



Warszawa, 18 czerwca 2019 roku

Prof. dr hab. inż. Jacek Mańdziuk
Wydział Matematyki i Nauk Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Górskiego
zatytułowanej *Kosynteza oraz przydział nieprzewidzianych zadań*
w procesie projektowania systemów wbudowanych

Recenzja została przygotowana na prośbę Prodziekana Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im Stanisława Staszica w Krakowie dr hab. inż. Krzysztofa Winczy, prof. uczelni wyrażoną w piśmie z dnia 26 kwietnia 2019 roku.

Tematyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa dotyczy zagadnienia kosyntezy systemów wbudowanych oraz przydziału zadań, które nie zostały przewidziane w procesie projektowania. Systemy wbudowane można określić jako dedykowane systemy mikroprocesorowe o stosunkowo niedużych rozmiarach fizycznych i ograniczonych, zwykle specjalizowanych funkcjach. Systemy tego typu wykorzystywane są do sterowania urządzeniami np. windami, pralkami, drukarkami komputerowymi czy elektroniką w nowoczesnych samochodach. Istotny stopień specjalizacji, ograniczone gabaryty, w połączeniu z pożądaną niską ceną powodują, że proces projektowania systemów wbudowanych jest zagadnieniem złożonym, wymagającym stosowania zaawansowanych metod optymalizacyjnych.

Jednym z kluczowych etapów projektowania systemów wbudowanych jest *kosynteza* polegająca na znalezieniu optymalnej (zwykle najtańszej) architektury projektowanego systemu (liczby oraz rodzaju jednostek obliczeniowych) oraz oprogramowania nadzorującego przydział zadań do zasobów obliczeniowych w ramach przyjętych ograniczeń czasowych.

W sensie formalnym kosynteza stanowi rodzaj problemu optymalizacyjnego z ograniczeniami. Wśród metod kosyntezy istotną grupę stanowią metody inteligencji obliczeniowej, czyli metody wykorzystujące inspiracje płynące z natury, bazujące na heurystycznym poszukiwaniu rozwiązania.

Wśród najpopularniejszych metod z tej grupy można wymienić algorytmy ewolucyjne, metody optymalizacji rojem cząstek, symulowane wyżarzanie czy przeszukiwanie tabu. Wszystkie ww. algorytmy rozwiązują postawione zadanie w sposób bezpośredni, tzn. optymalizują architekturę systemu wbudowanego.

Podjęcie zaproponowane przez mgr inż. Adama Górskiego jest innej natury, mianowicie polega na optymalizacji *sposobu* generowania architektury optymalnej. Do rozwiązania tak postawionego zadania Doktorant wykorzystuje programowanie genetyczne, proponując dwa warianty algorytmu kosyntezy: konstrukcyjny oraz rafinacyjny, do których odniosę się bardziej szczegółowo w dalszej części recenzji.

Hipotezy badawcze

Autor stawia dwie hipotezy badawcze (ujęte w dysertacji w formie jednej rozbudowanej tezy). Podstawową hipotezą jest potwierdzenie możliwości uzyskania sub-optymalnego rozwiązania problemu kosyntezy systemu wbudowanego z wykorzystaniem algorytmów programowania genetycznego zaproponowanych w rozprawie.

Hipoteza pomocnicza mówi o tym, że algorytmy przydziału zadań nieprzewidzianych w procesie projektowania systemu wbudowanego zaproponowane przez Autora nie wymagają modyfikacji przyjętej architektury systemu.

Treść rozprawy

Rozprawa liczy 100 stron, zawiera streszczenie w językach polskim i angielskim, składa się z 9 rozdziałów, dwóch dodatków zawierających szczegółowe wyniki przeprowadzonych eksperymentów, spisu literatury oraz wykazu publikacji Doktoranta.

W rozdziale wprowadzającym Autor przedstawia, na poziomie ogólnym, zagadnienie kosyntezy systemów wbudowanych, wylicza metody, które mogą być zastosowane do rozwiązania tego zagadnienia oraz anonsuje uzyskane przez siebie wyniki badawcze prezentowane w rozprawie: dwa algorytmy wykorzystujące technikę programowania genetycznego w zagadnieniu kosyntezy oraz dwa algorytmy dedykowane sytuacji, w której część zadań planowanych do wykonania przez tworzony system nie została uwzględniona na etapie jego projektowania.

W rozdziale drugim przedstawione są cele oraz tezy badawcze rozprawy.

