

Dr hab inż. Marek Tudruj
ul. Raławicka 8
02-601 Warszawa

Warszawa, 14 listopada 2006

Recenzja pracy doktorskiej Krzysztofa Lichy, pt: "Morfologia matematyczna obrazu z wykorzystaniem koncepcji tablicy systolicznej"

Przedstawiona mi do recenzji praca doktorska zawiera 124 strony i składa się z wstępu, 6 zasadniczych rozdziałów, podsumowania i bibliografii.

We wstępie (rozdział 1) przedstawiono genezę tematu niniejszej rozprawy oraz przedstawiono organizację tekstu rozprawy.

W rozdziale drugim przedstawiono cel i tezy pracy. Celem pracy jest „realizacja systoliczna operacji morfologicznych pozwalająca na ekstrakcje poszukiwanych cech obrazu”. Tezy pracy są następujące: „możliwe jest opracowanie algorytmów czasowo-przestrzennych ściśle dopasowanych do architektur tablic systolicznych, które pozwalają na przeprowadzenie operacji morfologicznych na obrazie” oraz „komputer systoliczny Systola 1024 może służyć do weryfikacji opracowanych algorytmów czasowo-przestrzennych”.

W rozdziale trzecim przedstawiono informacje na temat prac badawczych w dziedzinie systemów systolicznych prowadzonych w Polsce i za granicą. Autor stwierdza tutaj, że nie znalazł prac dotyczących zastosowania architektur systolicznych do realizacji operacji morfologii matematycznej w Polsce oraz że nieliczne prace zagraniczne nie dotyczą problemu rozpracowania cech architektury dla realizacji algorytmów morfologicznych.

Rozdział czwarty rozprawy zawiera wprowadzenie do tematyki rozprawy. Przedstawiono tu założenia i definicje różnego typu operacji morfologii matematycznej obrazów: erozji, dylacji, otwarcia, zamknięcia, operacji „hit-and-miss”, operacji „white top hat” oraz „black top hat”, ekstrakcji granicy oraz szkieletyzacji obrazu. W rozdziale tym wprowadzono również podstawowe definicje pojęć używanych w dziedzinie tablic systolicznych oraz przedyskutowano własności i problemy podstawowych struktur systemów tablic systolicznych.

Rozdział piąty omawia architekturę komputera systolicznego Systola 1024 oraz metody programowania tego komputera, włączając fragmentaryczny opis wysokopoziomowego języka programowania LAISA (od angielskiej nazwy - Language for Instruction of Systolic Arrays).

Rozdział szósty pracy omawia własne propozycje doktoranta dotyczące pożądanych cech architektury komputera systolicznego dla rozwiązywania problemów morfologii matematycznej. Proponowane ulepszenia architektoniczne są konfrontowane z architekturą komercyjnego komputera systolicznego Systola 1024. Nowe elementy architektoniczne proponowane w pracy obejmują: możliwości wprowadzania danych do tablicy systolicznej z czterech kierunków – w Systoli 1024 z dwu kierunków, wprowadzenie nowych instrukcji wewnętrznych wyznaczających największą i najmniejszą wartość danych przechowywanych w parze rejestrów, możliwość reorganizacji formatu tablicy dla dopasowania do rodzaju przetwarzanej struktury danych (metodą łączenia mniejszych podtablic systolicznych), zwiększenie rozmiaru

rejestrów do 32 bitów i powiększenie liczby rejestrów specjalnych do 32, wprowadzenie rejestrów komunikacyjnych o dwukrotnie dłuższym czasie przesyłania do sąsiedniego procesora pozwalającym w pewnych przypadkach na łatwiejszą bezpośrednią synchronizację działań, wprowadzenie w procesorach dwu 32-bitowych rejestrów dla komunikacji z otoczeniem tablicy systolicznej, wprowadzenie połączeń na skos między procesorami w tablicy, wprowadzenie trójwymiarowej struktury tablicy, zrównoleglenie operacji wprowadzania danych i przetwarzania. Dalsza część tego rozdziału zawiera dyskusję metod wprowadzania i wyprowadzania danych w tablicach systolicznych, jako najbardziej czasochłonnych operacji składowych dla rozpatrywanych operacji morfologicznych. Dla różnych metod wprowadzania (wyprowadzania) danych przedyskutowano ich znaczenie dla całkowitego czasu realizacji tych operacji systolicznych.

