

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Patryka Filipiaka
pt. “Proactive Evolutionary Algorithms for Dynamic
Optimization Problems”

1 Tematyka rozprawy

Rozprawa dotyczy wybranych zagadnień związanych z problemami optymalizacji zmiennymi w czasie oraz algorytmami ewolucyjnymi (*evolutionary algorithms*), co umiejscawia ją w obszarze metaheurystyk i obliczeń ewolucyjnych (ang. *evolutionary computation*), stanowiących część sztucznej inteligencji (*artificial intelligence*) i inteligencji obliczeniowej (*computational intelligence*), które są z kolei nierozzerwalnie związane z informatyką.

Prace w tym obszarze stanowią istotną część badań prowadzonych w obrębie sztucznej inteligencji i inteligencji obliczeniowej, i przyczyniły się do wypracowania algorytmów i modeli które okazują się wysoce przydatne w rozwiązywaniu problemów rzeczywistych (np. problemów optymalizacji kombinatorycznej i uczenia maszynowego). Jednocześnie problemy optymalizacji dynamicznej (zmiennie w czasie) są szeroko obecne w wielu zastosowaniach praktycznych. W tym świetle tematykę rozprawy należy uznać za aktualną, nietrywialną, i znaczącą zarówno z teoretycznego jak i praktycznego punktu widzenia.

2 Ocena wkładu oryginalnego

Za główne oryginalne przyczynki Autora uważam następujące elementy pracy.

1. Autorski przegląd literatury przedmiotu (Rozdział 2).
2. Zaproponowanie podziału podejść do optymalizacji dynamicznej na podejścia przewidywania ocen (*anticipation of evaluations*), przewidywania położenia optimum (*anticipation of optima locations*) oraz przewidywania zmian krajobrazu przystosowania (*anticipation of landscape changes*) (Rozdział 3).
3. Propozycję trzech rodzin algorytmów wpisujących się w wyżej wymienione klasy podejść, tj. odpowiednio IDA-ARIMA, IDEA-FPS oraz UMDA-MI (Rozdziały 4-6).

4. Implementację programistyczną zaproponowanych algorytmów.
5. Empiryczną demonstrację skuteczności zaproponowanych algorytmów na pokaznym zbiorze problemów testowych (benchmarków) (Rozdziały 4-6)
6. Studium przypadku dotyczące wybranego problemu kinematyki odwrotnej (Rozdział 7)

3 Ocena treści rozprawy

Praca prezentuje rodzinę nowych, nietrywialnych i dobrze uzasadnionych metod. Badania opisane w pracy przeprowadzone zostały w sposób metodologicznie poprawny (z jedynie niekrytycznymi wyjątkami które wyszczególniam dalej). Ich realizacja wymagała znacznego wysiłku i niemałych umiejętności naukowych i praktycznych. Wyniki są zachęcające i dają nadzieję na owocną kontynuację.

Za istotną zaletę pracy uważam fakt iż Autor proponuje algorytmy które są merytorycznie nowatorskie, ale jednocześnie próbuje utrzymać pod kontrolą stopień ich komplikacji, i gdzie możliwe korzysta z dobrze ugruntowanych rozwiązań (np. metoda ARIMA). W ten sposób unika on obecnej niestety w obszarze inteligencji obliczeniowej tendencji do proponowania nadmiernie skomplikowanych podejść (np. niektórych hybryd), które trudno jest uzasadnić i przeanalizować. Natomiast w podejściach których znaczny stopień komplikacji jest trudny do uniknięcia (np. IDEA-FPS, Algorithm 5.2), zdecydowana większość decyzji projektanckich wydaje się dobrze uzasadniona.

Szczególnie wysoko oceniam część eksperymentalną pracy (Rozdziały 4-7), gdzie Autor nie tylko przetestował podstawowe wersje zaproponowanych strategii, ale także wprowadził i zweryfikował wiele interesujących ich wariantów. Analiza wyników jest rzetelna i nietuzinkowa, a dyskusja i interpretacja wyników (m.in. sekcje 4.3.3, 5.3.2, 5.3.3) zdradza bardzo dobrą znajomość problematyki. Analizy ilustrowane są profesjonalnymi i pomocnymi wizualizacjami (np. Rys. 4.1, 4.2, 5.2, 6.1, także Table 6.1). Dynamiczny problem kinematyki odwrotnej i jego rozwiązanie w Rozdziale 7 są bardzo interesujące i potencjalnie otwierają drogę do wielu zastosowań praktycznych. Całość tych analiz daje bardzo interesujący wgląd w naturę problemów optymalizacji dynamicznej (DOP) oraz stanowi bogaty zasób wskazówek o charakterze praktycznym odnośnie stosowania algorytmów proponowanych przez Autora i podobnych.

