDF poparte dwoma referencjami bibliograficznymi. Zawarte w tym rozdziale porównanie z wynikami innych algorytmów również zawiera odpowiednie referencje dla każdego z tych algorytmów.

Lista monografii oraz artykułów z czasopism i konferencji jest bogata i świadczy o gruntownym zapoznaniu się autora z aktualnym stanem dziedziny. Wnioski, które wyciąga z przeglądu źródeł, są właściwe.

Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody, i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor postawił sobie za cel stworzenie algorytmu, którego zachowanie modeluje dynamikę zmian rozkładów populacji rozwiązań z CMA-ES, jednak w działaniu nie wymaga estymacji rzeczywistej macierzy kowariancji służącej do generowania zbioru roboczego rozwiązań. Dla proponowanego algorytmu autor zamodelował zmiany rozkładu populacji korzystając z parametrów uzyskiwanych w sposób mniej kosztowny obliczeniowo i wykazał, że uzyskany model reprezentuje zachowania analogiczne do zachowań dla CMA-ES. Oprócz analizy teoretycznej weryfikacja podobieństwa miała też charakter empiryczny i polegała na przeprowadzeniu eksperymentów polegających na optymalizacji wypukłej funkcji kwadratowej, obserwując przy tym, czy macierz kowariancji dla populacji rozwiązania staje się w kolejnych krokach algorytmu bliska odwrotności hesjanu funkcji celu. Autor ocenił też skuteczność nowego algorytmu obserwując postęp zbieżności do optimum na zadaniach jednomodalnych. Trzecia grupa eksperymentów dotyczyła zadań wielomodalnych należących do trzech benchmarków powszechnie uznanych w środowisku badawczym. Metoda eksperymentalna jest uzasadniona dla danej klasy metod, a autor dochował staranności przy stosowaniu zasad eksperymentu naukowego.

Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Samodzielny i oryginalny dorobek autora to dwie nowe metody optymalizacji heurystycznej: CMA-DE oraz DES. Ponadto oryginalny wkład dotyczy również wykazania analogii w dynamice macierzy kowariancji w kolejnych populacjach między tymi dwoma

metodami a CMA-ES. Dlatego do oryginalnego wkładu zaliczam również twierdzenia 3.1.2 i 3.1.3 definiujące wartość oczekiwaną i macierz kowariancji rozkładu prawdopodobieństwa wektorów różnicowych używanych w algorytmach odpowiednio CMA-DE i DES. Proponowana metoda DES została zaprezentowana w artykule opublikowanym w czasopiśmie IEEE Transactions on Evolutionary Computation w roku 2020 (pozycja bibliograficzna [2] w pracy), które jest jednym z najważniejszych czasopism z dziedziny optymalizacji ewolucyjnej (jeśli nie najważniejszym) i można śmiało uznać, że tym samym została zweryfikowana w środowisku naukowym.

Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Struktura rozprawy jest poprawna. Problem naukowy został dobrze sformułowany, a prawdziwość tezy została potwierdzona za pomocą analizy teoretycznej modeli opisujących proces adaptacji macierzy kowariancji, a także wynikami badań eksperymentalnych, których metodologia i zakres nie budzą wątpliwości.

Praca zawiera pewne usterki dotyczące organizacji materiału oraz o charakterze edytorskim, które omawiam poniżej (numeracja stron wg wersji elektronicznej pracy).

Wstęp zawiera wszystkie niezbędne składniki, brakuje mi w nim tylko sformułowania hipotezy badawczej, której prawdziwość miałaby zostać wykazana w pracy. Autor jawnie formułuje natomiast cel pracy mający charakter badawczy. W miejsce celu pracy oczekiwałem raczej hipotezy badawczej oraz listy celów, których osiągnięcie prowadzi do wykazania prawdziwości hipotezy. Taki konstrukt w tekście stanowi zabieg w pewnej mierze formalny, a uwaga ta nie oznacza, że praca ma braki. Hipoteza badawcza w pracy istnieje i została przeze mnie wymieniona na początku recenzji.

