

Częstochowa, dn. 15.01.2022

Prof. dr hab. inż. Roman Wyrzykowski
Katedra Informatyki
Politechnika Częstochowska
ul. Dąbrowskiego 69
42-201 Częstochowa



**RECENZJA
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Mgr inż. Adama Smyka

„Projektowanie równoległych programów numerycznych z uwzględnieniem ograniczeń architektonicznych systemów”

Promotor: prof. dr hab. inż. Marek Tudruj

Polsko-Japońska Akademia Technik Komputerowych w Warszawie

Niniejsza recenzja przygotowana została na zlecenie Przewodniczącej rady Naukowej Dyscypliny Informatyka w Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych w Warszawie, Pani prof. dr hab. Marii Elżbiety Orłowskiej – pismo z dnia 27 października 2021 r.

1. Ocena wyboru tematu i tezy (celu) rozprawy

Tematyka przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Smyka dotyczy zagadnień programowania równoległego i rozproszonego, obszaru niezwykle istotnego i dynamicznie rozwijającego się od lat. Wśród czynników które temu sprzyjały, należy wymienić wykrywanie się architektur wielordzeniowych jako podstawowego sposobu zwiększenia wydajności procesorów, a także rozwój obliczeń wielkiej skali z wykorzystaniem systemów HPC (high performance computing) pozwalających na uzyskanie wydajności wielu Petaflops, a ostatnio zmierzających do przekroczenia swoistego „progu marzeń” – czyli 1 Exaflops, dziś już coraz bardziej bliskiego urzeczywistnieniu. Jednocześnie, skuteczne wykorzystanie olbrzymiego potencjału takich systemów, charakteryzujących się znacznym kosztem zarówno ich budowy, jak i utrzymania, wymaga opracowania, niekiedy od podstaw, wielu nowych technologii i podjęcia szeregu wyzwań badawczych. Zakres tych wyzwań rozciąga się od dogłębnego przeformułowania modeli matematycznych i związanych z nim algorytmów rozwiązywania zagadnień aplikacyjnych, poprzez stworzenie i rozwój nowych architektur komputerowych, uwzględniających praktyczne wyczerpanie się dotychczasowych źródeł zwiększenia wydajności obliczeń zgodnych z prawem Moore’a, aż po opracowanie efektywniejszych narzędzi i środowisk programistycznych.

W tym kontekście bardzo pozytywnie oceniam wybór tematyki rozprawy zmierzającej do opracowania i implementacji rozwiązań umożliwiających dla określonej klasy algorytmów numerycznych definiowanych na siatkach niestrukturalnych ich bardziej efektywne wykonywanie w środowiskach równoległych i rozproszonych. Tematyka ta związana jest z optymalizacją procedur symulacji komputerowych wykorzystujących metody numeryczne zdefiniowane na dwu- i trójwymiarowych siatkach obliczeniowych. Dla uproszczenia analizy rozpatrywanych zagadnień, jak również w celu weryfikacji poprawności opracowywanych rozwiązań, w pracy skoncentrowano się na jednym algorytmie numerycznym w postaci metody różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. finite-difference time domain – FDTD). Znaczenie praktyczne tej metody wynika z faktu, iż umożliwia ona wykonywanie symulacji rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w ośrodkach o niejednorodnej strukturze, co realizowane jest poprzez rozwiązywanie równań Maxwella.

Aktualność zaproponowanych w pracy rozwiązań związane jest z faktem, iż możliwe jest ich uogólnienie na znacznie szerszą klasę metod numerycznych operujących na siatkach niestrukturalnych. Stanowią one jeden z podstawowych narzędzi obliczeniowych stosowanych w problematyce „Wielkich Wyzwań Nauki” (*Grand Challenges*), głównie do modelowania zjawisk opisywanych równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Dziedzina ta charakteryzuje się najczęściej wielką złożonością obliczeń, dużą objętością przetwarzanych danych oraz nieregularnością stosowanych algorytmów. Jest ona dynamicznie rozwijana od wielu już lat przez badaczy z całego świata. Rozwój ten dotyczy praktycznie wszystkich jej aspektów - począwszy od podstaw matematycznych z uwzględnieniem specyfiki konkretnej dziedziny aplikacyjnej, poprzez metodologię wyznaczania rozwiązań numerycznych, a skończywszy na aspektach algorytmicznych i programistycznych związanych z jej efektywną implementacją we współczesnych systemach komputerowych charakteryzujących się skomplikowaną architekturą oparta na wykorzystaniu coraz większej liczby jednostek obliczeniowych oraz rozbudowanym, hierarchicznym systemie pamięciowym. Wśród podstawowych ograniczeń narzucanych przez architekturę systemów wymienić należy konieczność zrównoważenia obciążenia jednostek obliczeniowych oraz minimalizację narzutów komunikacyjnych na przesyłanie danych. Na tym tle zaproponowane w pracy synergiczne podejście do problemu efektywnej organizacji obliczeń bazujące na uwzględnieniu właściwości zarówno równoległych algorytmów numerycznych przedstawionych za pomocą grafów przepływów, jak i architektur systemów komputerowych korzystnie świadczy o przygotowaniu autora do działalności naukowo-badawczej i jego zdolności do rozwiązywania dostatecznie złożonych zagadnień badawczych.

