

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Mateusza Zaborskiego

zatytułowanej:

Efektywne zastosowania metamodeli w algorytmach populacyjnych przeznaczonych do rozwiązywania problemów optymalizacji ciągłej

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Rozprawa dotyczy zastosowania metamodeli w algorytmach populacyjnych przeznaczonych do rozwiązywania problemów optymalizacji ciągłej. W szczególności rozważane jest zastosowanie metamodeli w wybranych algorytmach populacyjnych do inicjalizacji populacji początkowej, lokalnej optymalizacji rozwiązań w optymalizacji taniej, preselekcji rozwiązań w optymalizacji semikosztownej oraz rekurencyjnej estymacji parametrów metamodelu.

Algorytmy populacyjne powszechnie uznawane są za bardzo skuteczne metody rozwiązujące różne problemy optymalizacyjne (w tym praktyczne i niekoniecznie ciągłe). Wsparcie wybranych algorytmów metamodelem odwzorowującym funkcję celu pozwala na zastąpienie jej kosztownej ewaluacji wartością przybliżoną, co dla pewnych klas złożonych problemów może być dosyć istotne. W konsekwencji możliwe jest ograniczenie liczby wykonanych przez algorytm ewaluacji funkcji celu lub poprawa otrzymanego rozwiązania przy określonym budżecie optymalizacji. Zaproponowana tematyka badawcza jest bez wątpienia bardzo ciekawa i ważna; warto także wskazać na jej spory potencjał praktycznego zastosowania. Ponadto nawet pobieżny przegląd najnowszej literatury ujawnia duże (i niesłabnące od lat) zainteresowanie algorytmami populacyjnymi wspieranymi metamodelem.

2. Wkład autora

W swojej pracy badawczej autor skupia się na zastosowaniach metamodeli w algorytmach populacyjnych rozwiązujących czarnoskrzynkowe problemy optymalizacji ciągłej z jedną funkcją celu. Ponadto biorąc pod uwagę koszt ewaluacji funkcji celu i jej założony wpływ na budżet optymalizacji autor rozważa optymalizację taną, kosztowną oraz wprowadza pojęcie optymalizacji semikosztownej.

Główne wyniki uzyskane przez autora zostały zaprezentowane w rozdziałach 5, 6 i 7. Wyniki te zostały wcześniej opublikowane w pracach [221], [244], [245], [164], [241], [165], [246], [243] oraz [242] (w trakcie druku). Warto podkreślić, że prace te zostały opublikowane

w uznanych czasopismach, jak *Applied Soft Computing* [200 pkt. MEiN] oraz materiałach konferencyjnych renomowanych konferencji, jak PPSN (*Parallel Problem Solving from Nature*) czy GECCO (*Genetic and Evolutionary Computations*) [po 140 pkt. MEiN].

Efektom zrealizowanych przez autora prac jest opracowanie pięciu algorytmów populacyjnych wykorzystujących metamodel w postaci regresji wielomianowej: M-GAPSO, SHADE-LM, LQ-R-SHADE, psLSHADE oraz rmmLSHADE.

Wkład autora w rozwój algorytmów populacyjnych wspieranych metamodelem dotyczy głównie następujących obszarów:

- Opracowanie **mechanizmu inicjalizacji metamodelem** pozwalającego na wygenerowanie niewielkim kosztem początkowej populacji rozwiązań w interesującym obszarze przestrzeni rozwiązań.

Zaproponowany mechanizm został zastosowany w algorytmach M-GAPSO, SHADE-LM oraz LQ-R-SHADE (wspomnianych poniżej).

- Wykorzystanie **lokalnej optymalizacji metamodelem** jako mechanizmu poprawiającego wyniki algorytmów populacyjnych w optymalizacji taniej.

W zaproponowanym podejściu metamodel jest estymowany w oparciu o zbiór uczący złożony z rozwiązań poddanych ewaluacji w poprzednich iteracjach algorytmu wraz z odpowiadającą im wartością funkcji celu. Optymalizacja takiego metamodelu prowadzi do wyznaczenia nowego położenia rozpatrywanego osobnika z populacji.

Zaproponowany mechanizm znalazł zastosowanie w algorytmach M-GAPSO oraz SHADE-LM. Pierwszy z nich jest rozwinięciem algorytmu GAPSO wykorzystującym metamodel oparty na dwóch postaciach regresji wielomianowej (kwadratowej i ogólnej), którego parametry są estymowane metodą najmniejszych kwadratów. Drugi z przedstawionych algorytmów jest rozwinięciem algorytmu R-SHADE czyli bazowego algorytmu opartego na idei adaptacyjnej ewolucji różnicowej SHADE wzbogaconego o dodatkowy mechanizm restartów. Zaproponowany algorytm bazuje na wykorzystaniu kaskady dwóch metamodeli: kwadratowej regresji wielomianowej oraz kwadratowej regresji wielomianowej z interakcjami. Z uwagi na fakt, że metamodel uczony jest w oparciu o bieżącą populację, to w odróżnieniu od swojego poprzednika nie ma już potrzeby korzystania z archiwum próbek.

