

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Wiatr
Wydział Informatyki, Elektroniki
i Telekomunikacji AGH

Kraków, 25 czerwca 2013 r.

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Matusiaka zatytułowana „*Algorytmy obliczeń równoległych z użyciem procesorów graficznych (GPU) do przetwarzania i wizualizacji danych pomiarowych z przemysłowych systemów tomograficznych*”. Rozprawa została przygotowana pod merytorycznym nadzorem prof. dr. hab. inż. Dominika Sankowskiego, któremu Rada Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej powierzyła funkcję promotora. Funkcję promotora pomocniczego, o której mowa w p. 7 Art. 20 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595), pełnił dr inż. Andrzej Romanowski. Recenzję przygotowano na podstawie zlecenia Prodziekana Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej prof. dr. hab. inż. Andrzeja Bartosiewicza, wykonującego uchwałę Rady Wydziału z dnia 18 czerwca 2013 r.

W ocenianej rozprawie przedstawiono zagadnienia związane z algorytmami obliczeń równoległych do przyspieszenia przetwarzania danych pomiarowych pochodzących z przemysłowych systemów tomograficznych. Praca w szczególności dotyczy tomografii pojemnościowej (ECT), jednakże wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie również w innych systemach tomografii elektrycznej. Największą zaletą technik tomografii procesowej jest możliwość bezinwazyjnej wizualizacji procesów przemysłowych odbywających się w nieprzezroczystych instalacjach. Obrazowanie to, istotne z punktu

widzenia monitorowania *on line*, a uzyskane w wyniku procesu rekonstrukcji obrazów, niesie ze sobą ważne informacje diagnostyczne, jednakże wymaga dużego nakładu obliczeniowego związanego z rozwiązaniem zagadnienia odwrotnego, a w tym przede wszystkim zagadnienia prostego. W tym miejscu rysuje się pole do prac badawczych mających na celu opracowanie metod pozwalających na przeprowadzenie odpowiedniej liczby obliczeń w jednostce czasu tak, aby umożliwić wykorzystanie w warunkach przemysłowych jak najbardziej zaawansowanych metod przetwarzania danych pomiarowych. W związku z tym Doktorant podjął się rozwiązania problemu skrócenia czasu potrzebnego na obliczenia, a tematyka rozprawy trafia w pole ważnych prac światowych w tym zakresie, o czym świadczy obszerna literatura przedmiotu, której wykaz zawarto w rozprawie.

We wstępie do rozprawy Autor wprowadza czytelnika w tematykę opisanych w pracy zagadnień. W szczególności określa cel i zakres pracy oraz postawioną tezę. Celem pracy jest opracowanie algorytmów wykorzystujących procesory graficzne dla przyspieszenia obliczeń związanych z przetwarzaniem danych pomiarowych z przemysłowych systemów tomograficznych. Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy:

Algorytmy przetwarzania tomograficznych danych pomiarowych z wykorzystaniem obliczeń równoległych na procesorach graficznych pozwalają na uzyskanie znacząco większej rozdzielczości czasowo-przestrzennej rekonstruowanych obrazów.

Rozprawa została podzielona na trzy główne części zatytułowane: Stan wiedzy, Rozważania teoretyczne i algorytmy, Część eksperymentalna. Wprowadzony podział na części jest niezwykle rzadko stosowany i bardzo porządkuje zawartość rozprawy – dlatego należy wyraźnie to docenić (!). W pierwszej części, opisującej stan wiedzy, przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z przemysłowymi systemami tomograficznymi (rozdział 2), dokonano przeglądu rozwoju zagadnień związanych z obliczeniami równoległymi (rozdział 3), a także opisano wybrane przez Autora środowisko oparte na technologii CUDA, przeznaczone do obliczeń ogólnego rodzaju na procesorach graficznych (rozdział 4).

Druga część rozprawy zawiera rozważania teoretyczne. Autor przedstawił w tej części opis konstrukcji zaprojektowanych przez siebie czujników, które były wykorzystywane w trakcie przeprowadzanych eksperymentów (rozdział 5). Zamieszczono

także szczegółowy opis oraz analizę opracowanych lub zmodyfikowanych algorytmów (rozdział 6).

Trzecia część pracy opisuje wyniki prac eksperymentalnych, przeprowadzonych w ramach rozprawy. Zawiera ona opisy przygotowanych przez Doktoranta dwóch stanowisk badawczych oraz metod zbierania danych pomiarowych (rozdział 7 i 8). Dla każdego stanowiska badawczego Autor zamieścił w rozprawie i poddał szczegółowej analizie wykresy prezentujące porównanie wydajności opracowanych algorytmów dla procesorów graficznych oraz ich odpowiedników wykorzystujących wyłącznie układy GPP.