Podsumowując ten punkt recenzji, pragnę stwierdzić, iż wybór tematyki rozprawy Pana mgr inż. Adama Smyka uważam za trafny, a zaproponowany kierunek i cel badań

oceniam zdecydowanie pozytywnie. Rozważane w rozprawie problemy są istotne i aktualne, zarówno dla teorii, jak i przede wszystkim praktyki współczesnego programowania równoległego. Lokują się one korzystnie w nakreślonej wyżej tematyce współczesnej informatyki, dotyczącej aspektów teoretycznych organizacji obliczeń w systemach HPC oraz zastosowań praktycznych tych systemów, definiując teoretyczny i jednocześnie technologiczny charakter rozprawy.

2. Koncepcja i redakcja rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska została przedstawiona do mojej oceny w formie autoreferatu uzupełnionego przez kopie 9 publikacji, których współautorem jest doktorant. Sam autoreferat podzielony jest na 9 rozdziałów zawartych na 83 stronach. Obejmują one genezę przeprowadzonych badań, charakterystykę aktualnego stanu wiedzy, przedstawienie tezy i struktury rozprawy, bardzo krótkie wprowadzenie do badanej metody numerycznej, przedstawienie wyników uzyskanych w czterech rozpatrywanych w rozprawie obszarów badawczych, a także podsumowanie rozprawy. Rozdziałom tym towarzyszy bibliografia zawierająca 112 pozycji. Przed omówieniem zasadniczej treści autoreferatu chciałbym zauważyć, iż po raz pierwszy w swojej wieloletniej praktyce recenzowania rozpraw doktorskich spotkałem się z taką formą przedstawienia rozprawy w postaci autoreferatu zamiast zwyczajowej pracy doktorskiej. Nie wdając się tym momencie w szczegóły, chciałbym zauważyć tylko, iż nie oceniam tego doświadczenia z taką akurat formą zbyt pozytywnie.

Koncepcja przedstawionej rozprawy opiera się na jedności czterech obszarów badawczych. **Pierwszy i zasadniczy z tych obszarów** dotyczy zagadnienia optymalizacji podziału siatki obliczeniowej traktowanej jako graf przepływowy na z góry określoną liczbę partycji i przypisanie każdej z nich do określonego węzła obliczeniowego. Dla danego zagadnienia jednoczesna optymalizacja narzutów na komunikację i zrównoważenia obciążenia węzłów jest zagadnieniem złożonym i kosztownym obliczeniowo. W związku z powyższym oprócz rozwoju klasycznych technik umożliwiających zwiększenie efektywności rozwiązania problemu podziału grafów takich jak pogrubianie grafów wraz z algorytmem repozycjonowania i podejściem hierarchicznym, doktorant zaproponował oryginalny mechanizm komunikacyjny RDMA RB (ang. Remote Memory Director Memory Access with Rotating Buffers), który wzbogaca mechanizm zdalnego bezpośredniego dostępu do pamięci o infrastrukturę buforów rotacyjnych. Zaproponowany mechanizm może być efektywnie wykorzystany do realizacji wydajnych obliczeń w siatkach o różnym poziomie ziarnistości, a w szczególności równoległych obliczeń drobnoziarnistych. Skuteczność zaproponowanych w tym obszarze rozwiązań potwierdzono eksperymentalnie, wykorzystując system równoległy z pamięcią rozproszoną HITACHI SR2201.

Drugi obszar badawczy jest rozszerzeniem prac zrealizowanych w pierwszym obszarze. Obejmuje on genetyczne podejście do problemu podziału grafów przepływowych z wykorzystaniem algorytmu pogrubiania węzłów obliczeniowych. Dzięki temu możliwa jest selekcja odpowiednich parametrów (reguł) dla algorytmu pogrubiania węzłów, które są istotne w procesie heurystycznej optymalizacji partycjonowania, co pozwala wyeliminować te reguły czy parametry, których wykorzystanie nie powoduje poprawy jakości uzyskanego podziału.

