

Częstochowa, dn. 03.07.2017

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

**RECENZJA**  
**ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**  
**mgr inż. Kazimierza Michalika**

**„Zarządzanie rozproszoną siatką obliczeniową w równoległych symulacjach adaptacyjną metodą elementów skończonych”**

**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. Kazimierza Michalika dotyczy ważnego obszaru badawczego w dziedzinie informatyki oraz współczesnych nauk obliczeniowych. Rozpatrywana tematyka posiada nie tylko znaczenie poznawcze, lecz również ściśle wiąże się z praktycznymi implikacjami, jakie dla rozwoju nauki i technologii niesie szerokie zastosowania najnowszych metod i narzędzi informatycznych do modelowania i symulacji różnego rodzaju zjawisk fizycznych, procesów technologicznych czy też złożonych systemów i konstrukcji.

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 procesu (wątku) obliczeniowego może okazać się niewystarczające czy to ze względu na czas obliczeń, czy też ograniczoność zasobów komputera, np. pamięci operacyjnej. Przetwarzanie równoległe i rozproszone rozwiązuje powyższe problemy poprzez podział zadania na mniejsze fragmenty i równoległe ich rozwiązywanie w systemie z wieloma rdzeniami czy też klastrze.

Jednakże skuteczne zastosowanie przetwarzania równoległego w przypadku MES związane jest z koniecznością rozwiązania szeregu złożonych problemów, w tym również zarządzania rozproszoną siatką obliczeniową. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia i charakteryzuje się zwiększoną złożonością w przypadku symulacji wykorzystujących adaptacyjną wersję MES, w których siatka zmienia się w trakcie obliczeń. Z tego punktu widzenia wybór tematyki rozprawy uważam za trafny, a rozważane w niej problemy są ważne i aktualne, zarówno dla teorii, jak i przede wszystkim praktyki zastosowania adaptacyjnej metody elementów skończonych do rozwiązywania złożonych zagadnień naukowych i technicznych.

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

Recenzowana praca doktorska obejmuje formalnie 9 rozdziałów oraz bibliografię zawierającą 127 pozycji. Praca liczy łącznie 134 strony.

W *rozdziale pierwszym* Autor zawarł wprowadzenie do stanu badań w obszarze zarządzania siatką obliczeniową w symulacjach wykorzystujących adaptacyjną metodę elementów skończonych wraz z krótką charakterystyką równoległych architektur obliczeniowych. Rozdział ten kończy przedstawienie celu pracy oraz jej zakresu i elementów nowatorskich.

*Rozdział drugi* zawiera zwięzły opis zasadniczych pojęć dla adaptacji w metodzie elementów skończonych, w tym metod oszacowania błędów rozwiązania, rodzajów elementów skończonych i pojęcia siatki hybrydowej oraz omówienie procesu podziału siatki w przypadku rozpatrywanej adaptacji typu  $h$ .

Kontynuując bliższe przedstawienie aktualnego stanu badań, w *rozdziale trzecim* scharakteryzowano istniejące w literaturze modele reprezentacji siatki obliczeniowej z uwzględnieniem ich zastosowania w równoległych symulacjach adaptacyjną metodą elementów skończonych. Istotne znaczenie dla dalszej części pracy ma także wprowadzenie modelu wydajnościowego opartego na ocenie złożoności obliczeniowej oraz złożoności pamięciowej (zapotrzebowania na pamięć).

*Rozdział czwarty* rozpoczyna oryginalną część rozprawy ukierunkowaną na opracowanie metod i algorytmów odwzorowania operatorów rozproszonej siatki adaptacyjnej na różnych poziomach zrównoleglenia obliczeń. W rozdziale tym zaproponowano autorską definicję formalną zarządzania adaptacyjną siatką obliczeniową, bazującą na wprowadzeniu odpowiednich operatorów siatki. Umożliwiło to w szczególności zaproponowanie kryteriów jakości w postaci wydajności obliczeniowej oraz wydajności pamięciowej.

