

Recenzja osiągnięcia naukowego
“Analiza, rozwój i zastosowania wybranych algorytmów z rodziny
algorytmów ewolucyjnych”
autorstwa dr inż. Rafała Biedrzyckiego

Niniejszą recenzję przygotowałem w związku z powierzeniem mi przez Radę Naukową Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej roli recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Rafała Biedrzyckiego.

Charakterystyka osiągnięcia

Osiągnięciem przedłożonym przez dr Biedrzyckiego jest cykl publikacji zatytułowany "Analiza, rozwój i zastosowania wybranych algorytmów z rodziny algorytmów ewolucyjnych.". Cykl składa się z 10 prac (A1-A10) i obejmuje **trzy silnie powiązane ze sobą wątki tematyczne**: (i) analizę działania/dynamiki algorytmów ewolucyjnych, (ii) propozycje rozszerzeń tych algorytmów, oraz (iii) ich zastosowania do rzeczywistych problemów. Cykl jednoznacznie wpisuje się w dyscyplinę Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, a dokładniej w podobszary sztucznej inteligencji, algorytmów metaheurystycznych, optymalizacji i badań operacyjnych.

W pierwszym z wyżej wymienionych wątków Habilitant koncentrował się na teoretycznych i empirycznych analizach dynamiki zachowania algorytmów ewolucyjnych dla wielowymiarowych przestrzeni ciągłych, z naciskiem na stosowanie narzędzi które nie wymagają założeń zbyt odległych od realnych scenariuszy użycia metod. W pracy A1 skoncentrował się on na charakteryzacji położenia środka (centroidu) populacji aktualizowanej przy pomocy operatora mutacji, pod presją selekcyjną funkcji przystosowania. Nowatorskim przyczynkiem pracy jest pojęcie quasi-stabilności, rozumianej jako podobszar w przestrzeni rozwiązań w którym algorytm z wysokim prawdopodobieństwem pozostaje przez relatywnie długie sekwencje iteracji/generacji, czemu towarzyszą niewielkie zmiany wartości średnich i wariancji optymalizowanych zmiennych. Autorzy pracy wyprowadzili formuły charakteryzujące tę właściwość w funkcji parametrów procesu ewolucyjnego i wyodrębnił jakościowo różne scenariusze dynamiki. Pojęcie środka populacji jest także kluczowe dla drugiej z prac w tym wątku, tj. A4, gdzie dr Biedrzycki wykazał teoretycznie że monitorowanie charakterystyki tego punktu (obliczanego jako średnia lub mediana po populacji), tj. obliczanie wartości funkcji przystosowania w tym punkcie, pozwala poprawiać skuteczność/efektywność algorytmów.

Dokładniej, przeprowadzona analiza wykazała, że w średnim przypadku środek populacji zbiega się do optimum szybciej niż najlepszy osobnik w populacji. Zaobserwowane zależności pozostają w większości przypadków prawdziwe nawet jeśli uwzględnić dodatkowy nakład obliczeniowy wynikający z konieczności obliczenia wartości funkcji przystosowania w wyznaczonym środku populacji.

Kolejnym tematem badanym przez Habilitanta w tym wątku były ograniczenia w algorytmach ewolucyjnych stosowanych w optymalizacji ciągłej. W pracy A6 przebadał on wpływ stosowania kilkunastu różnych, znanych z wcześniejszej literatury, technik uwzględniania ograniczeń (a dokładniej korygowania/naprawiania rozwiązań kandydackich które je naruszyły, np. przez rzutowanie, zawijanie, re-próbkowanie, etc.) na 6-ciu różnych algorytmach optymalizacji, łącząc je 'krzyżowo' ze sobą i aplikując do syntetycznych problemów o różnych charakterystykach i wymiarowościach (liczbie zmiennych). Przedmiotem badań były tzw. ograniczenia kostkowe, tj. nakładane na poszczególne zmienne niezależnie. Jakościową konkluzją pracy była obserwacja, iż w większości przypadków wyposażenie ewolucyjnego algorytmu optymalizacyjnego w tak rozumiane korekcje pogarsza jego zbieżność. Dr Biedrzycki wyartykułował w tej pracy także kilka innych konkluzji dla konkretnych charakterystyk optymalizowanych funkcji oraz stosowanych metod obsługi naruszania ograniczeń, w tym pewne 'rekomendowane' kombinacje metod korekty z algorytmami, tj. takie które przekładają się na poprawę zbieżności, oraz konfiguracje 'odradzane'.