W trzecim z rozpatrywanych obszarów badawczych doktorant skoncentrował się na rozwiązaniu problemu partycjonowania grafów z użyciem techniki pogrubiania grafów dla przypadku strumieniowego modelu przetwarzania danych. Jako środowisko testowe demonstrujące efektywność opracowanego rozwiązania wykorzystano procesor Cell BE (Cell Broadband Engine) – jeden z pierwszych przykładów heterogenicznej architektury wielordzeniowej.

W czwartym, ostatnim z rozpatrywanych obszarów badawczych doktorant skoncentrował się na efektywnej implementacji globalnego sterowania wykonaniem algorytmów partycjonowania grafów w środowisku rozproszonym. W tym celu wykorzystano środowisko PEGASUS DA, które pozwala na realizację sterowania wykonaniem programów rozproszonych w oparciu o zautomatyzowane monitorowanie stanów globalnych procesów w ramach danej aplikacji. Wykorzystanie takiego podejścia istotnie zmniejsza nakład pracy programisty przy projektowaniu sterowania wykonaniem aplikacji rozproszonych optymalizujących podział grafów, umożliwiając skupienie się na samym zagadnieniu optymalizacyjnym i jego parametrach. Takie wspomaganie systemowe wraz z zaproponowanym bazowym modelem procesu partycjonowania o nazwie PGPM (Parallel Graph Partitioning Model) istotnie upraszcza pracę programisty, pozwalając na wyczerpujące testowanie różnych metod rozwiązania zagadnienia optymalizacji heurystycznej podziału grafów.

3. Wkład Autora i zaprezentowana wiedza

Uwzględniając powyższe omówienie zawartości pracy oraz ogólną pozytywną ocenę jej zawartości merytorycznej, uważam, że za bezsporne osiągnięcia Autora należy uznać następujące rezultaty:

1. Na tle stanu wiedzy w dziedzinie obliczeń równoległych i rozproszonych za najbardziej istotny wynik należy w mojej opinii uznać zaproponowany oryginalny mechanizm czy też model komunikacyjny RDMA RB (ang. Remote Memory Director Memory Access with Rotating Buffers), który wzbogaca mechanizm zdalnego bezpośredniego dostępu do pamięci o infrastrukturę buforów rotacyjnych. Zaproponowany mechanizm charakteryzuje się niewielkim narzutem na

synchronizację transmisji danych pomiędzy węzłami obliczeniowymi i umożliwia nakładanie wykonania operacji komunikacyjnych i operacji obliczeniowych, pozwalając na efektywną realizację wydajnych obliczeń dla algorytmów numerycznych o różnym poziomie ziarnistości, a w szczególności równoległych obliczeń drobnoziarnistych. Te ostatnie tradycyjnie następują najczęściej trudności w praktyce obliczeń HPC z punktu widzenia zapewnienia wysokiej skalowalności obliczeń. Wykorzystanie efektywnego mechanizmu komunikacyjnego pozwoliło na większą elastyczność w optymalizacji zarówno równomiernego obciążenia, jak i redukcji kosztu komunikacji dla różnych typów architektur – zarówno systemów z pamięcią rozproszoną, jak i w modelu strumieniowym.

2. Za drugi pod względem oryginalności wynik rozprawy uznaję zaproponowane rozwiązanie problemu podziału grafów przepływów opisujących obliczenia na siatkach niestrukturalnych oparte o kompleksowe wykorzystanie kilku niezależnych mechanizmów, które mogą być w różny sposób łączone dla uzyskania podziału o lepszej jakości lub skrócenia czasu wyznaczenia podziału, przy uwzględnieniu właściwości architektur systemów obliczeniowych. W szczególności, klasyczne podejście KL/FM do pogrubiania grafów zostało rozszerzone o implementację opartą na paradygmacie makro-przepływowym, jak również o podejście hierarchiczne łączące techniki scentralizowane i zdecentralizowane, co pozwoliło istotnie skrócić czas realizacji algorytmu podziału przy równoczesnej poprawie jakości podziału. Z kolei, wykorzystanie programowania genetycznego pozwoliło, kosztem wydłużenia czasu wykonania, na analizę i selekcję reguł najbardziej korzystnych z punktu widzenia uzyskania podziału satysfakcjonującego jakościowo.
3. Innowacyjnym wynikiem świadczącym nie tylko o kreatywności, lecz również sprawności programistycznej doktoranta, jest także wykorzystanie możliwości oferowanych przez metody globalnego sterowania wykonaniem programu do realizacji zaproponowanych algorytmów podziału grafów w oparciu o monitorowanie stanów globalnych rozproszonego algorytmu z wykorzystaniem środowiska PEGASUS DA. Takie rozwiązanie upraszcza projektowanie złożonych algorytmów wykonawczych (programów) realizujących podział grafów z uwzględnieniem wpływu różnych metod podziału poszczególnych wariantów na jakość wyników, jak również umożliwia dynamiczne sterowanie procesem optymalizacji, nawet już w czasie wykonywania symulacji.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane w dziewięciu pracach w języku angielskim, wśród których osiem ukazało się w materiałach reprezentatywnych, specjalistycznych konferencji o zasięgu ogólnoswiatowym, poświęconych problematyce przetwarzania równoległego oraz rozproszonego, a jeden artykuł został opublikowany w specjalistycznym czasopiśmie ze wskaźnikiem Impact Factor, za co przysługuje 100 punktów Ministerstwa. Wszystkie publikacje konferencyjne indeksowane są w w bazie

