

Częstochowa, dn. 03.01.2018

Prof. dr hab. inż. Roman Wyrzykowski  
Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej  
Politechnika Częstochowska  
ul. Dąbrowskiego 69  
42-201 Częstochowa

**RECENZJA  
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Filipa Krużela**

**„Odwzorowanie procedur całkowania numerycznego  
w metodzie elementów skończonych na architekturę  
procesorów masowo wielordzeniowych”**

**Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Banaś, prof. AGH  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Stosowanej  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie**

**1. Obszar problemowy rozprawy**

Tematyka przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Krużela dotyczy ważnego obszaru badawczego w dziedzinie informatyki oraz współczesnych nauk obliczeniowych. Rozpatrywana tematyka posiada nie tylko znaczenie poznawcze, lecz również ściśle wiąże się z konsekwencjami aplikacyjnymi, jakie dla rozwoju nauki i technologii niesie szerokie zastosowania najnowszych metod i narzędzi informatycznych do modelowania i symulacji różnego rodzaju zjawisk fizycznych, złożonych systemów i konstrukcji oraz procesów technologicznych.

Metoda elementów skończonych (MES) stanowi jedną z podstawowych metod obliczeniowych stosowanych w problematyce „Wielkich Wyzwań Nauki” (*Grand Challenges*), głównie do modelowania zjawisk opisywanych równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Charakteryzuje się ona 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.

Zastosowanie systemów z wieloma procesorami czy rdzeniami, funkcjonujących w trybie przetwarzania równoległego, jest skuteczną metodą umożliwiającą prowadzenie eksperymentów numerycznych dla najbardziej interesujących z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego zagadnień charakteryzujących się bardzo dużą złożonością czasową i/lub pamięciową, dla których zastosowanie pojedynczego wątku obliczeniowego jest niewystarczające czy to ze względu na czas obliczeń, czy też ograniczoność zasobów komputera, np. pamięci operacyjnej. Przetwarzanie równoległe rozwiązuje powyższe problemy poprzez podział zadania na mniejsze fragmenty i równoległe ich rozwiązywanie w systemie z wieloma rdzeniami lub klastrze komputerowym.

Jednakże skuteczne zastosowanie przetwarzania równoległego w przypadku MES związane jest z koniecznością rozwiązania szeregu złożonych problemów, w tym również efektywnej organizacji obliczeń z uwzględnieniem właściwości architektury systemu komputerowego. Problem ten nabiera niezwykle istotnej wagi i charakteryzuje się zwiększoną złożonością w przypadku zastosowania współczesnych procesorów i akceleratorów obliczeniowych. Ich wielordzeniowa, a ostatnio również masywnie wielordzeniowa, architektura oparta jest bowiem na równoległym wykorzystaniu zasobów coraz większej liczby jednostek obliczeniowych oraz rozbudowanym, hierarchicznym systemie pamięciowym. Z tego punktu widzenia wybór tematyki rozprawy uważam za trafny, chociaż Autor skoncentrował się tylko na jednym wybranym fragmencie MES, jaki stanowi procedura całkowania numerycznego. Rozważane w dysertacji problemy są ważne i aktualne, zarówno dla teorii, jak i przede wszystkim praktyki zastosowania MES do rozwiązywania złożonych zagadnień naukowych i technicznych.

## **2. Koncepcja i redakcja rozprawy**

Recenzowana praca doktorska obejmuje formalnie 6 rozdziałów, bibliografię zawierającą 127 pozycji, a także 3 dodatki z wynikami opracowanej przez autora procedury automatycznego tuningu dla różnego typu procesorów. Zasadnicza część rozprawy (bez dodatków) liczy łącznie 138 stron.

W *rozdziale pierwszym* Autor zawarł wprowadzenie do stanu badań w obszarze odwzorowania obliczeń MES, w tym również procedur całkowania numerycznego, na współczesne architektury komputerowe wraz z krótką charakterystyką stosowanych w tym celu narzędzi programistycznych. Rozdział ten kończy przedstawienie celu pracy oraz jej zakresu i elementów nowatorskich.

W **rozdziale drugim** przedstawiono badane w pracy architektury wielo- i masywnie wielordzeniowe, obejmujące nowoczesne procesory CPU ogólnego przeznaczenia, układy graficzne GPU, procesory hybrydowe IBM PowerXCell 8i, akceleratory Intel Xeon Phi oraz architektury hybrydowe AMD APU.