W ostatnim akapicie sekcji 1.2 autor stosuje w zdaniach czas przyszły, który w przypadku relacjonowania już wykonanej pracy daje pewien dysonans. Np. zamiast „Autor proponuje metodę, która..” bliższe aktualnej sytuacji byłoby stwierdzenie w rodzaju „W rozprawie autor proponuje metodę, która..” albo po prostu zamiana na czas przeszły, jako że tekst opisuje tak właściwie to, co już się wydarzyło. Podobnie czas przyszły pojawia się w pierwszym akapicie sekcji 3.2.2.

Na str. 13 autor uzasadnia wysoką skuteczność algorytmów z rodzin CMA-ES i DE argumentując to wynikami konkursów, jednak nie podaje źródeł, gdzie te wyniki można zobaczyć ([21] i [5] nie zawierają wyników konkursów), ani sam nie przedstawia rankingów z tych konkursów.

W opisach zasad działania CMA-ES i DE pojawia się pewna rozbieżność w kwestii indeksów (t) i $(t + 1)$ stosowanych przy symbolach. Bierze się ona zapewne z podstawowej różnicy między tymi dwoma algorytmami. CMA-ES najpierw z wykorzystaniem pewnych zmiennych pomocniczych (wektorów i macierzy) generuje populację rozwiązań, a następnie na jej podstawie aktualizuje wartości tych zmiennych pomocniczych. Natomiast DE od razu generuje populację rozwiązań z wykorzystaniem zmiennych pomocniczych generowanych indywidualnie dla poszczególnych nowych rozwiązań. Autor przyjął, że w CMA-ES rozwiązania wygenerowane w bieżącej iteracji mają indeks (t) , a nowe wartości zmiennych pomocniczych obliczone na podstawie tych rozwiązań — indeks $(t + 1)$, ponieważ znajdują swoje zastosowanie dopiero w następnej iteracji. W algorytmach DE, CMA-DE i DES rozwiązania wygenerowane w poprzedniej iteracji mają indeks (t) , a zmienne pomocnicze i rozwiązania generowane w bieżącej iteracji na

podstawie tamtych rozwiązań — indeks $(t+1)$. Z tego biorą się różnice w indeksowaniu np. nowo utworzonego rozwiązania $\mathbf{x}_i$: w CMA-ES w linii 7 na Rysunku 2.2 ma ono indeks (t) , co jest zgodne z intuicją, ponieważ t reprezentuje aktualny krok czasowy, tj. aktualną iterację pętli głównej, natomiast w DE w liniach 13 i 15 na Rysunku 2.4, w CMA-DE w linii 16 na Rysunku 3.1 oraz w DES w linii 20 na Rysunku 3.2 $\mathbf{x}_i$ ma indeks $(t+1)$. Taka konwencja sprawia dodatkową trudność w czytaniu i porównywaniu ze sobą pseudokodów oraz w analizie wzorów. Może być też „błędogenna”, tj. łatwo o niekonsekwencję.

Ta rozbieżność w stosowaniu indeksów i myśleniu o nich mogła też być przyczyną niezgodności we wzorze 2.10, str. 19. W tym wzorze na macierz kowariancji dla generacji $t+1$ drugi i trzeci składnik sumy ma indeks (t) , natomiast w publikacji „The CMA Evolution Strategy: A Tutorial” (arXiv:1604.00772v2 [cs.LG] 10 Mar 2023) we wzorze na (30), str. 18, w drugim i trzecim składniku sumy Hansen stosuje indeksy $(t+1)$.

Scalanie w jeden tekst pseudokodów i opisów kilku algorytmów nie poszło idealnie nie tylko z powodu indeksu (t) . W pseudokodach algorytmów nie ma spójnego nazewnictwa funkcji: CMA-ES ma funkcje *inicjuj* i *oceń*, CMA-DE — *inicjacja* i *ewaluacja*, natomiast dla DE i DES funkcje nie zostały przetłumaczone na polski i znajdujemy tam *initialize* i *evaluate*. W linii 6 na Rysunku 3.1 oraz w linii 6 na Rysunku 3.2 symbol $\mathbf{x}_i$ ma indeks górny (1) zamiast (t) . Ponadto, w jednym przypadku komentarz do linii pseudokodu nie jest chyba we właściwym miejscu tekstu: opis listy czterech składowych sumy dającej wektor różnicowy $\mathbf{d}_i^{(t)}$ ze stron 50 i 51, który, jak z kontekstu wynika, ma dotyczyć linii 12–15 na Rysunku 3.1, dotyczy raczej linii 16–19 na Rysunku 3.2. Można tak sądzić, ponieważ dla Rysunku 3.1 nie zgadza się kolejność opisywanych składowych, a także numery generacji, z których brane są wektory i które pasują za to do Rysunku 3.2.