Rozdział siódmy rozprawy zawiera zasadnicze wyniki rozprawy dotyczące metod realizacji operacji morfologii matematycznej obrazów w rozważanych wersjach systemów systolicznych. Na wstępie opisano ogólny algorytm wykonywania operacji morfologicznej na obrazie. Następnie przedstawiono jak te ogólne algorytmy są realizowane w procesorach w kolejnych taktach zegara synchronizującego przesłania między procesorami. Omówiono tutaj przede wszystkim wykorzystanie rejestrów procesorów i operacje składowe wykonywane na rejestrach.

W kolejnych częściach tego rozdziału przedstawione są trzy metody realizacji operacji morfologicznych erozja i dylacja, oparte na różnych scenariuszach prowadzenia obliczeń w tablicy systolicznej. Wszystkie trzy metody zakładają wstępne wprowadzenie całego obrazu do tablicy. Pierwsza metoda (metoda I) zakłada, że element strukturalny o kształcie krzyża jest przesuwany wzdłuż wierszy tablicy i operacje morfologiczne są wykonywane przez procesory aktualnie pokrywane przez fragmenty elementu strukturalnego. Druga metoda (metoda II) zakłada, że każdy procesor posiada w swoich rejestrach wartości pikseli obrazu ze wszystkich sąsiednich procesorów a operacje morfologiczne są wykonywane wewnątrz procesorów dla kolejnych pikseli wyróżnionych wzdłuż wierszy obrazu. Trzecia metoda (metoda III) zakłada, że element strukturalny o kształcie kwadratu jest przesuwany wzdłuż wierszy tablicy i operacje morfologiczne są wykonywane przez procesory aktualnie pokrywane przez fragmenty elementu strukturalnego, bez kopiowania wartości z procesorów sąsiednich do rejestrów procesora określonego przez punkt wyróżniony. Dla podanych metod najpierw są opisane ogólnie wykonywane operacje, wykorzystanie rejestrów w procesorach i przesłania danych między procesorami. Następnie opisana jest budowa programów napisanych w języku programowania LAISA, specyficznego dla komputera Systola 1024. W przypadku metody I program operacji morfologicznej jest usprawniony przez jednoczesne wprowadzenie maski do wielu wierszy i wykonywanie operacji systolicznych równoległe w wierszach tablicy odległych o 3, z odpowiednimi przesunięciami w wierszach dla wykonania analizy całości obrazu w tablicy. Oprócz realizacji operacji na obrazach binarnych przedyskutowano również wykonanie operacji morfologicznych na obrazach opisanych w skali szarości. W przypadku metody II przed wykonaniem operacji porównania pikseli maski i obrazu w obrębie jednego procesora należy do procesora sprowadzić wartości pikseli z sąsiednich procesorów co wykonuje się za pomocą szeregu operacji wymiany danych między procesorami w całej tablicy oraz przesunięć danych między wierszami w kierunkach północ-południe. Wprowadza to dodatkowe takty wydłużające czas wykonania docelowych

operacji. Metoda III zakłada wykorzystanie kwadratowego elementu strukturalnego co powoduje konieczność porównywania pikseli położonych na skos w prostokątnej tablicy. Dla porównań wykorzystuje się tutaj rejestry C procesorów, w których umieszcza się wartości pikseli obrazu. Zamiast przepisywania zawartości rejestrów do procesora zawierającego punkt wyróżniony stosuje się tutaj porównanie wartości z sąsiednich procesorów, korzystając z możliwości dostępu do rejestrów C sąsiednich procesorów.