Praca A6 nie obejmowała swoim zakresem znanego algorytmu CMA-ES, bazującego na iteracyjnej adaptacji macierzy kowariancji, który w ostatniej dekadzie dowiódł swojej dominacji na szerokim spektrum problemów optymalizacji ciągłej i stał się niekwestionowanym punktem odniesienia dla wielu badań i zastosowań. Dr Biedrzycki zaadresował tę lukę w pracy A7, którą poświęcił wyłącznie zbadaniu technik obsługi ograniczeń (w sumie 22) w połączeniu z tym właśnie algorytmem. W wyniku przeprowadzonych prac, dotyczących zarówno problemów jedno- jak i wielomodalnych, wyciągnięto kilka interesujących i perspektywnie przydatnych w praktyce wniosków odnośnie użyteczności poszczególnych technik obsługi naruszania ograniczeń w połączeniu z CMA-ES, których część była nieoczywista, a nawet zaskakująca (lub/i kwestionująca dominujące praktyki, np. powszechne stosowanie projekcji Lamarckowskiej). Autor dokonał też kategoryzacji przebadanych konfiguracji stosownie do ich średniej skuteczności. Dodam że podsumowanie badań w pracy A7 jest szczególnie bogate i wieloaspektowe, tj. angażuje także inne metryki, w tym m.in. koszty obliczeniowe algorytmów.

Ostatnia praca w tym wątku cyklu, A9, koncentruje się na różnicach implementacyjnych algorytmów ewolucyjnych, w szczególności algorytmu CMA-ES. Dr Biedrzycki wykrył i zidentyfikował tam przyczyny obserwowanych (i jak się okazało bardzo częstych) różnic w zachowaniu różnych implementacji programistycznych tego algorytmu, oraz wypracował szereg rekomendacji skierowanych zarówno do programistów implementujących algorytmy, jak i eksperymentatorów oraz autorów artykułów naukowych je wykorzystujących. W ten sposób praca ta wpisuje się trafnie w palący problem replikowalności eksperymentów i badań naukowych, który staje się szczególnie naglący w ostatnich latach.

Drugim wątkiem tematycznym przedłożonego w cyklu są propozycje nowych wariantów algorytmów ewolucyjnych oraz rozszerzeń istniejących już algorytmów. W wątku tym Habilitant skoncentrował się na udoskonaleniach algorytmów ewolucji różnicowej (ang. differential evolution), jednego z bardziej znanych wariantów obliczeń ewolucyjnych stosowanych do w optymalizacji ciągłej. W pracy A5 zaproponował metodę RB-IPOP, oryginalne rozszerzenie metody IPOP-CMA-ES stosowanej dla zwiększenia efektywności CMA-ES na problemach wielomodalnych. Proponowana przez Autora metoda bazuje na jego wcześniejszych badaniach analitycznych (m.in. w pracy A4) wskazujących na przydatność centroidu populacji jako jej charakterystyki. Dr Biedrzycki wykorzystał tę właściwość do aktualizacji najlepszego rozwiązania na podstawie środka populacji, a także zaproponował nowy (względem IPOP) mechanizm restartowania optymalizacji w razie jej stagnacji. Analiza empiryczna wskazała na praktyczną przydatność proponowanych rozszerzeń.