SCOPUS. Świadczy to pozytywnie o stopniu weryfikacji uzyskanych rezultatów przez międzynarodową społeczność specjalistów zajmujących się rozpatrywaną dziedziną.

Po zapoznaniu się z treścią autoreferatu oraz załączonych publikacji stwierdzam również, iż doktorant zademonstrował w nich generalnie wysoki poziom wiedzy w zakresie dyscypliny informatyka, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień programowania równoległego i rozproszonego, w tym w takich szczegółowych dziedzinach jak techniki podziału grafów, modele komunikacyjne czy też modele sterowania wykonaniem aplikacji równoległych. Jednakże przyjęta forma przedstawienia rozprawy w postaci autoreferatu, a nie zwyczajowej całościowej pracy stanęła na przeszkodzie dogłębniejszemu przedstawieniu rozwiązywanego zagadnienia i tym samym zademonstrowaniu wiedzy doktoranta w takich kluczowych obszarach jak architektury systemów równoległych i rozproszonych czy też równoległe algorytmy numeryczne. Aspekt ten zostanie poruszony przeze mnie w uwagach krytycznych w kolejnym punkcie recenzji. Na zakończenie tego punktu mojej recenzji chciałbym również wyrazić generalnie pozytywną opinię o bibliografii wykorzystanej w pracy oraz jej kompletności, co nie wyklucza szczegółowych uwag krytycznych.

4. Poprawność pracy i uwagi krytyczne

Poprawność treści pracy nie wzbudza moich istotnych zastrzeżeń, a stwierdzenia w niej zawarte wydają się być godne zaufania, co wynika w szczególności z dosyć szczegółowych uzasadnień, popartych wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Generalnie sposób i jakość przeprowadzenia badań eksperymentalnych stanowi bardzo wartościowy element rozprawy i zasługuje na podkreślenie. W szczególności, dotyczy to wyczerpujących eksperymentów przeprowadzonych w środowisku PEGASUS DA obejmujących szeroki zakres testów porównawczych wykonanych dla zaproponowanych w rozprawie metod podziału grafów oraz z wykorzystaniem popularnej i szeroko stosowanej w praktyce biblioteki METIS.

Jednocześnie Autor nie ustrzegł się pewnych braków i słabości. Wśród uwag o charakterze krytycznym, a po trosze dyskusyjnym, wymienić należy:

1. W rozprawie badania efektywności zaproponowanych rozwiązań zostały przeprowadzone dla dostatecznie przestarzałych architektur komputerowych obejmujących system SR2201 i procesor Cell BE, pochodzące z pierwszej dekady bieżącego wieku czy też klaster złożony z procesorów AMD FX, które ukazały się na początku drugiej dekady. Czy doktorant dysponuje wynikami badań dla aktualnie używanych architektur lub im bliskich?
2. W tym kontekście nasuwa się pytanie o możliwość wykorzystania mechanizmu RDMA RB dla współczesnych architektur komputerowych. Pytanie to jest tym

bardziej uzasadnione, iż dla procesorów AMD FX charakteryzujących się architekturą gruboziarnistą nie znalazłem żadnych szczegółów nt. realizacji tego mechanizmu i szczególnie celowości jego zastosowania w sytuacji, gdy zadaniem tego mechanizmu jest głównie poprawa efektywności obliczeń drobnoziarnistych.