Nie mam uwag merytorycznych do omawianych rozdziałów. Wprowadzenie do tematyki przedstawione jest w sposób prawidłowy, podobnie opis celów badawczych i streszczenie najważniejszych wyników. Kontekst literaturowy mógłby być poszerzony o ogólniejszą charakterystykę metod inteligencji obliczeniowej oraz metod programowania genetycznego, niemniej z punktu widzenia istoty rozprawy, czyli tematyki kosyntezy systemów wbudowanych, zacytowane prace wybrane są prawidłowo a ich liczba jest wystarczająca. Jedyńm mankamentem rozdziału wstępnego jest brak streszczenia poszczególnych rozdziałów rozprawy, którym to streszczeniem zwyczajowo rozdział wstępny się kończy, przybliżając czytelnikowi zakres dysertacji.

Rozdział trzeci zawiera formalne wprowadzenie do zagadnienia projektowania systemów wbudowanych, poczynawszy od przedstawienia definicji takiego systemu, poprzez definicje zadania, grafu zadań, ścieżki krytycznej, poprawności systemu wbudowanego i bazy zasobów, po zagadnienia modelowania, walidacji, kosyntezy oraz implementacji systemów wbudowanych.

Z punktu widzenia tematyki pracy rozdział ten ma kluczowe znaczenie definiując w sposób formalny kontekst badawczy oraz wymagania stawiane algorytmom kosyntezy oraz ich produktom czyli projektowanym systemom. Generalnie rozdział napisany jest prawidłowo, chociaż Autor nie ustrzegł się pewnych mankamentów. Na przykład w definicji systemu wbudowanego występuje między innymi pojęcie „czasu obliczeń i-tej ścieżki”, którego Autor nie definiuje. Z kolei rola systemu wbudowanego określona jest na stronie 9 następująco: „System wbudowany ma za zadanie wykonywać powierzone mu zadania”, co niewątpliwie jest prawdą, niemniej nie przybliży czytelnika do zrozumienia istoty problemu. Definicja *grafu zadań* jest przedstawiona dwukrotnie – najpierw z wykorzystaniem formalizmu matematycznego później w sposób opisowy – moim zdaniem definicja formalna jest intuicyjnie oczywista i jako taka w pełni wystarczająca. Interpretacje warunków (1) i (2) na stronie 11 odnoszące się do definicji *poprawności systemu wbudowanego* są zamienione ze sobą. W rozdziale 3.3. odnoszącym się do walidacji systemów wbudowanych Autor wymienia cztery podstawowe metody ich weryfikacji (recenzja, symulacja, prototyp, formalna weryfikacja) podając hasłowo zalety i ograniczenia każdej z nich. Zdecydowanie brakuje w tym miejscu dokładniejszego omówienia skuteczności powyższych metod, odniesienia do literatury a nade wszystko podsumowania. Czy z przedstawionej quasi-analzy wynika, że żadna z tych metod nie spełnia oczekiwań projektantów? A może poszczególne metody mają zastosowanie do specyficznych typów systemów wbudowanych oraz skojarzonych z nimi technik projektowych?

Kolejny rozdział poświęcony jest szczegółowemu uzasadnieniu znaczenia podjętego tematu badawczego. Zagadnienie kosyntezy jest problemem NP-zupełnym a, cytując Autora, „w ogólnym przypadku jest to również problem NP-trudny”. Co Doktorant rozumie pod pojęciem przypadku ogólnego? Na czym polega różnica w stosunku do sytuacji rozważanej w rozprawie? W dalszej kolejności mgr inż. A. Górski charakteryzuje dwa podstawowe typy algorytmów kosyntezy: konstrukcyjne (budujące rozwiązanie w sposób przyrostowy) oraz rafinacyjne (wychodzące od możliwie dobrego rozwiązania / zestawu rozwiązań i dokonujące ich stopniowej poprawy w drodze lokalnej optymalizacji). W dalszej części rozdziału Kandydat charakteryzuje podstawowe podejścia do zagadnienia kosyntezy (programowanie całkowitoliczbowe, programowanie dynamiczne, algorytm A*, metody heurystyczne) konkludując, że „żadna z istniejących metod kosyntezy nie daje rezultatów w pełni zadowalających”. Stąd wynika – zdaniem Autora – potrzeba poszukiwania innych rozwiązań, która stanowi główną motywację zastosowania programowania genetycznego. Ramowy opis tego paradygmatu obliczeniowego kończy omawiany rozdział, który w mojej ocenie należy do najlepszych fragmentów rozprawy. Pomijając błędy literowe, których liczba przekracza zwyczajowe granice, pod względem merytorycznym przedstawiony opis metod nie budzi zastrzeżeń. Omawianym metodom towarzyszą cytowania literatury umożliwiające dalsze pogłębienie wiedzy w zakresie kosyntezy systemów wbudowanych.

Rozdział 5 przedstawia zagadnienie przydziału zadań nieprzewidzianych w procesie projektowania systemu wbudowanego, które jest problemem nowym w literaturze, rozważanym po raz pierwszy przez Doktoranta i Jego Promotora. Jako modelową sytuację Autor podaje proces projektowania, do realizacji którego zaangażowanych jest kilku projektantów, co może prowadzić do

pominięcia któregoś z zadań w procesie konstruowania systemu. O ile taka sytuacja może mieć sporadycznie miejsce, to raczej trudno określić ją jako problem powszechny. Nasuwa się zatem pytanie o praktyczne znaczenie tego wątku badań.