W podsumowaniu rozprawy Autor przedstawił wnioski i uwagi końcowe oraz kierunki dalszych badań (rozdział 9). Ponadto do pracy dołączono wykaz bibliografii liczący 140 pozycji, w których znajduje się 15 publikacji Autora, bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy.

Przystępując do krytycznej oceny należy zauważyć, że oceniana praca wraz z bibliografią obejmuje 130 stron - jest to objętość adekwatna do przedstawionego zakresu informacji i wyników badań. Budowa pracy jest logiczna, a podział na części i rozdziały dobry. Czytelnik jest stopniowo wprowadzany w zagadnienia poruszane w rozprawie co ułatwia zrozumienie tematyki zawartej w następujących po sobie rozdziałach. Należy zauważyć, że w opisie algorytmów Doktorant wielokrotnie posiłkuje się schematami blokowymi oraz fragmentami kodu źródłowego, co ułatwia zrozumienie zasady ich działania. Pewną trudność stanowi zrozumienie specyficznego języka związanego z opisem algorytmów dedykowanych procesorom graficznym. Część użytych sformułowań wynika najprawdopodobniej z braku szerszej polskojęzycznej literatury dotyczącej tych zagadnień, a Autorowi trudno było znaleźć proste odpowiedniki tych słów w języku ojczystym.

Na polemikę zasługują wprowadzone przez Autora już w wykazie oznaczeń i symboli, dwa pojęcia CPU i GPU, które jednak wymagają uściślenia. Skrót CPU został opisany jako „procesor centralny (ang. *Central Processor Unit*)” chociaż z dalszego tekstu wynika, że Autor ma na myśli „klasyczny mikroprocesor” do obliczeń ogólnych (ogólnego przeznaczenia) w literaturze określany jako GPP (ang. *General Purpose Processor*). Pewnym złagodzeniem zaistniałej nieścisłości jest fakt, że w literaturze światowej często dokonuje się takiego uproszczenia czy też skrótu myślowego, który niestety jest daleki od precyzji wymaganej od prac naukowych, ponieważ jednostką CPU w systemie mogą być procesory o bardzo różnych architekturach. Analogiczna sytuacja dotyczy skrótu GPU,

który określa procesory graficzne w ich pierwotnym przeznaczeniu i architekturze. Procesory graficzne będące przedmiotem zainteresowań Autora dysertacji to procesory GPU o zmodyfikowanej architekturze, znacznie rozszerzającej ich pierwotne przeznaczenia i znane jako procesory GPGPU (ang. *General Purpose Graphics Processing Unit*), pozwalające wykonywać szereg użytecznych obliczeń równoległych, dalece wykraczających poza tradycyjne zadania procesorów GPU – o czym szeroko dowiadujemy się także z ocenianej rozprawy.

Na osobną polemikę zasługuje rozdział 3. Autor rozprawy w rozdziale tym wprowadzając ciekawą narrację, niezwykle ułatwiającą zapoznanie się z tekstem, dokonuje uproszczeń, na które trudno się zgodzić. Na str. 17 napisano: „Idea obliczeń równoległych Pomysł ten ... w okresie ostatnich kilku lat zaczął dynamicznie zyskiwać na popularności” – co jest delikatnie mówiąc opinią co najmniej mało precyzyjną. Na str. 17 napisano także: „Przez niemal dwie dekady główny sposób poprawy wydajności procesorów polegał na podnoszeniu ich częstotliwości taktowania” – a mikroprocesory firmy Motorola i magistrale w standardzie VMEbus ? Na str. 18 zapisano: „Pierwsza technologia zapowiadająca zmiany .. pod koniec 2002 ... (była) technologia emulująca obecność dwóch procesorów logicznych w jednym układzie ...” i dalej o dzisiejszej dostępności nawet 6-rdzeniowych procesorów – należy zauważyć, że technologia procesorów wielordzeniowych sięga co najmniej roku 1994 (np. procesory sygnałowe TMS320C80 firmy Texas Instruments). W dalszej części tekstu o superkomputerach Autor łagodzi wcześniejsze stwierdzenia – ale niedosyt i sprzeciw wobec wcześniejszych zapisów pozostaje. Na str. 20 Autor pisze: „architektura typu Harvard, w której szyna adresowa i danych są rozdzielone” – w architekturze typu Harvard, rozdzielona jest szyna programu i danych (np. w wielu procesorach sygnałowych rozdzielone są dwie magistrale danych i jedna magistrala programu). Na str. 23 Autor podaje rok wprowadzenia GPU (połowa lat 90-tych XX wieku) chociaż wiemy, że były to wczesne lata 80-te, a przytoczony okres dotyczy raczej procesorów GPGPU, o który to istotnym rozróżnieniu już pisałem. Na str. 23 Autor przytacza skrót GPGPU, ale jest to incydentalny zapis nie mający konsekwencji w dalszym tekście rozprawy. Niestety takie nieścisłości zdarzają się w literaturze krajowej i światowej – dlatego warto je w tych okolicznościach uściślić. Kolejna wątpliwość dotyczy opisywanej na str. 25 „instrukcji jednotaktowej”. Wiemy, że w pracy mikroprocesora wyróżniamy cykle zegarowe, cykle maszynowe i cykle instrukcji. Pojęcie taktu dotyczy