W pracy A10 dr Biedrzycki przełożył część wyników badań analitycznych (głównie z prac A4 i A6) na ulepszenia metody ewolucji różnicowej. Objęły one zastępowanie środkiem populacji najbliższego nielepszemu osobnikowi z populacji, nowe kryterium restartu algorytmu bazujące na odległościach pomiędzy środkami populacji w kolejnych iteracjach oraz wykrywaniu 'oparcia się' populacji o ograniczenia (dla problemów gdzie z góry wiadomo że rozwiązanie optymalne nie leży na ograniczeniach), nowy sposób korygowania rozwiązań naruszających ograniczenia przez repróbkiwanie z (ponowne mutacje) rozwiązania rodzicielskiego, oraz (być może koncepcyjnie najciekawsze) rozszerzenie pozwalające na podział populacji na podgrupy algorytmem k-średnich w obecności problemów wielomodalnych. Zastosowane rozszerzenia, poza publikacją A10, zaowocowały wysokim 3-cim miejscem w znanym konkursie organizowanym przy konferencji CEC.

Ostatnim wątkiem cyklu są prace opisujące zastosowania wypracowanych przez dr Biedrzyckiego algorytmów, technik i wytycznych do rozwiązywania rzeczywistych problemów optymalizacji ciągłej. W pracy A2 Habilitant zastosował warianty algorytmów DE i CMA-ES do optymalizacji projektów/parametryzacji zwierciadeł półprzewodnikowych stosowanych m.in. w laserach piko- i femtosekundowych, co wymaga optymalizacji funkcji przystosowania opartej na symulatorze programistycznym i rozpiętej na wysokiej liczbie wymiarów przestrzeni przeszukiwania (przynajmniej 120). Oryginalnym przyczynkiem pracy było m.in. zaprojektowanie operatorów inicjalizacji populacji opartych na wiedzy dziedzinowej (m.in. wstępne projekty zwierciadeł). Badania przełożyły się także na wytworzenie jednego z zaprojektowanych zwierciadeł (tj. jego realizację rzeczywistą, a nie jedynie symulację), które potwierdziło adekwatność symulatora oraz modelu znalezionej w wyniku algorytmicznej optymalizacji.

Praca A3 z kolei ilustruje zastosowanie metod i wiedzy wypracowanej przez Habilitanta w estymacji parametrów modeli charakteryzujących histerezę magnetyczną dla materiałów anizotropowych. Autor przebadał i porównał ze sobą warianty algorytmu strategii ewolucyjnych, ewolucji różnicowej, oraz metody CMA-ES. Wyniki wskazały na najwyższą skuteczność wariantów ewolucji różnicowej, przy jednoczesnym zmniejszeniu wymaganych nakładów obliczeniowych o kilka rzędów wielkości.

W ostatniej pracy przedłożonej w tym wątku cyklu, A8, przedmiotem badań były złożone instalacje przemysłowe (magazyny chłodnicze), a celem optymalizacji było utrzymanie zadanej temperatury lub minimalizacja kosztów wymaganej przez nich energii elektrycznej, co jest problemem nietrywialnym z racji znacznej bezwładności układu. Rozważany problem jest de facto problemem sterowania, ponieważ zmienne decyzyjne kontrolowały tutaj włączanie i wyłączanie kompresora układu chłodzenia w poszczególnych momentach czasu. W pracy A8 dr Biedrzycki zastosował do optymalizacji tak zdefiniowanego układu zarówno algorytmy optymalizacji ciągłej wypracowane we wcześniej wymienionych pracach cyklu, jak i ewolucyjne algorytmy optymalizacji kombinatorycznej (algorytmy genetyczne) oraz metody uczenia maszynowego. Większość rozwiązań otrzymanych proponowanymi przez Habilitanta algorytmami pozwoliło wypracować rozwiązania znacząco przewyższające skutecznością heurystykę stosowaną uprzednią dla tego problemu.

Ocena osiągnięcia

Przedłożony cykl jest skupiony na tematyce ewolucyjnej optymalizacji ciągłej. Jego wyróżnikiem w mojej ocenie jest wnikliwy charakter artykułów wchodzących w jego skład (co przełożyło się także na dogłębność i szczegółowość przedłożonego autoreferatu), które układają się 'wertykalnie' w tym obszarze, tj. od analizy algorytmów (wątek 1) przez ich udoskonalenia (wątek 2) do zastosowań praktycznych (wątek 3). W pracach obecny jest silny wątek badań stosowanych, niemniej podparty dogłębnymi dociekaniem teoretycznymi i analitycznymi oraz umiejętnie stawianymi hipotezami oraz eksperymentami je weryfikującymi.