W kolejnym podrozdziale rozdziału 7 przedstawiono porównanie ogólnych cech trzech przedstawionych metod. Doktorant stwierdza, że metoda I jest prostsza ze względu na prostszą formę elementu strukturalnego a co za tym idzie jest szybsza niż metody II i III. Ponadto stwierdza, że jest ona przyspieszona równoległym wykonywaniem operacji na wielu wierszach tablicy. W podsumowaniu własności metody II autor stwierdza, że dzięki kopiowaniu wszystkich wartości pikseli obrazu do uniwersalnych rejestrów „wyróżnionych” procesorów z ich sąsiadów wynik operacji porównania może być umieszczony w rejestrze komunikacyjnym C procesora co upraszcza wyprowadzanie obrazu wynikowego. Następnie doktorant stwierdza, że metoda II jest poprawna ale jedynie bezpośrednio równoległa i nie wykorzystuje możliwości potokowego wykonywania operacji, dostępnych w tablicach systolicznych, w tym w komputerze Systola 1024. W podsumowaniu metody III, wykorzystującej kwadratowy element strukturalny, doktorant stwierdza, że została ona „opracowana pod kątem ilości (czytaj liczby –dopisek recenzenta) niezbędnych pulsacji”, co należy rozumieć, że zredukowano w niej liczbę pulsacji. Wyjaśnia on, że zastosowana w niej koncepcja nie wykorzystuje kopiowania do procesora, wyróżnionego przez element strukturalny, wartości elementów obrazu poprzez dwutaktowe przesłania wartości pikseli obrazu pokrywanych przez narożne elementy maski, stosowana w metodzie I. Zamiast tego „porównywane jest sąsiedztwo (w kierunku północnym i wschodnim) procesorów znajdujących się na wschód i zachód”. Termin „sąsiedztwo” nie został zdefiniowany, ale z tekstu i pokazanego programu wynika, że chodzi tu o porównanie wartości pikseli obrazu w sąsiednich procesorach, zrealizowane z wykorzystaniem przesłań danych wymagających jednego taktu (pulsacji). Podane przez doktoranta w tej części rozprawy wnioski dotyczące wydajności opracowanych metod nie są niestety poparte dokładniejszymi oszacowaniami czasów wykonania ani danymi porównawczymi wynikającymi z eksperymentów. W zakończeniu tego podrozdziału doktorant stwierdza, że wraz z pakietem języka LAISA dostarczano programy demonstracyjne ilustrujące programowanie w tym języku poprzez proste operacje morfologii matematycznej – erozja i dylacja oraz ich złożenia, wykorzystujące koncepcję podobną do metody II, stwierdzając, że metoda ta nie jest optymalna pod względem czasu działania.

W dalszej części rozdziału 7 omówiono zaproponowane metody realizacji bardziej złożonych operacji morfologii matematycznej obrazu, wykorzystujących jako operacje składowe erozję i dylację. Są to transformacja „hit-and-miss”, operacja otwarcia i zamknięcia, transformacja „white top hat” i „black top hat”, ekstrakcja granicy. We wszystkich przypadkach doktorant przedstawia zasady realizacji tych operacji w oparciu o opracowane przez niego algorytmy erozji i dylacji, wnikając w sposób wykorzystania zasobów w procesorze i tablicy systolicznej. W wielu przypadkach, a w szczególności dla transformacji „hit-and-miss”, doktorant wyjaśnia w jaki sposób można usprawnić algorytmy wykonawcze tych operacji w tablicach systolicznych, pod kątem redukcji czasu ich wykonania.

W podrozdziale 7.3 przedstawiono przykład zastosowania opracowanych algorytmów morfologii matematycznej do ekstrakcji defektów na polakierowanej powierzchni samochodu. Po wielokrotnym zastosowaniu operacji erozji i dylacji uwidoczniły się niezauważalne w zwykłym obrazie uszkodzenia lakieru. Przykład potwierdza skuteczność działania systolicznych wersji algorytmów.

W następnym podrozdziale porównano wydajność obliczeniową komputera Systola 1024 z procesorem Pentium 133, który stanowił w okresie wypuszczenia Systoli 1024 na rynek konkurencyjny procesor szeregowy. Wykazano przynajmniej o rząd większą efektywność czasową dla wybranych zastosowań drobnoziarnistych, niestety nie obliczeń morfologii matematycznej.

Ostatni podrozdział rozdziału 7 poświęcony jest analizie wpływu rozmiaru obrazu analizowanego metodami systolicznej morfologii matematycznej na współczynnik zdefiniowany jako stosunek liczby taktów algorytmu sekwencyjnego do liczby taktów algorytmu systolicznego. Stanowi to ekwiwalent przyspieszenia wykonania w tablicy systolicznej, przy założeniu takiego samego czasu trwania obliczeń w jednym takcie w obu realizacjach algorytmów. Wykazano, że wartość takiego współczynnika rośnie proporcjonalnie do połowy rozmiaru przetwarzanego obrazu.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie rozprawy, w którym autor wymienia najważniejsze uzyskane wyniki. Są to opracowanie oryginalnych realizacji algorytmów morfologii matematycznej dla wykonania w tablicach systolicznych, propozycje usprawnień architektonicznych komputera systolicznego Systola 1024 i tablic systolicznych w ogólności dla realizacji operacji morfologii matematycznej, analiza cech wariantowych wersji opracowanych algorytmów, analiza własności systolicznych algorytmów morfologii matematycznej w zakresie wpływu wielkości obrazu na redukcję liczby cykli algorytmu systolicznego w porównaniu z algorytmami szeregowymi.