Kontynuując bliższe przedstawienie aktualnego stanu badań, w **rozdziale trzecim** scharakteryzowano znane w literaturze algorytmy całkowania numerycznego z uwzględnieniem różnych metod aproksymacji, co pozwoliło wyprowadzić algorytmy całkowania numerycznego dla rozpatrywanych zadań testowych: zagadnienia Poissona oraz uogólnionego problemu konwekcji-dyfuzji-reakcji. Istotne znaczenie dla dalszej części pracy ma dokonana przez autora analiza złożoności obliczeniowej algorytmów całkowania numerycznego, uwzględniająca liczbę operacji oraz wymagania pamięciowe, jak również analiza intensywności arytmetycznej badanych algorytmów. Ten ostatni parametr ma kluczowe znaczenia z punktu widzenia możliwości efektywnego dostosowania algorytmu do charakterystyk architektury procesora, a w szczególności, do właściwości jego hierarchicznego podsystemu pamięci, od rejestrów, poprzez pamięć podręczną, aż do pamięci DRAM.

**Rozdział czwarty** poświęcono opisowi wykorzystywanych w pracy narzędzi programistycznych, obejmujących przede wszystkim języki programowania wraz z ich rozszerzeniami do obliczeń wielowątkowych oraz wyspecjalizowane środowiska do programowania akceleratorów - CUDA i OpenCL. W rozdziale tym scharakteryzowano również zagadnienie organizacji wymiany danych pomiędzy elementami układu host-akcelerator, jak również przedstawiono narzędzia wykorzystywane do analizy wykonania opracowywanych programów równoległych.

W bardzo obszernym **rozdziale piątym** autor skoncentrował większą część oryginalnego materiału rozprawy ukierunkowanego na opracowanie metod odwzorowania procedur całkowania numerycznego na badane architektury. Rozpatrzono przy tym nie tylko warianty z liniową aproksymacją standardową, lecz również z nieciągłą aproksymacją Galerkina wyższych rzędów. W rozdziale tym zaproponowano m.in. autorskie podejście do automatycznego tuningu parametrycznego, co umożliwił automatyzację procesu jak najbardziej efektywnego dostosowania algorytmu (a właściwie kodu) do charakterystyk konkretnej platformy obliczeniowej. Na podkreślenie zasługuje również przeprowadzenie wyczerpującej analizy wydajności uzyskanych implementacji równoległych w oparciu o stosunkowo proste, lecz dostatecznie adekwatne do rozpatrywanych zagadnień, modele wydajnościowe.

W **rozdziale szóstym** dokonano zwięzłego podsumowania pracy, a także wskazano kierunki dalszych badań w obszarze tematyki rozprawy.

### 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. Podstawowym wynikiem o ogólnym charakterze jest wykazanie możliwości efektywnego, w znacznym stopniu zautomatyzowanego, dostosowania dostatecznie złożonych kodów numerycznych, jakie stanowią procedury całkowania numerycznego w metodzie elementów skończonych, do architektur współczesnych systemów wielo- i masywnie wielordzeniowych z pamięcią współdzieloną, z uwzględnieniem takich ich kluczowych cech jak wielopoziomowa hierarchia pamięci, masywne przetwarzanie wielowątkowe oraz intensywne wykorzystanie jednostek wektorowych.
2. Osiągnięcie powyższego wyniku wymagało przede wszystkim opracowania oryginalnej procedury automatycznego tuningu parametrycznego rozpatrywanych kodów numerycznych, uwzględniającej kluczowe charakterystyki i parametry konkretnej architektury, jak również twórczego wykorzystania modeli wydajnościowych uwzględniających takie charakterystyki algorytmów i architektur jak intensywność arytmetyczna oraz wydajność dostępu do pamięci i wydajność obliczeniowa procesora.
3. Kolejnym istotnym innowacyjnym elementem pracy, niezbędnym do uzyskania wyniku wspomnianego w punkcie 1, jest także wszechstronna analiza algorytmów całkowania numerycznego, uwzględniająca rozmaite warianty występujące w różnych dziedzinach zastosowań metody elementów skończonych. Analiza ta obejmowała nie tylko złożoność obliczeniową i pamięciową, lecz również uwzględniała możliwe modyfikacje algorytmów, ukierunkowane na optymalizację ich wykonania na poszczególnych architekturach procesorów.
4. Za ważny i oryginalny wynik o znaczeniu nie tylko aplikacyjnym należy także uznać opracowanie kompleksowego środowiska optymalizacji wykonania algorytmu przedstawionego w postaci kodu OpenCL. Dzięki zastosowaniu zestawu skryptów analizujących parametry wykonania, środowisko to pozwala na osiągnięcie przenośności nie tylko samego kodu OpenCL, lecz również uzyskanie przenośności jego wysokiej wydajności, dla szerokiego zakresu wykorzystywanych procesorów.
5. Obszerne testy przeprowadzone w ramach pracy umożliwiły nie tylko dokonanie eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanego podejścia, lecz również pozwoliły na wskazanie jakie cechy nowoczesnych architektur mają największy wpływ na wydajność obliczeń w podobnych algorytmach. Całość przeprowadzonych badań umożliwiła zaś sformułowanie rekomendacji w zakresie wyboru odpowiednich platform sprzętowych oraz projektowania algorytmów je wykorzystujących.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane w 8 pracach w języku angielskim, przy czym aż 3 publikacje ukazały się w czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej, jedna – w specjalistycznym czasopiśmie krajowym, zaś 4 prace opublikowano w materiałach reprezentatywnych konferencji o zasięgu ogóln światowym, w tym również w prestiżowej europejskiej konferencji EURO-PAR. Świadczy to bardzo pozytywnie o stopniu weryfikacji uzyskanych rezultatów przez międzynarodową społeczność specjalistów zajmujących się rozpatrywaną dziedziną.