Prowadzone badania adresują aktualne tematy i wyzwania tego obszaru, w tym wyzwania związane z replikowalnością badań i eksperymentów. Optymalizacja skomplikowanych wielomodalnych funkcji o nieznanej postaci analitycznej, rozpiętych nad przestrzeniami zmiennych o wielu wymiarach, w obecności ograniczeń, nadal pozostaje nośnym obszarem badań, w którym algorytmy ewolucyjne stanowią wartościową kategorię podejść która zdecydowanie nie powiedziała jeszcze ostatniego słowa. W związku z tym uważam przedłożony cykl artykułów za aktualny i wnoszący wartościowe przyczynki zarówno do badań podstawowych w obszarze heurystycznej optymalizacji ciągłej, jak i do zastosowań praktycznych.

Dodam że szczególnie doceniam dbałość Habilitanta o rzetelność otrzymywanych wyników i wierność implementacji programistycznych względem prototypów algorytmów publikowanych w pracach naukowych, czego szczególnym wyrazem jest publikacja A9. Interesujące jest to że dr Biedrzycki przyjął tam niejako (moim zdaniem słuszną) praktykę identyfikowania metod optymalizacyjnych na podstawie ich implementacji programistycznych, a nie opisów w artykułach. Uważam że jest to słuszną odpowiedź na coraz częstszy zwyczaj cytowania implementacji/bibliotek programistycznych, a nie artykułów naukowych. Niezależnie od opinii środowisk naukowych o tej praktyce, nie ulega wątpliwości że jest ona coraz częstsza i ma pewne zalety.

Prace wchodzące w skład cyklu ukazały się w większości w dobrych i bardzo dobrych czasopiśmie (między innymi *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *Swarm and Evolutionary Computation*) i materiałach konferencyjnych renomowanych konferencji, np. *Parallel Problem Solving from Nature* (PPSN) oraz *Congress on Evolutionary Computation* (CEC). Większość z tych czasopiśmie i konferencji figuruje na liście MEiN z 70 lub więcej punktami, a 4 z nich ma 140 lub więcej punktów. Trzy z 10 przedłożonych prac (A5, A7, i A9) zostały przygotowane przez Habilitanta samodzielnie, a pozostałe mają w większości niewielką liczbę autorów (2-3). Dr Biedrzycki jest pierwszym autorem aż ośmiu prac cyklu. Szacowany deklarowany wkład Habilitanta w większość tych prac jest bardzo wysoki; załączone oświadczenia współautorów wydają się potwierdzać te deklaracje. Prace są profesjonalnie zredagowane. Habilitant był także autorem implementacji programistycznych znacznej części proponowanych algorytmów, co utwierdza moją pozytywną opinię o jego umiejętnościach. Doceniam także staranność w przygotowaniu autoreferatu, który opisuje przedłożony cykl w sposób bardzo przystępny i jednocześnie zwarty.

Dodatkową ilustracją jakości przedłożonego cyklu jest powiązane z nimi uczestnictwo Habilitanta w konkursach optymalizacyjnych organizowanych przy konferencji CEC, m.in. w CEC 2017, gdzie proponowany przez niego algorytm zajął 7 miejsce na 12, i CEC 2022 (3 miejsce na 13 uczestników).

W związku z powyższym, moja ocena przyczynków merytorycznych przedłożonego cyklu jest zdecydowanie pozytywna. Habilitant przeprowadził wiele wartościowych analiz teoretycznych i empirycznych istniejących podejść, zaproponował szereg oryginalnych rozszerzeń istniejących algorytmów i nowych technik, oraz zademonstrował użyteczność proponowanych podejść w zróżnicowanej gamie zastosowań praktycznych. Dorobek jest zwarty tematycznie i stanowi przekonujące świadectwo szerokich kompetencji oraz solidnego warsztatu naukowego.