3. Kolejna uwaga nawiązuje do obydwu poprzednich i dotyczy braku ogólnej charakterystyki współczesnych architektur komputerowych, chociaż już w temacie prac występuje silne nawiązanie do tego zagadnienia z uwagi na użycie sformułowania „z uwzględnieniem ograniczeń architektonicznych systemów”. Rozumiem, że doktorant nie znalazł miejsca na taką charakterystykę w przyjętej formie autoreferatu, a nie zwyczajowej pracy doktorskiej, ale moim zdaniem nie sprzyja to jasnemu i klarownemu przedstawieniu związku zaproponowanych rozwiązań z bogactwem świata współczesnych architektur komputerowych i ich właściwości. Zabrakło nawet charakterystyki bardzo przecież interesującej maszyn SR 2201 czy nowszych platform firmy Hitachi.
4. Uwaga szczegółowa: doktorant na początku rozdziału 7 zalicza architekturę procesora Cell BE do architektur strumieniowych, chociaż w rzeczywistości ma raczej na myśli możliwość wykonywania obliczeń na tym procesorze w modelu strumieniowym, który odpowiada tylko jednemu z trybów pracy tego procesora. Architektura procesora Cell BE stanowi faktycznie przykład heterogenicznej architektury wielordzeniowej. Przy okazji mam więc pytanie co doktorant ewentualnie rozumie pod pojęciem architektury strumieniowej i czy potrafi przytoczyć przykład takiej architektury ?
5. W tym kontekście chciałbym zwrócić uwagę na brak w bibliografii reprezentatywnych pozycji monograficznych dotyczących architektur komputerowych, takich jak np. klasycznej monografii autorów Hennesy i Pattersona pt. „Computer Architecture: A Quantitative Approach”, którego najnowsze wydanie ukazało się na przełomie lat 2017 i 2018.
6. Uwaga szczegółowa dotycząca bibliografii: w przypadku pozycji internetowych nie wystarczy podać tylko adres strony, konieczne jest również ukazanie jej tytułu oraz daty.
7. Kolejna uwaga krytyczna dotyczy braku modelu kosztu komunikacji przyjętego w rozprawie. W literaturze znanych jest wiele takich modeli. W chwili obecnej jedyne co mi przychodzi na myśl to zastosowanie przez doktoranta najprostszego modelu opartego na stałej przepustowości komunikacji. Lecz nawet w tym najprostszym modelu musimy się zmierzyć z faktem, że przepustowość nie jest stała i zależy od wielkości przesyłanych porcji danych. Szczerze powiedziawszy, wydaje mi się, że również model kosztu obliczeń nie został jawnie zdefiniowany w rozprawie.

8. Uwaga szczegółowa związana z poprzednią: wartości wydajności obliczeń oraz komunikacji (Tabela 7 na str. 82) wydają mi się zbyt małe w relacji do rzeczywistych wartości.
9. W bardzo krótkim opisie badanych algorytmów numerycznych scharakteryzowano tylko przypadek siatek 2D. Jak będzie kształtować się odwzorowanie obliczeń z siatkami 3D na architekturę równoległych systemów komputerowych ??
10. I na koniec uwaga znów związana z przyjętą formą przedstawienia rozprawy: zarówno w treści autoreferatu, jak i dołączonych publikacji (niezbyt przecież obszernych) zabrakło w miarę wyczerpującego przedstawienia samego zagadnienia podziału grafów w zastosowaniu do obliczeń równoległych, wokół którego koncentruje się cała rozprawa. Utrudnia to analizę treści rozprawy przez recenzenta. Czy mógłbym liczyć na zwięzłe przedstawienie tego zagadnienia w trakcie obrony rozprawy ? Inny element, z którym chętnie zapoznałbym się w trakcie obrony, to demonstracja chociażby jednego przykładu wykorzystania zaproponowanych rozwiązań do realizacji symulacji z wykorzystaniem metody FDTD.

5. Podsumowanie

Przytoczone wyżej uwagi krytyczne i dyskusyjne nie umniejszają zasług Autorka ani nie kwestionują jej osiągnięć. Recenzowana praca zasługuje na pozytywną ocenę merytoryczną i wnosi oryginalny wkład w rozwój metod organizacji obliczeń numerycznych w równoległych i rozproszonych systemach obliczeniowych z wykorzystaniem grafowego podejścia do opisu obliczeń, co pozwala ją jednoznacznie zakwalifikować do dyscypliny „Informatyka techniczna i telekomunikacja”. Podjęta tematyka dobrze wpisuje się we współczesny nurt badań w tym zakresie. Podstawowe cele i zadania pracy zostały zrealizowane.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam zatem, że opiniowana rozprawa Pana mgr inż. Adama Smyka pt. „Projektowanie równoległych programów numerycznych z uwzględnieniem ograniczeń architektonicznych systemów” zawiera samodzielne rozwiązanie przez doktoranta istotnego problemu naukowego i spełnia wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującej Ustawie o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab. inż. Roman Wyrzykowski