Rozdziały i sekcje podsumowujące, w szczególności Sekcja 8.2, jednoznacznie wskazują że Autor ma bardzo dobrą intuicję odnośnie dalszych możliwych prac w tym obszarze tematycznym.

Bardzo dobre wrażenie z lektury pracy nie powstrzymuje mnie jednak przed sformulowaniem kilku **uwag o charakterze polemicznym**.

1. Autor ma pewną tendencję do pomijania stwierdzeń które nie muszą być oczywiste dla czytelnika. Np. brak jest prezentacji 'kanonicznego' algorytmu ewolucyjnego (do którego Autor wydaje się miejscami odwoływać terminem 'Simple GA', np. s. 15). Najwyraźniej Autor założył że jest to pojęcie podstawowe w rozważanym przez niego

obszarze, z czym nie do końca się zgadzam (mamy np. algorytmy generacyjne i steady-state, algorytmy ewolucyjne i strategie ewolucyjne, etc.).

Autor nie podjął się także próby możliwie precyzyjnego zdefiniowania czym jest 'environmental change' i 'state of environment'. Samo pojęcie 'environment' też nie jest ściśle zdefiniowane. W mojej ocenie można było tego problemu uniknąć nie wprowadzając tych terminów: z matematycznego punktu widzenia mamy po prostu do czynienia z sytuacją w której optymalizowana funkcja jest zależna od czasu.

Pojęcie błędu (*error*, $e_B(i)$, s. 49) nie jest formalnie zdefiniowane. Domyślam się że jest to odległość rozwiązania od (najbliższego?) rozwiązania optymalnego. Precyzyjna definicja tego pojęcia jest niezbędna, m.in. z racji istnienia różnych metryk.

2. Praktycznie wszystkie wyniki eksperymentalne dotyczą algorytmów stochastycznych, i Autor słusznie przeprowadza wiele ich uruchomień (zazwyczaj 50) celem wyestymowania wartości oczekiwanych miar oceny. Jednak wartości średnie tych miar, prezentowane np. w Tabelach 4.2, 5.2 czy 6.3, nie są poddawane żadnej analizie statystycznej. Pewną namiastką takiej analizy mogłoby być podanie przedziałów ufności – niestety ich także nie można doszukać się w pracy. Uzasadnienie tego istotnego braku – o ile istnieje – powinno znaleźć się w pracy.

3. Z treści rozprawy klarownie wynika że Autor ma świadomość zróżnicowanych kosztów obliczeniowych proponowanych algorytmów. Niestety ten – jakże istotny w kontekście problemów dynamicznych – aspekt nie jest poddany analizie w pracy.

4. Mam też pewne zastrzeżenia do terminologii. Praca, na szczęście w dość umiarkowanym stopniu, wpisuje się w - raczej zwodniczą w mojej opinii - tendencję do nadmiernego polegania na 'terminologii inspirowanej biologicznie'. Choć sam nie jestem przeciwny sięgania po pewne inspiracje czy analogie do biologii czy innych nauk, uważam że środka tego należy używać z umiarem, jeśli nie jedynie okazyjnie. Nadmierne poleganie na terminach biologicznych raczej przeszkadza niż pomaga w przekazywaniu treści, zwłaszcza jeśli towarzyszą tej praktyce synonimy. Dlaczego używać terminu 'chromosome' lub 'individual' skoro mamy 'candidate solution' albo po prostu 'solution'? (s. 18, 19, i inne; Autor używa też jeszcze innego synonimu 'vectors', np. na s. 67). Podobnie 'gene' zamiast 'variable' (s. 19)? Co właściwie oznacza termin 'expression of genes' na s. 20? W moim doświadczeniu nadmierne wykorzystywanie synonimów, zwłaszcza tych inspirowanych biologicznie, sprzyja brakowi precyzji. Nawiasem mówiąc negatywne następstwa sięgania po analogie i terminologię biologiczną zostały znakomicie wyłożone w znanej już dziś szeroko pracy Kennetha Soerensena „Metaheuristics – The Metaphor Exposed”, której lekturę gorąco polecam.