Kolejny rozdział przedstawia zaproponowane przez Doktoranta algorytmy kosyntezy wykorzystujące programowanie genetyczne. Autor kolejno odnosi się do podstawowych aspektów programowania genetycznego w kontekście rozważanego zagadnienia, mianowicie budowy pokolenia początkowego, funkcji oceny osobników, operatorów genetycznych (krzyżowania i mutacji). Każdy z ww. aspektów omawiany jest w kontekście dwóch możliwych scenariuszy kosyntezy: algorytmu konstrukcyjnego oraz algorytmu rafinacyjnego.

Omawiany rozdział opisuje główne osiągnięcie pracy doktorskiej będące oryginalnym wkładem Autora rozprawy do zagadnienia kosyntezy systemów wbudowanych. Autor sprawnie porusza się w tematyce programowania genetycznego. Oprócz zrozumienia formalizmu matematycznego posiada także dobre rozumienie intuicyjne poszczególnych aspektów omawianej metodologii. Drobnie usterki (np. wymienne stosowanie określenia *klonowanie* i *selekcja* na tę samą czynność) czy brak wyjaśnienia znaczenia parametru b w punkcie C na stronie 26, czy też stosunkowo liczne błędy literowe nie umniejszają w istotnym stopniu ogólnie pozytywnego wrażenia płynącego z lektury omawianego rozdziału.

Z uwag krytycznych, zabrakło mi dyskusji wyboru różnych opcji przyjętych w ramach proponowanej implementacji. Z jednej strony znaczenie wielu z nich jest dość intuicyjne, z drugiej jednak strony wskazanie prostych przykładów, w których użycie konkretnych opcji góruje and opcjami alternatywnymi istotnie wzbogaciłoby opis zaproponowanych przez Autora metod. Z punktu widzenia oceny stabilności zaproponowanych algorytmów pożądana byłaby też analiza wrażliwości algorytmu na dobór prawdopodobieństw wyboru poszczególnych opcji. Czy wartości zaprezentowane w pracy były w jakiś sposób optymalizowane?

Drugą kwestią jest przypisywanie prawdopodobieństw poszczególnym opcjom, które nie jest spójne. W niektórych przypadkach prawdopodobieństwa w ramach podopcji sumują się do 1.0, w innych do wartości prawdopodobieństwa w węźle rodzica (rys. 4 na str. 27).

Inną kwestią, natury polemicznej, jest brak czynnika adaptacji w proponowanym rozwiązaniu. Prawdopodobieństwa wyboru poszczególnych akcji są stałe, a wydaje się, że mogłyby być alokowane dynamicznie na podstawie dotychczasowego przebiegu algorytmu. Ostatnia uwaga nie ma charakteru krytycznego, stanowi raczej wskazówkę odnośnie możliwości wykorzystania podejścia adaptacyjnego. Chętnie wysłuchałbym opinii Autora w tej kwestii.

Rozdział 7 poświęcony jest zagadnieniu przydziału zadań nieprzewidzianych w procesie projektowania systemu. Rozważane są dwa przypadki: szczególny (w którym wszystkie nieprzewidziane zadania pojawiają się po zakończeniu zadań pierwotnie przewidzianych do realizacji) oraz ogólny (w którym zadania nieprzewidziane pojawiają się w trakcie realizacji zadań pierwotnych). Do obsługi każdej z dwóch ww. sytuacji Doktorat proponuje odrębny algorytm rafinacyjny wykorzystujący programowanie genetyczne.

W zasadzie nie mam uwag do tej części pracy z wyjątkiem jednej. Sformułowanie „algorytmy przydziału nieprzewidzianych zadań wymuszają wcześniejsze zaprojektowanie i skonstruowanie systemu wbudowanego” jest dla mnie niezrozumiałe. Przyjąłem, że Autor miał na myśli założenie, że system wbudowany już istnieje i stanowi punkt wyjścia prowadzonych rozważań.

Rozdział 8, poświęcony prezentacji wyników eksperymentalnych zaproponowanych przez Doktoranta algorytmów, jest rozdziałem najdłuższym i obejmuje ponad 1/3 objętości dysertacji. Testy przeprowadzone zostały w oparciu o zadania benchmarkowe o wielkości od 10 do 110 wierzchołków (mgr inż. Adam Górski nie podaje ich źródła, należy zatem założyć, że są to problemy zaproponowane przez Autora). W kolejnych podrozdziałach testowany jest wpływ poszczególnych składowych oraz parametrów zaproponowanych metod kosyntezy na jakość otrzymywanych wyników. W szczególności badana jest zależność rezultatów od rozmiaru pokolenia, przyjętych operatorów krzyżowania i mutacji, metody selekcji oraz warunku stopu.

