

dr hab. inż. Paweł Czarnul
Katedra Architektury Systemów Komputerowych
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 21 grudnia 2020 roku

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA
WYDZIAŁU INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**Autor rozprawy: mgr inż. Grzegorz Gurgul
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Tytuł rozprawy: Designing Distributed Alternating-directions Solvers for Isogeometric Finite Element Method Analysis

**Promotor: prof. dr hab. Maciej Paszyński
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Bartosz Baliś, prof. uczelni**

Wstęp

Praca została napisana w języku angielskim i zawiera: streszczenie w języku polskim, języku angielskim, spis treści, załączniki, listę skrótów/terminów, listę rysunków, tabel, bibliografię, listę publikacji, których współautorem jest autor rozprawy doktorskiej. Wprowadzenie zawiera ogólny opis kontekstu pracy oraz podstawowych terminów, w szczególności metody izogeometrycznych elementów skończonych IGA-FEM (Isogeometric Finite Element Method), zmiennokierunkowego solwera ADS (Alternating Directions Solver), przetwarzania równoległego i rozproszonego za pomocą MPI, Hadoop, Spark oraz rozwiązań chmurowych. W rozdziale tym autor sformułował tezę a także otwarte problemy i główne osiągnięcia naukowe rozprawy. Kolejny rozdział zawiera bazowy opis algorytmu IGA-ADI (Isogeometric Alternating Directions Implicit Algorithm). Rozdział trzeci prezentuje modułowe i obiektowe rozwiązanie IGA-ADI dla systemów z pamięcią współdzieloną, które składa się z modułów: Graph-grammar multi-frontal solver, Alternating

Directions Solver, Alternating Directions Implicit Solver. Rozdział czwarty przedstawia IGA-ADI jako algorytm w formie grafu, możliwy do wyrażenia w modelu środowiska Pregel. Z kolei w rozdziale piątym autor wyszczególnia projekt i implementację IGA-ADI w środowisku Giraph, zaś w rozdziale szóstym przedstawia możliwość rozwiązania wybranych problemów wraz ze szczegółową analizą wydajnościową dla problemu transportu ciepła – skalowalności i wydajności oraz czynników je determinujących w środowisku chmurowym. Finalnie, rozdział siódmy zawiera podsumowanie rozprawy oraz możliwe kierunki rozwoju.

Główna część pracy bez literatury liczy 139 stron, zaś wraz z wszystkimi dodatkami i literaturą aż 165 stron.

Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Praca obejmuje zagadnienia wydajności i skalowania równoległej implementacji algorytmu IGA-ADI w środowisku jedno- i wielowęzłowym w chmurze a także jego wykorzystania dla wybranych aplikacji. W szczególności praca stanowi, że możliwa jest implementacja algorytmu solwera zmiennokierunkowego do analizy izogeometrycznej z dyskretyzacją czasu typu implicite, z zachowaniem bezwzględnej stabilności obliczeń i liniową złożonością obliczeniową (wykonanie sekwencyjne). Wskazuje także na możliwość takiej dekompozycji algorytmu solwera i grafowej reprezentacji, która pozwala na wydajne przetwarzanie w środowisku chmury obliczeniowej.

Teza została jasno sformułowana.

Czy autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

Uważam, że autor posiadał odpowiednie umiejętności w zakresie prowadzenia badań naukowych, odnoszące się do szeregu aspektów podejścia i analizy problemu, w szczególności:

- umiejętności dekompozycji oryginalnego problemu na części pozwalające z jednej strony na modułowy i obiektowy projekt rozwiązania, z drugiej na możliwość reprezentacji rozproszonego solwera zmiennokierunkowego w formie grafowej zgodnie z podejściem „think like a vertex” (TLAV) w taki sposób, aby osiągnąć możliwie dużą wydajność i skalowalność w rozproszonym środowisku chmurowym,

- umiejętności analizy wydajnościowej wyników uzyskanych w środowisku jedno- i wielowęzłowym w chmurze wraz z analizą czynników wpływających na skalowalność, zgodnie z kilkoma modelami wydajnościowymi. Z całą pewnością nie było to trywialne zadanie ze względu na trudności niskopoziomowego profilowania w takim środowisku i konieczność analitycznego podejścia przy dopasowaniu modeli.