Brakuje mi także kilku zdań komentarza do współczynników wagowych składników sumy dającej wektor różnicowy $\mathbf{d}_i^{(t)}$ w pseudokodzie CMA-DE, linie 12–15 (np. z czego wynikają wartości $\sqrt{\frac{c_1}{\alpha c_{cov}}}$, $\sqrt{\frac{c_\mu}{\alpha c_{cov}}}$, $\sqrt{\frac{c_\mu}{2\alpha c_{cov}}}$ oraz $(1 - c_{cov})^{t/2}$), a także współczynników wagowych składników podobnej sumy w pseudokodzie DES, linie 16–19.

Zamiast frazy „DES używa prostej idei średniej kroczącej” (str. 54) napisałbym „DES używa idei prostej średniej kroczącej”.

Niektóre pozycje bibliograficzne, np. [19] (DOI: 10.1145/1570256.1570333), [20] (arXiv:1604.00772) oraz [21] (arXiv:1605.03560v1) mają niekompletne dane bibliograficzne. W [35] cytowane czasopismo ma nazwę *Dr. Dobb's Journal*. W [39] brakuje adresu strony www, natomiast artykuł [40] został rzeczywiście opublikowany i stało się to w 2018 (DOI: 10.1109/TEVC.2018.2855049).

Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Praca jest kompletna i ciekawa. Słabe strony wymienione poniżej mają charakter dyskusyjny i nie zmieniają pozytywnego obrazu rozprawy.

Pierwsza uwaga dotyczy jeszcze jednego rozdziału, który zwykle występuje w pracach doktorskich dotyczących nowych metod optymalizacji heurystycznej. Mam na myśli rozdział, w którym opisane są zastosowania tych metod lub rozszerzeń potwierdzające praktyczne korzyści z korzystania z nich. Autor najprawdopodobniej dysponuje takim materiałem, mianowicie w swojej publikacji [30] opisuje zastosowania algorytmu DES do uczenia głębokich sieci neuronowych. Autor cytuje [30] w Podsumowaniu pra-

cy, ale ogranicza się do jednego ogólnikowego zdania. Warto byłoby opowiedzieć więcej o tych wynikach.

Brakuje mi też w pracy akapitu (np. w Podsumowaniu) wymieniającego wprost samodzielny i oryginalny dorobek autora, tj. zawierającego listę tych składowych, które zostały zaproponowane na poszczególnych etapach. Stwierdzenie tylko o tym, że zaproponowana została nowa metoda, jest prawdziwe, ale ogólnikowe.

Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca wpisuje się w dziedzinę nauk technicznych: obejmuje swoim zakresem badania nad podnoszeniem efektywności heurystycznych metod optymalizacji. Proponowana nowa metoda została pozytywnie zweryfikowana podczas badań eksperymentalnych na bogatym zbiorze zadań benchmarkowych. Ze względu na obszar zastosowań nowej metody i na zakres przeprowadzonych eksperymentów, uzyskane wyniki należy uznać za użyteczne dla nauk technicznych.

Konkluzja końcowa

Podsumowując stwierdzam, że tematyka rozprawy jest aktualna i ważna, rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu znalezienia metody optymalizacyjnej, w której procesy adaptacji punktu środkowego oraz macierzy kowariancji w kolejnych populacjach pracy algorytmu są modelowane identycznie jak w CMA-ES w konsekwencji pozwalając osiągnąć podobnie wysoką efektywność optymalizacji, jednak przy znacząco niższym nakładzie obliczeniowym. Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Jagodzińskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) z późniejszymi zmianami w brzmieniu z dnia 15 września 2017 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789.), zgodnie z Art. 175. 1. Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 r. poz. 1669). Wnoszę o dopuszczenie autora do dalszych etapów postępowania o nadanie tytułu doktora.



dr hab. inż. Krzysztof Trojanowski