Przedstawione wyniki są bardzo szczegółowe i odnoszą się kolejno do wszystkich aspektów proponowanych metod. Do pełnej ich oceny zabrakło jednak informacji o wartościach średnich oraz odchyleniach standardowych (w każdym przypadku wykonano 30 testów). Oczywiście z praktycznego punktu widzenia najważniejszy jest wynik najlepszego testu, niemniej do oceny jakości algorytmu, a przede wszystkim porównania z alternatywnymi metodami niezbędne jest także podanie ww. parametrów statystycznych testowanych metod. Bez tych informacji nie można między innymi stwierdzić czy uzyskane różnice w jakości wyników są statystycznie istotne.

Uzyskane wyniki algorytmów bazowych kosyntezy (ProGen oraz RafGen) zostały porównane z dwoma algorytmami z literatury, odpowiednio z roku 1995 oraz 2004 uzyskując lepsze wyniki zarówno w porównaniu najlepszych jak i najgorszych rezultatów z 30 testów. W kontekście analizy wyników mam pytanie odnośnie doboru wartości T_{max} . We wszystkich testach została ona ustalona w taki sposób, żeby wszystkie metody sprostały przyjętemu ograniczeniu. Jakie byłyby rezultaty w przypadku zmniejszenia limitu czasowego?

W końcowej części rozdziału 8 prezentowane są wyniki algorytmów odpowiedzialnych za przydział nieprzewidzianych zadań. Z uwagi na brak w literaturze metod alternatywnych, otrzymane rezultaty porównywane są z rozwiązaniami uzyskanymi za pomocą algorytmu zachłannego, stąd odpowiednio mniejsze rozmiary problemów testowych. Generalnie oba algorytmy rafinacyjne górują nad algorytmem zachłannym. Pełna ocena ich skuteczności jest jednak utrudniona z uwagi na brak danych referencyjnych odnośnie rozwiązań optymalnych oraz testów statystycznej istotności.

W rozdziale 9 Autor odnosi się do hipotez badawczych postawionych na początku rozprawy stwierdzając ich spełnienie. Wyniki uzyskane przez zaproponowane w rozprawie algorytmy przewyższają rezultaty dwóch algorytmów referencyjnych (w przypadku podstawowym) oraz metody zachłannej (w przypadku alokacji zadań nieprzewidzianych), co niewątpliwie świadczy o potencjale zaproponowanych rozwiązań. Szkoda jednocześnie, że Doktorant nie zamieścił wyników dokładnych przynajmniej dla mniejszych zadań bądź nie skorzystał ze standardowych benchmarków, dla których takie wyniki są znane. W omawianym rozdziale zabrakło też dyskusji odnośnie możliwych kierunków kontynuacji przedstawionych w rozprawie prac badawczych.

Rozprawę dopełniają dwa dodatki prezentujące listy sąsiedztwa oraz bazy danych zasobów dla grafów odpowiadających eksperymentom z zadaniami nieprzewidzianymi, spis literatury oraz lista publikacji współautorstwa mgr inż. Adama Górskiego.

Oryginalny wkład Autora rozprawy

Oryginalny wkład Autora w ramach rozważanego w rozprawie zagadnienia naukowego dotyczy dwóch następujących obszarów:

1. Opracowania, implementacji oraz weryfikacji eksperymentalnej dwóch algorytmów (konstrukcyjnego oraz rafinacyjnego) kosyntezy systemów wbudowanych z wykorzystaniem programowania genetycznego.
2. Opracowania, implementacji oraz weryfikacji eksperymentalnej dwóch algorytmów rafinacyjnych mających zastosowanie w przypadku pojawienia się zadań nieprzewidzianych na etapie projektowania systemu wbudowanego.

Wymienione wyżej rezultaty badawcze zostały częściowo przedstawione w dwóch publikacjach w czasopismach z listy A MNiSW, dwóch pracach w periodykach z listy B oraz dziewięciu pracach konferencyjnych.

Konkluzja

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera oryginalne wyniki prac badawczych Autora w obszarze kosyntezy systemów wbudowanych. Nie dostrzegłem w rozprawie istotnych braków czy nieprawidłowości, a wymienione w recenzji uwagi nie wpływają na moją ogólnie pozytywną ocenę dysertacji. Rozprawa dotyczy aktualnej tematyki badawczej a jej treść bez wątpienia dowodzi wiedzy Autora w obszarze rozważanych zagadnień. Tematyka rozprawy lokuje się w dyscyplinie *Informatyka techniczna i telekomunikacja*.

Reasumując, **stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane przez odnośną Ustawę i wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie jej Autora, mgr inż. Adama Górskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