W kolejnych *rozdziałach 5, 6 oraz 7* zaproponowano oryginalne rozwiązania algorytmiczne umożliwiające efektywną organizację obliczeń dla trzech zasadniczych poziomów zrównoleglenia: wektoryzacji, wielowątkowości z pamięcią wspólną oraz przetwarzanie równoległego w modelu z pamięcią rozproszoną. Dla każdego z tych rozwiązań przeprowadzono analizy teoretyczne i symulacje pozwalające na weryfikację ich poprawności oraz jakości, ze szczególnym naciskiem na efektywne wykorzystanie zasobów sprzętowych.

*Rozdział ósmy* zawiera praktyczne przykłady wykorzystania zaproponowanych rozwiązań zarówno w przykładach akademickich, jak i tych pochodzących z praktyki przemysłowej. Możliwość taka pojawiła się dzięki włączeniu opracowanych przez Autora algorytmów do autorskiej biblioteki programowej realizującej zarządzanie rozproszoną siatką.

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

### **3. Oryginalne osiągnięcia**

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

1. Zaproponowano ściśle zdefiniowanie pojęcia zarządzania rozproszoną siatką obliczeniową dla niezwykle ważnego a jednocześnie złożonego przypadku adaptacyjnych siatek obliczeniowych wykorzystywanych w metodzie elementów skończonych. Zaproponowane podejście oparto na zastosowaniu zbioru operatorów, które realizują funkcjonalności wymagane w procesie zarządzania siatką. Uzyskanie reprezentatywnych profili wykorzystania operatorów w wybranych przypadkach testowych oraz rzeczywistych symulacjach MES umożliwiło ukierunkowanie opracowywanych następnie metod implementacji operatorów siatki dla różnych poziomów zrównoleglenia obliczeń w taki sposób, aby zapewnić efektywne wykorzystanie dostępnych zasobów sprzętowych.
2. W celu efektywnego wykorzystania możliwości przetwarzania wektorowego (wektoryzacji) na poziomie pojedynczego rdzenia obliczeniowego opracowano autorski algorytm adaptacji wybranej kolekcji elementów siatki z zastosowaniem tablic decyzyjnych do przyspieszenia procesu adaptacji siatki.
3. Dla poziomu przetwarzania wielowątkowego na wielu rdzeniach w modelu z pamięcią wspólną opracowano oryginalny algorytm zapisu i kompresji współrzędnych siatki obliczeniowej, co w większości przypadków pozwoliło istotnie przyspieszyć obliczenia dzięki zmniejszeniu wymagań w stosunku do przepustowości podsystemu pamięci, tak krytycznych dla współczesnych architektur systemów komputerowych.
4. W celu zapewnienia skalowalności procesu zarządzania adaptacyjną siatką obliczeniową w systemach równoległych z pamięcią rozproszoną zaproponowano oryginalny algorytm jednoznacznego identyfikowania obiektów siatki w globalnej przestrzeni obliczeń bez komunikacji pomiędzy węzłami oraz bez konieczności synchronizacji procesów, co posiada niezwykle istotne znaczenie dla możliwości efektywnej realizacji adaptacyjnych symulacji MES w dobie systemów wielkiej skali.

Należy przy tym podkreślić, iż zaproponowane rozwiązania zostały wdrożone w ramach pakietu ModFEM, co umożliwiło praktyczne zweryfikowanie skuteczności opracowanych przez Autora rozwiązań zarówno w przykładach akademickich, jak i tych pochodzących z praktyki przemysłowej.