Z omówienia treści pracy, które przytoczono w punkcie 2 niniejszej recenzji, wynika, iż cztery pierwsze rozdziały rozprawy poświęcone są w dużym stopniu krytycznemu przedstawieniu stanu wiedzy w zakresie tematyki pracy, potwierdzając w ten sposób ogólny stan wiedzy w zakresie dyscypliny Informatyka oraz symulacji komputerowych, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień programowania równoległego, w tym: sprzętowych uwarunkowań wydajności aplikacji równoległych, modeli programowania równoległego wraz z odpowiednimi standardami i środowiskami programistycznymi oraz wykorzystania modeli i benchmarków do oceny wydajności aplikacji równoległych. Jakość tych rozdziałów nie budzi moich istotnych zastrzeżeń. Świadczą one o dużej wiedzy Autora w zakresie tematyki badań, popartej szerokim doświadczeniem praktycznym związanym z wdrożeniem i wykorzystaniem aplikacji równoległych implementujących metodę elementów skończonych. Tę pozytywną ocenę wspiera również poziom wiedzy Autora w zakresie modelowania numerycznego oraz optymalizacji kodów numerycznych z uwzględnieniem właściwości konkretnych architektur wielo- i masywnie wielordzeniowych. Również moja opinia o bibliografii wykorzystanej w pracy oraz jej kompletności jest generalnie pozytywna, z jednym wyjątkiem, o którym wspominałem w kolejnym punkcie recenzji.

#### **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, w tym również testów porównawczych, przeprowadzonych dla zróżnicowanej gamy architektur wielo- i masywnie wielordzeniowych oraz różnych wariantów procedury całkowania, z uwzględnieniem uwarunkowań zadań testowych w postaci zagadnienia Poissona oraz uogólnionego problemu konwekcji-dyfuzji-reakcji. Generalnie sposób i jakość przeprowadzenia badań eksperymentalnych stanowi bardzo wartościowy element pracy i zasługuje na podkreślenie.

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

1. Prezentacja wyników zrealizowanych badań eksperymentalnych zyskałaby bardzo na przejrzystości dzięki zebraniu wszystkich badanych platform sprzętowych wraz z ich charakterystykami w jednym miejscu, najlepiej w postaci tabeli. W chwili obecnej

dane o platformach rozproszone są w tekście obszernego rozdziału 5, co znacznie utrudnia czytelnikowi analizę porównawczą uzyskanych wyników wydajnościowych. Wręcz idealnym miejscem dla takiej tabeli byłby np. podrozdział 2.6, który w obecnej postaci niewiele wnosi do rozprawy.