Ocena pozostałego dorobku

Poza przedłożonym cyklem, Habilitant po uzyskaniu stopnia doktora opublikował przynajmniej 11 innych prac o tematyce zbliżonej do przedłożonego cyklu (z czego 9 po doktoracie). Większość z nich dotyczyła zastosowań algorytmów ewolucyjnych w problematyce badawczej innych dziedzin (np. fizyki), zastosowań inżynierskich, oraz implementacji heurystyk ewolucyjnych. W jego dorobku jest też przynajmniej 6 prac spoza obszaru metaheurystyk (w tym 2 po doktoracie), dotyczących głównie uczenia maszynowego, w szczególności w połączeniu z fuzją danych. Zauważalna część tych prac ukazała się w periodykach i konferencjach o dobrej renomie, m.in. GECCO. Prace te utwierdzają mnie w pozytywnej ocenie przedłożonego cyklu.

Wskaźniki bibliometryczne dr Biedrzyckiego oceniam jako dobre. Całkowita liczba cytowań według serwisu Google Scholar na moment przygotowywania dokumentacji to 233 (razem z autocytowaniami); na moment przygotowywania niniejszej recenzji wskaźnik ten osiąga już wartość 286. Po odrzuceniu autocytowań, liczba cytowań na moment składania wniosku to 199.

Indeks Hirscha Habilitanta według serwisu Google Scholar wynosi 8; serwis Web of Science podaje odpowiednio wartość 6 na moment składania dokumentacji i 7 na moment przygotowywania recenzji (w oparciu o 153 cytowania 19 prac Habilitanta indeksowanych przez ten serwis). Zatem także w kategoriach wskaźników bibliometrycznych dorobek Habilitanta prezentuje się przekonująco. Warto nadmienić że szczególnie często (kilkadziesiąt razy) cytowane są relatywnie nowe prace z dorobku Habilitanta, od roku 2017.

Dr Biedrzycki był wykonawcą w przynajmniej 7 projektach badawczych finansowanych przez NCN oraz inne instytucje oraz podmioty przemysłowe. Przynajmniej jeden z tych projektów realizowanych był w konsorcjum międzynarodowym. W dwóch z tych projektów pełnił rolę kierownika lub kierownika na poziomie partnera w konsorcjum.

Habilitant jest członkiem komitetu programowego renomowanych konferencji CEC i GECCO. Recenzował prace dla czasopism z obszaru metaheurystyk. Prezentował swoje osiągnięcia co najmniej 14 razy na wydarzeniach o zasięgu międzynarodowym i krajowym, w tym CEC i GECCO, w tym przynajmniej 7-krotnie po doktoracie.

Dr Biedrzycki uzyskał nagrodę zespołową Rektora Politechniki Warszawskiej, opracował programy dydaktyczne kilku przedmiotów oraz prowadził zajęcia laboratoryjne i wykładowe w ramach kilkunastu przedmiotów. Jest współautorem rozdziału w cenionym podręczniku dydaktycznym

Podsumowanie oceny

Całość dorobku naukowego przedłożonego przez dr inż. Rafała Biedrzyckiego, zarówno w części zawartej w przedłużonym cyklu, jaki w pozostałych publikacjach, oceniam wysoko. Badania prowadzone przez Habilitanta są oryginalne i charakteryzują się profesjonalizmem, wieloma konkluzjami o charakterze metodologicznymi i praktycznym. Dorobek dydaktyczny i projektowy Habilitanta są także znaczące i spełniają w mojej ocenie zwyczajowe oczekiwania i wymagania ustawowe.

Podsumowując, całokształt dorobku naukowego, organizacyjnego i dydaktycznego dr inż. Rafała Biedrzyckiego spełnia w mojej ocenie z nawiązką wymagania zwyczajowo i ustawowo stawiane kandydatom do uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Moja ocena Kandydata jest zdecydowanie pozytywna, a zatem wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie dr Biedrzyckiego do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