Z drugiej strony, praca dotyczy kwestii stabilności i złożoności rozwiązania. Cecha stabilności została wykazana eksperymentalnie dla problemu transportu ciepła w rozdziale 6.1.2, dla różnych kroków czasowych i przeanalizowana teoretycznie w dodatku A pracy.

Metoda rozwiązania autora polegała na analizie algorytmu, następnie zaprojektowaniu modułowego i obiektowego rozwiązania, kolejno wykonaniu analizy modeli przetwarzania w istniejących frameworkach działających w środowisku rozproszonym, w które autor mógłby wdrożyć algorytm z uwzględnieniem zarówno obliczeń jak i przepływu danych, aby uzyskać dobrą skalowalność dla finalnej implementacji. W kwestii analizy wyników dotyczących skalowalności autor wykazał się znajomością podstawowych praw i modeli takich jak prawo Amdahla, Gustaffsona, prawa Universal Scalability Law (rozszerzenie prawa Amdahla uwzględniające narzuty komunikacyjne), miary Karpa-Flatta i był w stanie dokonać całościowej analizy działania algorytmu jak i jego faz. Pozwoliło to wnioskować o wąskich gardłach implementacji uruchamianych w środowiskach testowych. Fragment ten potwierdza kompetencje autora rozprawy dotyczące analizy działania algorytmów rozproszonych w zakresie pracy. Metody te można uznać za adekwatne biorąc pod uwagę testowe środowisko rozproszone/chmurowe. Skalowalność rozwiązania została przedstawiona w rozdziale 6. Konkretnie autor pokazał istotne zmniejszanie czasów działania (strong scalability) solwera IGA-ADI zaimplementowanego z wykorzystaniem frameworka Giraph dla większych rozmiarów danych od 1 do 64 wątków (przyspieszenie 24,3) w jednowęzłowym środowisku z 96 vCPU a także od 1 do 256 wątków (przyspieszenie 80,81) uruchomionego na klastrze z 16 węzłami oraz 256 vCPU dla rozmiaru $N=12888^2$, szacując jednocześnie granice przyspieszenia. Jednocześnie modele przyspieszenia obliczeń wg USL zostały zaprezentowane dla dwóch środowisk wskazując generalnie większe wartości dla większych rozmiarów danych dla środowiska klastrowego. W rozdziale 6.2.5 autor przedstawił eksperymentalnie określoną frakcję szeregową $e(n,p)$ w kontekście miary Karpa-Flatta implementacji IGA-ADI dla różnych testowanych liczb wątków i dla czterech różnych testowanych rozmiarów danych dla środowiska jedno- (poniżej 7,5%) i wielowęzłowego (do ok. 12,5%).

Jak pokazano w rozdziale 6.2.1, w tym na rys. 6.8 czas kroku symulacji sekwencyjnej zależy liniowo od rozmiaru problemu.

W dodatku do pracy autor wykazał 12 publikacji, których jest współautorem, z czego 2 publikacje ze wskaźnikiem IF. Jedna z tych publikacji ma 140, druga 70 punktów na nowej liście MNiSW, obie uwzględniane są w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Dodatkowo wykazano wiodące udziały jednostkowe autora rozprawy w tych publikacjach. Stąd wyniki publikacyjne należy ocenić wysoko i jako ponadprzeciętne w rozpatrywanej dyscyplinie.

Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Tematyka rozprawy tj. modelowanie oraz optymalizacja równoległych implementacji dla wymagających obliczeniowo algorytmów rozwiązujących zadane klasy problemów jest ważna, w szczególności w kontekście dynamicznego rozwoju systemów wysokiej wydajności. Na przestrzeni ostatnich lat zwiększanie wydajności systemów komputerowych miało miejsce głównie poprzez zwiększanie liczby rdzeni procesorów, obok optymalizacji parametrów i rozmiaru pamięci (w tym podręcznej) etc., co de facto wymusza stosowanie algorytmów równoległych w celu wykorzystania potencjału środowiska. W tym kontekście, kluczowe dla programisty/użytkownika końcowego danego rozwiązania są następujące kwestie, podjęte i w dużej mierze rozwiązane przez rozprawę doktorską dla IGA-ADI:

1. Minimalizacja czasu działania aplikacji. Zakładając bazowy algorytm dla rozważanej klasy problemu kluczowe jest uzyskanie dużego przyspieszenia obliczeń, które to zagadnienie jest szeroko analizowane przez autora, w rozdziale 6.2.2 (*strong scalability*). Ważny jest tutaj także stos programistyczny, który w pewnym sensie został przyjęty a priori przez autora w postaci wykorzystania konkretnego frameworka oraz środowiska rozproszonego. Z jednej strony analiza wąskich gardeł algorytmu jak np. niezrównoważenie obliczeń ma charakter uniwersalny, z drugiej strony pewne parametry z góry założonego środowiska (np. opóźnienie, przepustowość) mogą determinować konkretne przyspieszenie w danym środowisku.
2. Możliwość uruchomienia zadania dla rozmiaru problemu, dla którego jest to niemożliwe na pojedynczej maszynie/korzystając z mniejszej liczby węzłów. Aspekt ten jest analizowany przez autora w rozdziale 6.2.3 w pracy (*weak scalability*).
3. Łatwość kodowania i uruchomienia rozwiązania – w tym kontekście implementacja autora i przyjęte środowisko dostępne są dla szerokiej grupy odbiorców ze względu na stosunkowo wysoki poziom abstrakcji interfejsu programistycznego. Potencjalnie także zapewnienie

niezawodności rozwiązania może być wsparte przez mechanizmy oferowane na poziomie chmury.

Podsumowując, tendencja wykorzystania po pierwsze frameworków wyższego poziomu niż implementacje wykorzystujące MPI, OpenMP, OpenCL, CUDA, OpenACC etc. a po drugie wirtualizacji to bardzo aktualne podejścia zapewniające łatwość wdrożenia, także potencjalnie dobrą skalowalność dla pewnych klas problemów (te aspekty potwierdzone w pracy), z drugiej na pewno kosztem narzutów wydajnościowych. Ten ostatni aspekt nie powinien być pomijany przy ocenie wydajności zarówno frameworków jak i narzutów z wirtualizacji. W tym ostatnim zakresie ocena rozwiązania może być rozszerzona w przyszłości.

Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora, wiedzy na zaawansowanym poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającym obszarowi badań naukowych?

Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Autor zademonstrował wiedzę na poziomie podstawowym w zakresie zagadnień powiązanych z tematyką rozprawy:

1. Algorytmu IGA-ADI oraz powiązanych koncepcji w sensie dekompozycji rozwiązania i zaprojektowania koncepcji zrównoleglenia.
2. Znajomości warstw stosu programistycznego w kontekście bibliotek i frameworków programowania równoległego i rozproszonego.
3. Znajomości wybranych modeli przetwarzania równoległego i rozproszonego oraz umiejętności wyrażenia algorytmu w wybranym modelu zaimplementowanym we frameworku.
4. Możliwości rozwiązania różnych konkretnych problemów tj. projekcji terenu, transportu ciepła, symulacji powodzi.

Z drugiej strony, wiedza szczegółowa autora widoczna jest głównie w zakresie: kwestii implementacyjnych rozwiązania, algorytmicznym, szczegółowej analizy wydajnościowej z uwzględnieniem prawa Amdahla, Gustaffsona, USL, miary Karpa-Flatta (szczególnie uwzględnienia narzutu dla różnych konfiguracji rozmiaru problemu i liczby wątków), dopasowania

współczynników modeli do obserwowanych wyników czasowych, analizie wąskich gardeł przetwarzania.

Opisy zagadnień w pracy zawierają cytowania do 135 pozycji literatury aż do roku 2020 i świadczą o znajomości literatury przez autora, w zakresie tematyki powiązanej z pracą. Pozycje literatury obejmują artykuły w uznanych czasopismach, książki, publikacje konferencyjne, prace doktorskie, magisterskie w zakresie analizy izogeometrycznej, przetwarzania danych w dużej skali, technologii przetwarzania równoległego oraz rozproszonego, ogólnych standardów programistycznych jak i frameworków przetwarzania równoległego jak np. MPI, Spark, frameworków szczególnie dedykowanych do przetwarzania grafów, analizy izogeometrycznej (także aspektów jej zrównoleglania), uruchamiania aplikacji naukowych i ich migracji do środowiska chmurowego, modeli i analizy wydajnościowej. Są to pozycje jak najbardziej adekwatne i aktualne z rozważanej dziedziny wiedzy.

Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze?

Jakie są najważniejsze osiągnięcia rozprawy?

Oryginalny dorobek autora i osiągnięcia przedstawione w pracy postrzegam w zaproponowaniu kompleksowego, równoległego rozwiązania dla algorytmu IGA-ADI (Isogeometric Alternating Directions Implicit Algorithm) i wykazaniu jego przydatności dla wybranych aplikacji oraz skalowalności w środowiskach takich jak jednowęzłowa maszyna wielordzeniowa oraz klaster maszyn. Autor pokazał przyspieszenie obliczeń i de facto także możliwość uruchamiania dużych problemów, potencjalnie wykraczających poza możliwości pamięciowe jednej maszyny, w środowisku rozproszonym/chmurowym. Od strony koncepcyjnej praca oddziela ideę zrównoleglania od implementacji i adaptację pomysłu do wybranego frameworka przetwarzania równoległego. Rozwiązanie pozwala na implementację różnych domenowych problemów, jak pokazano w rozdziale 6.1, jednocześnie skupiając się na możliwym do wykorzystania potencjale modelu wynikającego z algorytmu. Z praktycznego punktu widzenia rozwiązanie pozwala na zrównoleglanie poniżej poziomu API dla problemu domenowego, co stanowi bezsprzeczną zaletę.

Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Praca, w moim przekonaniu, nie zawiera istotnych słabych punktów. Tym niemniej, poniższe elementy byłyby wskazane z punktu widzenia pełnej oceny wydajności i praktyczności rozwiązania:

1. Analiza wydajnościowa, pomimo zastosowania kilku modeli i dużej objętości zyskałaby po określeniu narzutów następujących warstw:

- środowiska chmurowego/wirtualizacji,

- narzutu środowiska typu Giraph w porównaniu do implementacji poziomu MPI+OpenMP/Pthreads/OpenCL etc.

Autor najwyraźniej zdaje sobie sprawę z tego typu aspektów i przedstawia częściowe informacje w dyskusji porównującej wyniki obiektowego solwera do wersji TLAV w rozdziale 6.3 a także w dyskusji o potencjalnej wydajności implementacji MPI+OpenMP względem implementacji TLAV w rozdziale 7. Tutaj warto zaznaczyć, że pełne porównanie powinno uwzględniać nie tylko przyspieszenie obliczeń, ale i czasy działania zarówno jedno jak i wieloprotocowych/wątkowych obu wersji. Co więcej, implementacja typu MPI+OpenMP może skorzystać także z szerokich możliwości ustawienia process/thread affinity, co dla wielu aplikacji nie jest bez znaczenia pod względem wydajności.

2. W pracy zabrakło mi szerszej analizy wydajnościowo-kosztowej (czasy działania względem kosztów za wykorzystanie infrastruktury o pewnym rozmiarze), w szczególności w kontekście środowiska chmurowego, które jest środowiskiem testowym. Czy autor jest w stanie przedstawić, bardziej precyzyjnie i kompleksowo niż w rozdziale 6.5, wnioski co do stosunku wydajność/koszt dla różnych konfiguracji chmurowych, potencjalnie dla różnych dostawców i wybranych rozmiarów danych problemu?

Uwagi szczegółowe i redakcyjne

1. Dlaczego na rys. 6.10 (s. 116) dla przypadku oznaczonego 3072 widzimy gorszy czas dla 32 wątków w porównaniu do czasu dla 16 wątków?
2. Dlaczego na rys. 6.13 (s. 120) obserwujemy większe przyspieszenie obliczeń dla przypadku c) względem b) oraz a) – w kontekście rozmiarów problemu?