- Wykorzystanie **preselekcji rozwiązań za pomocą metamodelu** jako mechanizmu poprawiającego wyniki algorytmów populacyjnych w optymalizacji semikosztownej.

Preselekcja rozwiązań na podstawie wartości metamodelu ma za zadanie dokonać ewaluacji tylko najbardziej obiecujących rozwiązań z populacji, a zaniechać ewaluacji pozostałych rozwiązań.

Zaproponowany mechanizm preselekcji rozwiązań został zastosowany w algorytmach LQ-R-SHADE, psLSHADE oraz rmmLSHADE. Pierwszy z nich jest rozszerzeniem algorytmu R-SHADE o mechanizm lokalnej preselekcji rozwiązań wykorzystujący kaskadę metamodeli (liniową regresję wielomianową, kwadratową regresję wielomianową oraz kwadratową regresję wielomianową z interakcjami). Algorytm psLSHADE jest

rozszerzeniem algorytmu L-SHADE (SHADE z liniową redukcją rozmiaru populacji) o mechanizm preselekcji osobników wykorzystujących metamodel w postaci kwadratowej regresji wielomianowej z interakcjami. Algorytm rmmLSHADE także stanowi rozwinięcie algorytmu L-SHADE, w którym wykorzystano metamodel w postaci kwadratowej regresji wielomianowej z interakcjami, a sama preselekcja rozwiązań jest realizowana globalnie. Cechą charakterystyczną tego podejścia jest estymacja parametrów metamodelu po każdej ewaluacji funkcji celu z wykorzystaniem rekursywnego filtra najmniejszych kwadratów.

- Zastosowanie **rekurencyjnej estymacji parametrów metamodelu** pozwala uniknąć przechowywania oraz cyklicznego aktualizowania typowego zbioru uczącego, który dla metamodelu w postaci kwadratowej regresji wielomianowej znacząco rośnie wraz ze wzrostem liczby wymiarów. W tym podejściu klasyczna estymacja parametrów metamodelu metodą najmniejszych kwadratów zostaje zastąpiona algorytmem adaptacyjnym wykorzystującym rekursywny filtr najmniejszych kwadratów (filtr RLS) cechujący się mniejszą złożonością obliczeniową.

Wykorzystanie filtra RLS w estymacji parametrów znalazło zastosowanie w algorytmie rmmLSHADE,

Przedstawione w rozprawie algorytmy populacyjne wspomagane metamodelem zostały poddane eksperymentalnej ewaluacji z wykorzystaniem zbiorów testowych z grupy CEC oraz COCO, a uzyskane wyniki dogłębnie przeanalizowane i skomentowane.

Opisane osiągnięcia stanowią niewątpliwie znaczący wkład do stanu wiedzy w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

3. Poprawność

Niezależnie od ogólnej pozytywnej oceny rozprawy podczas jej lektury nasuwa się szereg uwag o charakterze dyskusyjnym lub krytycznym.

- W rozprawie autor posługuje się skrótami, z których część jest polskojęzyczna (np. APWM – *Algorytm Populacyjny Wspierany Metamodelem*, RW – *Regresja Wielomianowa*), a część anglojęzyczna (np. DE – *Differential Evolution*, PSO – *Particle Swarm Optimization*). Przydałoby się to uspołnić.
- Na Liście skrótów (str. 12) błędnie przetłumaczono skrót MNK czyli Metoda Najmniejszych Kwadratów jako *Multilayer Perceptron*.
- W rozdziale 1.2 (str. 17) autor określa, co rozumie pod pojęciem efektywnego zastosowania metamodelu w algorytmie populacyjnym. Nasuwa się jednak pytanie, czy cecha numer 4 takiego zastosowania („Cechuje się akceptowalnym narzutem obliczeniowym ...”) nie jest jednak podrzędna w stosunku do cechy numer 1 („Osiąga zadowalające wyniki”)?
- W rozdziale 1.3 (str. 18) autor definiuje cztery hipotezy badawcze, z czego dwie pierwsze dotyczą zastosowania metamodeli w algorytmach populacyjnych w optymalizacji taniej oraz semikosztownej. Ponieważ podział na optymalizację tanią i semikosztowną zależy od przyjętych wartości progowych czasu ewaluacji funkcji celu i jest w gruncie rzeczy

subiektywny, to nasuwa się pytanie, w jakim stopniu wrażliwa jest spełnialność sformułowanych hipotez badawczych na zmiany tych wartości progowych?