Z drugiej strony zaznaczam że dla osoby doświadczonej w obszarze obliczeń inspirowanych biologicznie, powyższy problem nie utrudnia zasadniczo lektury pracy. Rozumiem też że w niektórych przypadkach intencją Autora było np. dostosowanie się do terminologii innych, cytowanych prac.

5. Synonimy utrudniają też zrozumienie niektórych aspektów prezentowanych algorytmów. Na przykład w prezentowanych pseudokodach często pojawia się funkcja 'Reduce()' (np. Algorytm 2.3 na s. 17). Jednak w opisie algorytmów w tekście głównym czasownik 'reduce' czy podobne sformułowanie nie pojawia się prawdopodobnie ani razu.

W tym i podobnych przypadkach pożądane jest odwołanie się do konkretnej nazwy funkcji w pseudokodzie, co Autor robi niestety bardzo rzadko. Dobrą alternatywną praktyką jest numerowanie linii pseudokodu i odwoływanie się do tych numerów.

6. W niektórych miejscach pracy brakuje bardziej klarownego wskazania autorstwa przekazywanych treści. Np. klasyfikacja benchmarków na str. 35 jest interesująca i wartościowa, ale nie jest jasne czy pochodzi od Autora. Podobnie, Autor przyznaje że AOL jest rozwinięciem idei Hatzakis'a i Wallace'a. W tym kontekście byłoby pożądane bardziej wyraźne podkreślenie w jakim zakresie pozostałe dwa podejścia pochodzą od Autora.

7. Tytułując sekcję 3.1 'Anticipation strategies', Autor pośrednio zasugerował że omawiane będą pewne *ogólne strategie* podejść do problemów DOP. Jednak wiele komponentów proponowanych 'strategii' jest zaskakująco *konkretna*. Np. podejście AoE wykorzystuje modele ARIMA do predykcji wartości funkcji celu. Literatura analizy szeregów czasowych i prognozowania obfituje w wiele innych metod. Czy Autor uważa że poleganie na tej konkretnej metodzie stanowi esencję strategii AoE? Wydaje mi się że termin 'strategia' jest stosowny dla pewnego ogólnego przepisu/metody, a nie dość konkretnego algorytmu.

8. W pracy zdarzają się sformułowania z którymi fundamentalnie się nie zgadzam (co oczywiście samo w sobie nie jest niczym złym, kontrowersje 'napędzają' naukę). Chodzi mi głównie o następujące dwie uwagi:

- 'Measuring a performance of a given EA applied to a certain DOP benchmark can be either straightforward and accurate or complex and imprecise.' (s. 53) Dlaczego tylko te kombinacje cech są wg Autora możliwe? Gdyby tak było, oczywistością byłoby zawsze wybieranie miar oceny które są proste i dokładne.
- Osobiście jestem zdania że często dyskutowany w literaturze podział na *fazę* eksploracji i eksploatacji jest mitem. O ile same *terminy* eksploracja i eksploatacja są zasadne i słuszne jest twierdzić że algorytm ewolucyjny realizuje jedno i drugie, to w szczególności nie widzę żadnych przesłanek natury teoretycznej ani eksperymentalnej dla istnienia wyraźnie wydzielonych *faz*, co autor wydaje się sugerować na s. 13. Algorytm ewolucyjny po prostu realizuje losowe równoległe przeszukiwanie. W przebiegach wartości funkcji celu można dopatrywać się jakościowych zmian, ale ich ścisła charakteryzacja jest trudna. Chętnie poznam opinię Autora na ten temat w trakcie obrony pracy.

4 Ocena redakcji rozprawy

Praca została przygotowana w języku angielskim, ma objętość 161 stron i składa się z ośmiu rozdziałów, dwóch załączników, oraz listy literatury. Tekst pracy jest niezależny w tym sensie że do jej zrozumienia wystarczające są podstawowe pojęcia z zakresu matematyki i informatyki. Struktura pracy jest logiczna i zasadniczo dobrze przemyślana. Kolejne rozdziały i sekcje w większości przypadków logicznie następują po sobie. Dyskusyjne wydaje się jedynie umieszczenie sekcji 2.4 i 2.5 (benchmarki i miary oceny) po

przełądzie podejść w sekcjach 2.2 i 2.3. Moim zdaniem bardziej logiczna byłaby prezentacja np. miar oceny bezpośrednio po definicji problemu, bo taki porządek ułatwiłby czytelnikowi zrozumienie celów przyświecających autorowi. Poza tym miary oceny warto przedstawiać przed prezentacją benchmarków, bo łatwiej jest wówczas umotywić taką a nie inną konstrukcję tych drugich.