3. Czy autor może podać bardziej szczegółowe, statystyczne dane odnośnie przewidywalności wykonania/czasów obliczeń w chmurze, w nawiązaniu do komentarza w rozdziale 6.5 na s. 134 a także w rozdziale 6.2 na s. 111?
4. Odnośnie uwagi autora w kwestii wsparcia dla interfejsu wejścia-wyjścia w MPI (s. 18) należy zauważyć, że MPI I/O pozwala na równoległy dostęp do pliku/ów przez procesy aplikacji MPI. Dodatkowo, MPI wspiera dynamiczne tworzenie procesów (np. `MPI_Comm_spawn`).
5. Interesujące byłoby odniesienie się przez autora co do możliwości wyrażenia algorytmu w modelu PGAS a także możliwości wykonania ew. testu wydajnościowego implementacji takiego rozwiązania w przyszłości.
6. Czy i w jaki sposób, w opinii autora, rozwiązywanie problemów o dużym rozmiarze mogłoby zyskać na wykorzystaniu klastra z pamięcią NVRAM/persistent memory – w kontekście komentarza autora na s. 71?
7. Czy autor może scharakteryzować preferowane ustawienia środowiska Giraph bardziej precyzyjnie niż zbiór rekomendacji ze s. 110?
8. Uważam, że autor powinien podchodzić ostrożnie do używania sformułowań takich jak ‘optimal’ w kontekście proponowanych rozwiązań jak np. na początku rozdziału 4.2.5 na s. 73 lub na s. 96, gdyż de facto byłoby to uprawnione po przeprowadzeniu formalnego dowodu optymalności danego rozwiązania.
9. Warto byłoby przedstawić bardziej szczegółowe dane odnośnie wymaganego rozmiaru danych przez aplikację w stosunku do rozmiaru problemu, poza informacjami podanymi np. na s. 113.
10. Język pracy uważam za bardzo dobry, znaleźć można nieliczne uchybienia np. powinno być „the need for modification” na s. 42. W nielicznych przypadkach wskazane byłyby odwołania do rysunków przed samym rysunkiem np. aktualnie odwołanie do Fig. 6.18 znajduje się na s. 127.
11. Dla czytelności można by rozważyć skalę logarytmiczną dla wykresów względem liczby wątków np. na s. 124 i innych.
12. Od strony edytorskiej, sugerowałbym nie używać pojedynczych sekcji na danym poziomie zagnieżdżenia jak np. 2.1. Graph-grammar multi-frontal solver.

Podsumowanie i ocena rozprawy

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Grzegorz Gurgul zaprezentował kompleksowe rozwiązanie do równoległego wykonania algorytmu IGA-ADI (Isogeometric Alternating Directions Implicit Algorithm), wykazał użyteczność, stabilność a także skalowalność solwera w środowisku jedno- i wielowęzłowym w chmurze obliczeniowej, dowodząc, w moim przekonaniu, tezy rozprawy. Rozwiązanie jest cenne ze względu na stosowalność metody dla potencjalnie wielu zastosowań, które mogą być sformułowane zgodnie z założonym modelem, jednocześnie będąc możliwym do wykonania w wielu rozproszonych/zwirtualizowanych środowiskach, czy to chmur publicznych, czy prywatnych.

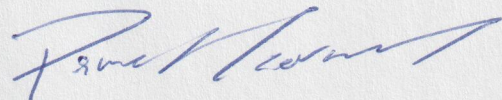
Podsumowując, moim zdaniem rozprawa spełnia wymagania postawione rozprawom doktorskim przez odpowiednią ustawę i wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Jednocześnie uwzględniając kompleksowość rozwiązania, uniwersalność ze względu na możliwość wykorzystania dla różnych aplikacji wykorzystujących zadany algorytm, możliwość uruchomienia w środowisku rozproszonym z wykazaniem dobrej wydajności i skalowalności przetwarzania, a także biorąc pod uwagę publikacje autora (w tym publikacje JCR), wnioskuje o wyróżnienie rozprawy.

Do której kategorii recenzent zalicza rozprawę?

Rozprawę doktorską Pana Grzegorza Gurgula zaliczam do kategorii:

wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny (spełniająca wymagania z nadmiarem).



dr hab. inż. Paweł Czarnul