#### **4. Uwagi krytyczne**

Praca pod względem merytorycznym i redakcyjnym napisana jest ogólnie poprawnie. Autor nie ustrzegł się jednak pewnych braków, nieścisłości i po prostu błędów

redakcyjnych. Wśród uwag o charakterze krytycznym, a po trosze dyskusyjnym, wymienić należy :

1. Interesujące byłoby omówienie możliwości wykorzystania nowoczesnych akceleratorów obliczeniowych, o których wspomina się na stronie 10, do realizacji zaproponowanych rozwiązań. Należy dodać, iż wbrew temu co twierdzi Autor, ich wykorzystanie nie zawsze wymaga użycia specjalistycznych technologii, gdyż np. akceleratory z rodziny Intel Xeon Phi można programować z użyciem standardowych technologii OpenMP oraz MPI.
2. W rozdziale 1.4.1 omawiającym istniejące rozwiązania narzędzi do zarządzania adaptacyjną siatką obliczeniową zabrakło mi scharakteryzowania czy chociażby odwołania się do takiego niezwykle popularnego i zaawansowanego środowiska wspierającego tworzenie aplikacji naukowych jak Trilinos.
3. Zarządzanie siatką obliczeniową w metodzie elementów skończonych stanowi tylko jeden z elementów jej realizacji. Kluczowym elementem jest tutaj solwer. W recenzowanej rozprawie nie znalazłem żadnej wzmianki o tym czy i jak sposób implementacji solwera wpływa na proces zarządzania rozproszoną siatką w adaptacyjnej metodzie elementów skończonych.
4. Budując kryterium oceny w postaci teoretycznej wydajności obliczeniowej (wyrażenie 4.37), Autor przyjął za podstawę addytywność zaproponowanej miary względem zbioru operatorów, nie podając żadnego uzasadnienia, że taka addytywność ma miejsce w rzeczywistości. Czy Autor byłby w stanie podać takie uzasadnienie ?
5. Czy Autor rozważał wpływ hierarchicznej struktury pamięci współczesnych systemów komputerowych, gdzie w szczególności niezwykle istotną rolę odgrywa pamięć podręczna typu cache czy też architektura NUMA, na efektywność algorytmów opracowanych w rozdziałach 5 oraz 6 ?
6. W rozdziale 5.2 Autor podaje szereg warunków, które jego zdaniem koniecznie muszą być spełnione, aby kompilator mógł dokonać wektoryzacji obliczeń dla określonej sekwencji programowej. Nie wszystkie warunki zostały dostatecznie jasno sformułowane, a niektóre z nich budzą wątpliwości. Dotyczy to np. warunku drugiego, czwartego i szóstego. Autor nie uwzględnił w szczególności tego faktu, iż współczesne kompilatory oraz architektury procesorów podlegają stałemu rozwojowi oraz doskonaleniu.
7. Na efektywność wektoryzacji w decydującej mierze wpływa możliwość zapewnienia odpowiedniego wydajnego dostępu do pamięci, w związku z czym powszechnie znany jest podział algorytmów na memory-bound oraz computing-

bound. Zaproponowana przez Autora metoda kompresji sprzyja zmniejszeniu wymagań w stosunku do wymaganej wydajności dostępu do pamięci. Tym niemniej interesujące i celowe byłoby przeprowadzenie odpowiedniej analizy wydajnościowej, do czego mógłby zostać wykorzystany popularny ostatnio model Roofline.

8. Auto powinien zwrócić większą uwagę na sposób przedstawienia pozycji w spisie literatury. Na przykład, dla pozycji [67] w ogóle nie podano miejsca jej opublikowania, roku publikacji, itd.; dla pozycji [66] nie podano tytułu publikacji, numeru tomu LNCS ani roku publikacji; zaś w pozycji [61] podano błędnie nazwę serii wydawniczej – Lecture Notes in Computational Science !!

## 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 z wykorzystaniem MES, co pozwala ją jednoznacznie zakwalifikować do **dyscypliny Informatyka**.

Podsumowując recenzję, stwierdzam więc, że moja generalna opinia o pracy „Zarządzanie rozproszoną siatką obliczeniową w równoległych symulacjach adaptacyjną metodą elementów skończonych” jest zdecydowanie i jednoznacznie 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.