Na wstępie oceny recenzowanej rozprawy stwierdzam, że tematyka niniejszej rozprawy jest aktualna. Stosowane współcześnie metody realizacji specjalizowanych architektur dla rozwiązywania drobnoziarnistych problemów obliczeniowych wymagają dalszego rozwoju, prowadzącego do wygodnych, wydajnych czasowo i efektywnych cenowo rozwiązań obliczeniowych. Dotyczy to w dużym stopniu algorytmów przetwarzania obrazów metodami morfologii matematycznej. Stosowanie systemów systolicznych jest tutaj właściwym środkiem umożliwiającym dopasowanie struktur systemów wykonawczych do rodzaju aplikacji.

Problem naukowy rozprawy i cel pracy zostały sformułowane niedwuznacznie. Teza pierwsza pracy jest sformułowana w sposób całkowicie jasny, natomiast w tezie drugiej nie jest podane jaki typ weryfikacji został założony. Obydwie tezy nie zakładają oszacowań ani miar ilościowych, co by znacznie podniosło rangę tej pracy, zwłaszcza, że przedstawione w pracy wyniki podają nowe rozwiązania programowe i architektoniczne, a pewne wyniki w zakresie miar ilościowych (podrozdział 7.5) zostały przedstawione. Doktorant rozwiązał postawiony problem używając poprawnych metod. Uzyskane w pracy wyniki są oryginalne. Działanie opracowanych algorytmów zostało zweryfikowane poprzez wykonanie na komputerze Systola 1024. Za najbardziej interesujące uważam nowe propozycje architektoniczne dla tablic systolicznych oraz rozważania na temat optymalizacji realizacji operacji morfologii matematycznej. Uzyskane wyniki powinny znaleźć zastosowanie w technice systemów systolicznych i dalszych badaniach, które doktorant może prowadzić jako kontynuację niniejszej pracy.

Niniejsza rozprawa doktorska świadczy o dobrej wiedzy doktoranta w zakresie metodologii budowy i programowania środowisk systemów systolicznych. Cytowana literatura uwzględnia moim zdaniem podstawowe problemy cząstkowe dziedziny pracy, natomiast tekst rozprawy w zakresie przeglądu literatury nie jest moim zdaniem dostatecznie wyczerpujący. Podkreślone przez doktoranta zagraniczne pozycje literatury jako zbliżone do tematyki rozprawy powinny być w rozprawie przynajmniej pobieżnie omówione a nie tylko wymienione. Artykuły dotyczące problemu rozwiązanego w pracy były prezentowane przez doktoranta na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych, co stanowi potwierdzenie wartości uzyskanych wyników. Wadą rozprawy jest jednak nieporadne miejscami przedstawienie uzyskanych wyników (patrz uwagi szczegółowe), obniżające ich właściwą pozytywną ocenę.

Uwagi szczegółowe

Zastrzeżenia budzi w pewnych sytuacjach słownictwo i notacje używane przez doktoranta. W określeniu elementu strukturalnego, użyty jest czasami nieuzasadniony w pracy termin „jednostkowy” (Rys. 4.1). Punkt wyróżniony elementu strukturalnego jest niejednorodnie nazywany - czasami jako „wyróżniony”, czasami jako „centralny” a często wręcz po angielsku jako „origin”, co nie powinno mieć miejsca. Zastrzeżenia budzi wielokrotne użycie słowa „ilość” w odniesieniu do rzeczy policzalnych, tak więc należy powiedzieć liczba pulsacji, liczba procent itp. a nie ich ilość. W definicji współczynnika przyspieszenia obliczeń w tablicy systolicznej (str. 33, wyjaśnienia do formuły 4.32) bardziej jednoznaczne byłoby użycie zamiast słowa „przetwarzania” - wyrażenia „wykonania programu”, gdyż termin przetwarzanie jest wieloznaczny. Użyta na stronie 57 notacja rejestrów komunikacyjnych w rodzaju C1...16, C1..16 jest nie tylko niejednorodna, ale też dwuznacznie użyta w tekście pracy, gdyż nie wiadomo czy są to bity 1...16 rejestru C komputera Systola 1024 czy też nowe rejestry proponowane przez doktoranta w rozszerzeniu architektury tego komputera, które, zgodnie z wcześniej używaną w pracy notacją (R0..R31, str. 40 czy R0...R31, str.51) powinny być opisane jako C1...C16, lub bardziej moim zdaniem poprawnie C1,...,C16. Na stronie 75 uwaga na temat znaczenia rejestrów E i OBR powinna być wprowadzona przed a nie po użyciu ich symboli. Na tej samej stronie doktorant używa pojęcia „modułowość tablicy systolicznej”, które wymaga wyjaśnienia. Występują rozbieżności między metodami określania współrzędnych punktów obrazu i elementów strukturalnych w podrozdziałach 4.1.1 a 5.5 (przypisanie współrzędnej 0 i 1 pierwszym wierszom i kolumnom). Występują czasami niefortunne sformułowania jak np. na str. 80, gdzie suma logiczna maski i obrazu ma być zgodnie z przypisem 1 rozumiana jako wynik operacji iloczynu logicznego. Nadmiarowe w stosunku do tekstu są moim zdaniem rysunki od 7.11 do 7.14, ilustrujące narożne, brzegowe i wewnętrzne procesory tablicy systolicznej, zwłaszcza, że nazwy „procesor brzegowy czy wewnętrzny” chyba nie zostały użyte w rozważaniach. Cytowany na str. 118 procesor Texas TMS320C80 –nazywany „multimedia video processor” nie jest procesorem dedykowanym do obliczeń morfologii matematycznej a jedynie, przy wykorzystaniu tego procesora – który w istocie jest uniwersalnym pięcioprocessorowym systemem scalonym do przetwarzania sygnałów, można zrealizować system zorientowany na obliczenia morfologii matematycznej.