Praca napisana jest zrozumiałą i dobrą angielszczyzną. Niedociągnięcia językowe, błędy stylistyczne i literówki są stosunkowo nieliczne (np. scenerio → scenario, cannonical → canonical) i nie utrudniają zrozumienia treści pracy, którą czyta się raczej wartko.

Za drobną wadę kompozycji pracy uważam brak detalicznej listy celów szczegółowych w rozdziale Introduction. Jest to jednak złagodzone dość klarownym wymienieniem głównych przyczynków pracy w tym samym rozdziale.

Pewne decyzje prezentacyjne podjęte przez Autora wydają się dość arbitralne. Na przykład jaka była motywacja dla zaprezentowania tych a nie innych algorytmów w postaci pseudokodu w sekcjach 2.2 i 2.3?

Prezentacja miar oceny (sekcja 2.5, s. 53 i następne) mogłaby być dużo bardziej przystępna gdyby towarzyszyła jej prezentacja graficzna (wykresy funkcji celu w czasie).

Zrozumienie różnicy pomiędzy *Anticipation of evaluations* (AoE, 3.1) a *Anticipation of landscape changes* (ALC, 3.3) przyszło mi z pewnym trudem. Rozumiem teraz że w drugim przypadku celem jest stworzenie kompletnego modelu fitness landscape, podczas gdy w pierwszym estymowane są jedynie oceny w wybranych punktach przestrzeni rozwiązań. W takim razie pierwsze podejście jest szczególnym przypadkiem drugiego, i zaskakujące jest że Autor separuje te podejścia od siebie - zupełnie nie powiązanych moim zdaniem - podejściem *Anticipation of optima locations* (AOL, 3.2), które pracuje w przestrzeni zmiennych decyzyjnych.

Zdarzają się drobne niekonsekwencje w formalizmach. Np. w sekcji 3.1.2, gwiazdka w górnym indeksie wykorzystywana jest zarówno do oznaczenia globalnego optimum, jak i najlepszego rozwiązania w populacji.

Czytelność pracy niektórych miejscach uległaby poprawie gdyby np. wprowadzić skróty podejść, np. strategii przewidywania. Np. w zdaniu „Similarly to the first approach, the proposed ARIMA model allows for a quick adaptability to the changing environment.” na s. 61, nie jest jasne co autor ma na myśli przez 'first approach'.

5 Konkluzja końcowa

Wymienione powyżej uwagi krytyczne odnośnie treści i prezentacji pracy nie podważają głównych konkluzji rozprawy i mojej wysokiej jej oceny, zarówno od strony merytorycznej jak i prezentacyjnej. Uważam że cele postawione przez Autora pracy zostały osiągnięte i przedstawione w interesujący sposób. Problem badawczy rozważany w pracy ma istotne znaczenie poznawcze i praktyczne. Obrona przez Autora metodyka jest zasadna a zaproponowane algorytmy skuteczne i stosunkowo generyczne, a zatem potencjalnie mogą być zastosowane w wielu problemach optymalizacji nie rozważanych w pracy.

Autor wykazał się wysokimi umiejętnościami zarówno od strony naukowej (stawianie i weryfikowanie hipotez, dobór metod, interpretacja wyników eksperymentów obliczenio-

wych), warsztatowej (redakcja pracy i prezentacja wyników), oraz technicznej (projektowanie i implementacja oprogramowania oraz przeprowadzanie eksperymentów). Znajduje to także potwierdzenie w jego pokaźnym dorobku publikacyjnym, częściowo cytowanym w rozprawie.

Uważam że opiniowana rozprawa Pana mgr Patryka Filipiaka wyraźnie wykracza ponad poziom przeciętny i **spełnia warunki stawiane przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych w odniesieniu do rozpraw doktorskich, a zatem powinna być dopuszczona do publicznej obrony**. Z uwagi na nowatorski temat rozprawy i obszerność uzyskanych wyników, wnioskuję także o jej **wyróżnienie**.



(Krzysztof Krawiec)