cyklu zegarowego, a zatem ...? Dalej na tej samej stronie: „większość instrukcji dla procesorów CPU składa się z analizy warunków logicznych i skoków” – trudno podzielić tę opinię.

Autor nie ustrzegł się błędów językowych i edytorskich. Powtarzającym się wielokrotnie mankamentem jest nadużywanie „twardej spacji”, często także w środkowej części linii, co całkowicie rozbija formatowanie tekstu. Na str. 17 użyto sformułowania „podwaja się dwukrotnie”. Na str. 59 – błąd literowy w odwołaniu do publikacji.

Analiza tekstu rozprawy rodzi kilka pytań szczegółowych:

1. Jako jedną z podstawowych korzyści uzyskanych dzięki opracowanym algorytmom Autor wskazuje na możliwość zwiększenia rozdzielczości przestrzennej rekonstruowanych obrazów. W jakich sytuacjach i w jakim stopniu taki zysk może się przełożyć na zwiększenie dokładności przemysłowych systemów tomograficznych ?
2. Czy Autor, poza zastosowaniem procesorów graficznych GPGPU, rozważał także zastosowanie układów programowalnych FPGA do akceleracji obliczeń, które są przedmiotem rozprawy? Czy Autor jest w stanie oszacować czy zastosowanie układów programowalnych mogłoby być konkurencyjne wobec proponowanych rozwiązań?

Podsumowując, Autor zaproponował wykorzystanie procesorów graficznych do obliczeń związanych z przetwarzaniem danych pomiarowych z przemysłowych systemów tomograficznych, co stanowi innowacyjne podejście do tego zagadnienia. Przy opracowywaniu autorskich algorytmów wykorzystywał w szczególności wiedzę z zakresu metod numerycznych, a także technik tomografii procesowej, jak i wiedzę o samych procesach symulowanych. Wykorzystanie możliwości jakie dają procesory graficzne oraz pokonanie trudności implementacyjnych związanych z ich budową wymagało od Autora modyfikacji dotychczasowych i opracowania szeregu nowych algorytmów przetwarzania danych tomograficznych.

Autorskie algorytmy przetwarzania danych pomiarowych zostały zweryfikowane dla rzeczywistych danych pomiarowych, pochodzących z eksperymentów bazujących na kolumnie ze złożem fluidyzowanym oraz reaktorze trójfazowym. Eksperymenty Autor przeprowadził w laboratorium Centrum Badawczego Dresden-Rossendorf (Niemcy), gdzie przebywał kilkakrotnie na stażach naukowych. Autor wykonał pomiary z wykorzystaniem

specjalnie do tego celu samodzielnie zaprojektowanych i wykonanych stanowisk eksperymentalnych. Wyniki otrzymane przy zastosowaniu opracowanych algorytmów przeznaczonych dla procesorów graficznych porównano z wynikami uzyskanymi dla algorytmów procesorów GPP. Analizie poddano przede wszystkim czas potrzebny do wykonania obliczeń, wykazując przyspieszenie dla wszystkich zaproponowanych algorytmów wykorzystujących procesory graficzne. Jest to niewątpliwie bardzo ciekawy fragment pracy, a dalsza analiza przedstawionych porównań mogłaby być przedmiotem dalszych wartościowych prac Doktoranta. Dodatkowo, dla eksperymentów wykorzystujących model reaktora trójfazowego Autor zdecydował się użyć jednocześnie dwóch technik tomografii procesowej tj. elektrycznej tomografii procesowej oraz pojemnościowego czujnika siatkowego. Pomimo, że ten element rozprawy leży poza głównym nurtem niniejszej rozprawy, to Doktorant mógł zamieścić kilka dodatkowych słów komentarza na temat wyników uzyskanych obiema metodami.

Dokonując oceny rozprawy należy stwierdzić, że wymienione drobne uwagi krytyczne nie przysłaniają dorobku Autora zawartego w rozprawie. Wiedza na temat algorytmów przetwarzania obrazów jest znana od wielu lat, lecz nadal prowadzone są liczne prace związane z dalszym jej rozwijaniem i udoskonalaniem. Prace te dotyczą formułowania nowych i modyfikacji wcześniej znanych rozwiązań. Autor wnosi swój wkład w światowe badania nad takim modyfikowaniem algorytmów, aby mogły one być wykonywane w dużej mierze równoległe, w oparciu o procesory graficzne, co przy ograniczeniu do minimum przesyłania danych pomiędzy kartą z układami GPGPU a pamięcią RAM i jednostką centralną komputera pozwala uzyskać przyspieszenie rozwiązania problemu prostego w ECT.