W paru punktach pracy wystąpiły nadmiarowe lub błędne odwołania do rysunków. Na str. 79 nadmiarowo (dwukrotnie) jest zamieszczone odwołanie do

kształtu elementu strukturalnego, rys.4.2, a nie jest powiedziane jakie wartości mają punkty tego elementu. Błędne jest odwołanie na str. 110 do rys. 4.3.

Występuje cała seria błędów drukarskich w oznaczeniach rejestrów w programach przedstawionych na str. 97, ..., 100 i brakuje 2 wierszy programów na str. 94 (szczegóły wyjaśniłem doktorantowi). Błędy te mogą i powinny zostać ręcznie skorygowane w dostarczonych tekstach rozprawy.

Praca jest napisana w olbrzymiej większości poprawnym językiem, jednakże napotkałem też na pewne nieliczne błędy stylistyczne, jak np. „...nie można wykorzystać ...rejestr komunikacyjny..”, na str. 102 - drugi wiersz od dołu, co powinno być zmienione na „...nie można wykorzystać ...rejestru komunikacyjnego” czy też na str.102 - ósmy wiersz od dołu „W tym przypadku jest to rejestru komunikacyjnego...” , co powinno raczej brzmieć „W tym przypadku dotyczy to rejestru komunikacyjnego...”. Innym dość częstym błędem stylistycznym jest oddzielanie kropką zdań, które powinny być połączone przecinkiem, jak np. na str. 118 – 7-9 wiersz od góry.

Bardziej szczegółowe uwagi merytoryczne dotyczące pracy polegają przede wszystkim na tym, że zastosowane w metodzie I zwielokrotnienie zapisu elementu strukturalnego w wielu wierszach tablicy systolicznej a co za tym idzie dalsze zrównoleglenie pracy tablicy może być z powodzeniem zastosowane również w metodzie III. Przedstawione na str. 96 i 97 programy tej metody wykonują się dla wszystkich elementów tablicy a więc także dla procesorów pokrywanych przez narożne punkty kwadratowego elementu strukturalnego (maski). Dlatego nie jest potrzebne osobne prezentowanie identycznych programów dla obliczeń procesorów związanych z narożnymi punktami maski. Zdefiniowany na str. 114 współczynnik (formuła 7.1) nie powinien być traktowany jako uniwersalny współczynnik przyspieszenia systolicznych obliczeń równoległych (patrz definicja 4.32 na str. 33), gdyż jest to jedynie stosunek liczb taktów algorytmu sekwencyjnego i systolicznego, który odpowiada współczynnikowi przyspieszenia obliczeń tylko wtedy, gdy czasy taktu obliczeń szeregowych i systolicznych są identyczne.

Podane uwagi szczegółowe nie umniejszają samej wartości merytorycznej pracy. Pomimo wymienionych usterek rozprawy, stwierdzam, że doktorant uzyskał wystarczające wyniki merytoryczne dla spełnienia przez niniejszą rozprawę wymagań ustawy o stopniach i tytule naukowym i wnoszę o dopuszczenie niniejszej rozprawy doktorskiej i doktoranta do dalszych faz przewodu doktorskiego.