2. Moim zdaniem, Autor niedostatecznie wyraźnie wypunktował kluczowe, nowatorskie wyniki swoich badań. W podrozdziale 1.4.2 oraz końcowym rozdziale 6 Autor skoncentrował się faktycznie na omówieniu zawartości poszczególnych rozdziałów pracy, ze wskazaniem na występujące w nich niektóre elementy nowatorskie. Stracono w ten sposób szansę na podjęcie próby odejścia od takiego „chronologicznego” i przez to niedostatecznie przekonywującego opisu w stronę klarownego sformułowania najważniejszych wyników przeprowadzonych badań, uporządkowanych zgodnie z wewnętrzną logiką oraz wagą tych wyników. W ten sposób na przykład praktycznie wypadł z pola widzenia tak istotny przecież wynik jak opracowanie kompleksowego środowiska optymalizacji wykonania algorytmu przedstawionego w postaci kodu OpenCL.
3. Istotną słabością pracy jest brak sformułowania uogólnionej metodyki (czy metodologii) odwzorowania procedury całkowania numerycznego na architektury wielo- i masywnie wielordzeniowe. W rozprawie Autor dla każdego typu architektury procesorów (procesor Cell, procesory ogólnego przeznaczenia, akceleratory graficzne, koprocesory Intel Xeon Phi oraz APU) stara się sformułować oddzielną metodologię. Na dodatek przedstawia je w sposób niezbyt precyzyjny, nie próbując na przykład sformułować sekwencji kroków, które trzeba zrealizować, aby dokonać takiego odwzorowania. Podsumowując uważam, iż praca znacznie zyskałaby na wartości z informatycznego punktu widzenia, gdyby Autor pokusił się o opracowanie uogólnionej i dostatecznie precyzyjnej metodyki odwzorowania rozpatrywanych kodów numerycznych na architektury wielo- oraz masywnie wielordzeniowe.
4. Zarzut niezbyt precyzyjnego, niejednoznacznego sformułowania chciałbym również rozszerzyć na procedurę zautomatyzowanego tuningu parametrycznego. Moim zdaniem, aż prosi się ona o jednoznaczne sformułowanie w postaci algorytmu. W tej chwili na przykład można się tylko domyślać co oznaczają zera i jedyńki w kodach binarnych występujących wzdłuż osi x dla wykresów ilustrujących procedurę tuningu (np. na str. 100) czy w tabelkach na str. 102, 106, 114.
5. Uwaga o bardziej szczegółowym charakterze dotyczy przedstawionej na str. 80 charakterystyki testu „triad” jako wzorcowego do mierzenia wydajności komputerów wysokiej wydajności. Osobiście nie spotkałem się z użyciem tego niskopoziomowego testu w tym celu, a powszechnie stosowany jest w tym przypadku test (benchmark) LINPACK, stopniowo uzupełniany przez bardziej złożone benchmarki typu HPCG czy Graph500.

6. Na str. 81 Autor pisze o wyliczaniu teoretycznych czasów wykonania algorytmu i przytacza pewne wzory cząstkowe. Należałoby być konsekwentnym i przedstawić wynikowy wzór dla czasu wykonania, nie pozostawiając żadnych niedomówień.
7. W pracy należało przewidzieć oddzielny podrozdział poświęcony zdefiniowaniu stosowanych metryk wydajnościowych. W ten sposób można by uniknąć niektórych niejednoznaczności występujących w rozprawie. Dotyczy to szczególności pojęcia przyspieszenia, gdyż czytając tekst na str. 82 musimy się domyślać co Autor ma na myśli mówiąc o przyspieszeniu na poziomie 7%. Raczej nie ma on tutaj na myśli klasycznej definicji przyspieszenia obliczeń równoległych, która wszelkie wartości poniżej 1 rozpatruje jako odpowiadające nieefektywnej organizacji obliczeń. Podobna wątpliwość dotyczy str. 84, gdy pisze on o uzyskanym bardzo dobrym wskaźniku przyspieszenia obliczeń.
8. W spisie literatury praktycznie brak referencji do dostatecznie bogatej literatury poświęconej technice automatycznego tuningu algorytmów dla architektur wielo- oraz masywnie wielordzeniowych.

## 5. Podsumowanie

Przytoczone wyżej uwagi krytyczne nie umniejszają wysokiej wartości merytorycznej pracy, która stanowi istotny i oryginalny wkład Autora w rozwój metod i algorytmów organizacji obliczeń równoległych z wykorzystaniem MES, co pozwala ją jednoznacznie zakwalifikować do **dyscypliny Informatyka**.

Podsumowując recenzję, stwierdzam więc, że moja generalna opinia o pracy „**Odwzorowanie procedur całkowania numerycznego w metodzie elementów skończonych na architekturę procesorów masowo wielordzeniowych**” jest zdecydowanie pozytywna. Uważam, że przedstawiona mi do recenzji praca zawiera samodzielne rozwiązanie przez doktoranta ważnego i trudnego problemu naukowego, co w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim przez odnośną ustawę o tytule i stopniach naukowych. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie pracy do publicznej obrony celem uzyskania przez Autora stopnia doktora nauk technicznych w zakresie informatyki.

Prof. dr hab. inż. Roman Wyrzykowski