Do szczególnych, najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć przede wszystkim opracowanie dla procesorów graficznych nowego algorytmu rozwiązywania problemu prostego w systemach ECT opartego na autorskiej metodzie rozkładu macierzy współczynników równania liniowego na macierze L oraz L^T . Ze względu na znaczne różnice w budowie układów GPP i GPGPU nie jest możliwe bezpośrednie uruchomienie algorytmów przeznaczonych dla układów GPP na układach GPGPU. Nie istnieją także kompilatory, które pozwoliłyby na odpowiednią modyfikację algorytmów. Jest to istotny problem, który został rozwiązany przez Autora dla omawianych w pracy zastosowań

w systemach tomografii procesowej. Głównym osiągnięciem Autora jest w tym przypadku opracowanie algorytmu dekompozycji macierzy bazującej na metodzie Cholesky'ego; przy czym opracowany przez Autora nowatorski algorytm umożliwia wykonanie znacznej części operacji matematycznych równoległe podczas gdy oryginalna metoda może być implementowana jako algorytm wyłącznie sekwencyjny (!). Ponadto dzięki wprowadzeniu identyfikacji grup operacji arytmetycznych wykonywanych na tych samych zakresach danych Autor uzyskał bardziej efektywny rozdział zadań na poszczególne procesory oraz bardziej efektywne wykorzystanie pamięci globalnej i lokalnej GPGPU. Autora zbudował dwa stanowiska badawcze zawierające innowacyjne konstrukcje czujników, poparte numerycznymi symulacjami przedstawionymi w rozprawie, za co otrzymał międzynarodowe wyróżnienia – co jest warte specjalnego podkreślenia.

Doktorant opracował autorskie algorytmy dla potrzeb wykazania słuszności postawionej na początku pracy tezy i przeprowadził eksperymenty, które ją potwierdziły. Rozwiązał w trakcie realizacji pracy szereg istotnych problemów szczegółowych, związanych z wykorzystaniem procesorów graficznych do obliczeń ogólnego przeznaczenia oraz trudności związanych z metodami przetwarzania danych pomiarowych zależnych od konkretnej techniki tomografii procesowej. Podkreślenia wymaga fakt, że pomimo tego, że weryfikacja i ewaluacja opracowanych algorytmów została przeprowadzona dla ECT w oparciu o platformę GPGPU firmy NVIDIA, to wyciągnięte wnioski można z powodzeniem rozszerzyć także na inne modalności tomograficzne, a zasadniczy wkład Autora w rozwój algorytmów przetwarzania danych tomograficznych można także odnieść do innych technologii wykorzystujących procesory graficzne.

Dorobek badawczy Doktoranta jest bardzo przydatny, ponieważ realizacja algorytmów przetwarzania obrazów pochodzących z tomografii procesowej, w tym szybkości rekonstrukcji obrazów i ich sekwencji, jest ciągle aktualnym problemem. Prace te uzasadnia także obecny postęp technologiczny. Już osiągnięte efekty winny zachęcić Autora do dalszych prac na tym polu.

Sformułowane drobne uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz postawione pytania nie podważają dorobku Autora rozprawy, który jest niezwykle imponujący, ani nie kwestionują wartości uzyskanych przez Niego wyników, stąd spełniwszy obowiązek sformułowania

zarówno uwag krytycznych i polemicznych, jak również dostrzeżenia wielu znaczących osiągnięć Autora z przyjemnością konstataję, że moja opinia o wartości recenzowanej pracy jest pozytywna. Doktorant sformułował i rozwiązał ważne zagadnienie naukowe. Doktorant dokonał tego samodzielnie, opierając się na swojej wiedzy, wykazując się przy tym inicjatywą twórczą, umiejętnością rozwiązywania problemów, zadowalającym opanowaniem warsztatu badawczego i ogólnie dobrym przygotowaniem do pracy naukowej.

Stwierdzam zatem, że opiniowana rozprawa spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującej Ustawie, dlatego **wnoszę o przyjęcie recenzowanej pracy jako rozprawy doktorskiej oraz wnioskuje o dopuszczenie Autora pracy, mgr. inż. Bartosza Matusiaka do jej publicznej obrony.**

Biorąc pod uwagę wysoki poziom rozprawy i przeprowadzonych prac eksperymentalnych wnoszę o wyróżnienie przedłożonej rozprawy.

K. Wiak