- W rozdziale 2.2 (str. 26) autor definiuje ciągłą przestrzeń przeszukiwań jako $S \in \mathbb{R}^D$. Tutaj raczej powinno być $S \subset \mathbb{R}^D$ (czyli S jest podzbiorem, a nie punktem w wielowymiarowej przestrzeni).
- W rozdziale 2.4.2 (str. 30) autor opisuje dwa alternatywne podejścia odnoszące się do miary zużywanych w optymalizacji zasobów: „scenariusz ustalonego kosztu” oraz „scenariusz ustalonego celu”. Pierwszy z nich zakłada określoną z góry liczbę ewaluacji funkcji celu, natomiast drugi – pożądaną jakość rozwiązania. Niezależnie od wybranego scenariusza mamy do czynienia z klasyczną redukcją problemu 2-kryterialnego do problemu 1-kryterialnego (poprzez zastąpienie jednego z celów ograniczeniem). Mimo deklaracji autora, że w swojej rozprawie zajmuje się wyłącznie optymalizacją z jedną funkcją celu, to ciekawe byłoby rozwiązanie rozważanych problemów jako 2-kryterialnych i przeanalizowanie uzyskanych wyników na froncie *pareto*.
- W rozdziale 3.1 (str. 44) autor stwierdza: „Niemniej, metody takie jak programowanie liniowe [93], programowanie nieliniowe [141], optymalizacja wypukła [28] oraz metody gradientowe [239, 190] mogą stanowić preferowaną technikę rozwiązującą w sytuacji, gdy problem nie jest czarnoskrzynkowy”. Programowanie liniowe, programowanie nieliniowe czy optymalizacja wypukła to raczej charakterystyki problemów, a nie metody ich rozwiązywania.
- W rozdziale 3.2 (str. 45) autor stwierdza: „Istnieje twierdzenie, które mówi że nie ma darmowych obiadów [230], tzn. że znalezienie ogólnie najlepszej metaheurystyki nie jest możliwe. Mimo to, badania eksperymentalne dowodzą, że wybór metaheurystyki właściwej dla określonej klasy problemów pozwala na uzyskanie nieprzeciętnych wyników [113].” Drugie zdanie w przytoczonym cytacie sugerowałbym rozpocząć od „Dlatego”, a nie od „Mimo to”.
- W pracy można znaleźć sporą liczbę błędów językowych, w tym m.in. „... metaheurystyki ...” (str. 45), „... normy Euklidesowskiej ...” (str. 57), „Wybranych problemy inżynierskich” (str. 29), „... algorytmy o oparte o adaptacyjną ewolucję różnicową” (str. 41).

4. Wiedza kandydata

Opis istniejącego stanu wiedzy kandydat zawarł w rozdziałach 3 i 4. Mimo, że praca oparta jest na kilku opublikowanych artykułach kandydat zdecydował się na napisanie pełnej rozprawy, a nie podsumowanie cyklu publikacji. Zaletą przedstawionej rozprawy jest bez wątpienia pełniejszy przegląd literatury w stosunku do umieszczanego w typowych publikacjach naukowych (252 pozycje).

Odnoszę wrażenie, że kandydat skupił się przede wszystkim na pracach bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy. Tymczasem elementem oceny rozprawy doktorskiej jest także ocena bardziej ogólnej wiedzy kandydata w swojej dyscyplinie. Dlatego uważam, że wskazane byłoby przedstawienie w pracy, choć skrótowo, szerszego kontekstu badań nad problemami i zastosowaniami optymalizacji.

5. Inne uwagi

Autor rozprawy w rozdziale 8.4 deklaruje swój autorski wkład w dziedzinę. Niemniej odnoszę wrażenie, że przedstawiona tam informacja mogłaby być bardziej szczegółowa, np. uzupełniona o procentowy udział autora w zrealizowanych pracach. Jest to szczególnie istotne, z uwagi na fakt, że wszystkie przedstawione w rozprawie publikacje są wieloautorskie, co utrudnia precyzyjną ocenę indywidualnego wkładu autora.

6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dn. 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 2021, poz. 478 ze zm.), moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

- A. Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problem naukowego? (wybierz jedną opcję stawiając znak **X**)

Zdecydowanie
TAK

Raczej TAK

Trudno
powiedzieć

Raczej NIE

Zdecydowanie
NIE

- B. Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja?

Zdecydowanie
TAK

Raczej TAK

Trudno
powiedzieć

Raczej NIE

Zdecydowanie
NIE

- C. Czy kandydat ma umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

Zdecydowanie
TAK

Raczej TAK

Trudno
powiedzieć

Raczej NIE

Zdecydowanie
NIE

Sformułowane w niniejszej recenzji uwagi krytyczne nie umniejszają w żaden sposób dorobku autora, który osiągnął postawiony cel, wykazując się przy tym niezbędnymi umiejętnościami oraz wiedzą potrzebną do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z wykorzystaniem metod informatycznych. Stwierdzam tym samym, że w mojej ocenie rozprawa spełnia warunki ustawowe stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie jej autora do dalszego toku przewodu doktorskiego.

Piotr Zielniewicz