

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Wiatr
Katedra Elektroniki AGH

Kraków, 24.08.2006 r.

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest **rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Lichego** zatytułowana „*Morfologia matematyczna obrazu z wykorzystaniem koncepcji tablicy systolicznej*”. Rozprawa została przygotowana pod merytorycznym nadzorem prof. dr. hab. Ewy Lipowskiej-Nadolskiej, której Polsko-Japońska Wyższa Szkoła Technik Komputerowych powierzyła funkcję promotora. Recenzję przygotowano na podstawie zlecenia Rektora Polsko-Japońskiej Wyższej Szkoły Technik Komputerowych prof. Jerzego Pawła Nowackiego, zawartego w piśmie z dnia 24 maja 2006 r.

W ocenianej rozprawie przedstawiono zagadnienia związane z przetwarzaniem obrazów w oparciu o algorytmy morfologii matematycznej oraz realizacją tych obliczeń w specjalizowanym systemie wieloprocesorowym, zbudowanym jako tablica systoliczna. Celem pracy jest taka adaptacja algorytmów morfologicznych, aby ich implementacja w wieloprocesorowym systemie systolicznym była maksymalnie efektywna. Końcowym efektem pracy winno być przyspieszenie obliczeń przetwarzania obrazów w systemie wieloprocesorowym oraz skuteczna ekstrakcja cech obiektów na obrazie. Tak zatem tematyka pracy trafia w pole światowych prac nad budową dedykowanych systemów specjalizowanych, znanych pod nazwą CCM (ang. *Custom Computing Machines*).

W krótkim wstępie do rozprawy Autor wprowadza w tematykę opisanych w pracy zagadnień. W szczególności określa zakres swych zainteresowań, dotyczących zastosowań architektur systemów wieloprocesorowych zbudowanych jako ortogonalne tablice

systoliczne, do realizacji zadań przetwarzania obrazów, ze szczególnym uwzględnieniem implementacji algorytmów morfologii matematycznej.

W kolejnym bardzo krótkim rozdziale Doktorant przedstawia cel i tezy pracy. Celem pracy jest: *realizacja systoliczna operacji morfologicznych, pozwalająca na ekstrakcję poszukiwanych cech obrazu*. Jednocześnie Doktorant sformułował następujące tezy rozprawy:

- *możliwe jest opracowanie algorytmów czasowo-przestrzennych ściśle dopasowanych do architektur tablic systolicznych, które pozwalają na przeprowadzenie operacji morfologicznych na obrazie,*
- *komputer systoliczny Systola 1024 może służyć do weryfikacji opracowanych algorytmów czasowo-przestrzennych.*

Recenzowana rozprawa została podzielona na 9 rozdziałów, w tym wstęp, cel i tezy pracy, podsumowanie i wykaz literatury. Pierwszy rozdział stanowi opisany powyżej wstęp, a w drugim określono cel i tezy pracy. W kolejnym trzecim rozdziale bardzo krótko przedstawiono ośrodki prowadzące podobne prace badawcze, ze szczególnym uwzględnieniem prac polskich oraz zasygnalizowaniem prac placówek zagranicznych.

W rozdziale czwartym wprowadzono w tematykę rozprawy prezentując obszernie (29 stron) zagadnienia morfologii matematycznej. W szczególności omówiono element strukturalny, operacje erozji, dylacji, otwarcia i zamknięcia, transformację Hit-and-Miss oraz Top Hat (White i Black), ekstrakcję granicy i szkieletyzację obrazu. Ponadto w rozdziale tym zaprezentowano tablicę systoliczną w sensie strukturalnym, ukazując jej podstawowe cechy oraz podając przykładowe architektury (liniowa, prostokątna, trójkątna, heksagonalna, pseudoprzestrzenne). Z analizy w rozprawie zdecydowanie wyłączone tablice semisystoliczne, w których nie wszystkie procesory są identyczne, a zatem nie spełniają definicji tablicy systolicznej.

W rozdziale piątym opisano komputer systoliczny Systola 1024, zbudowany jako karta rozszerzeń do komputera klasy PC i przyłączany do niego za pośrednictwem magistrali PCI. Komputer Systola 1024 jest zbudowany z 1024 procesorów rozmieszczonych ortogonalnie oraz 64 procesorów komunikacyjnych i 2 banków pamięci RAM po 512 kB każdy. Komputer Systola 1024 został zbudowany w 1998 roku i jego zastosowanie w pracach badawczych przedstawianych w niniejszej rozprawie ma na celu głównie jakościową weryfikację badanej koncepcji. Z tych względów wszelkie parametry czasowe

realizowanych na Systoli 1024 obliczeń Doktorant słusznie odnosi do parametrów obliczeń realizowanych na podobnych technologicznie komputerach. W rozdziale tym Autor opisuje także programowanie tablicy systolicznej, ze szczególnym uwzględnieniem kolejności wykonywania rozkazów przez poszczególne procesory oraz związanego z tym zagadnieniem formatu rozkazów. Przy tej okazji Autor ukazuje problemy programowania czasowo-przestrzennego, jako zasadniczo innego sposobu projektowania oprogramowania niż ma to miejsce w metodach sekwencyjnych czy też obiektowych. Rozgłaszanie w strukturze wieloprocessorowej tablicy systolicznej rozkazów i danych ma zasadniczy wpływ nie tylko na sposób programowania, ale także na sposób pracy tego systemu i jego parametry czasowe. W końcowej części tego rozdziału krótko zaprezentowano język programowania LAISA, opracowany specjalnie dla komputera Systola 1024.

Jednym z najciekawszych fragmentów pracy jest rozdział szósty prezentujący wyniki rozważań Doktoranta dotyczących własnej koncepcji tablicy systolicznej przeznaczonej do przetwarzania morfologicznego. Ta własna architektura uwzględnia przede wszystkim podatność na w miarę efektywne wprowadzanie do tablicy danych obrazowych. Ponadto Autor analizuje efektywność pracy tablicy systolicznej w odniesieniu do stosunku rozmiaru tablicy do rozmiaru obrazu. Przytoczone zostały wyliczenia efektywności wprowadzania i wyprowadzania obrazu z jednego oraz z dwóch kierunków, w zależności od rozmiaru obrazu przy ustalonym rozmiarze tablicy. Doktorant proponuje ponadto modyfikacje procesorów poprzez dodanie dodatkowych rejestrów, ułatwiających komunikację z procesorami oraz budowę trójwymiarowej tablicy systolicznej i konstruowaniu szybkich filtrów do przetwarzania obrazów. Doktorant wprowadza także dodatkowe połączenia ukośne pomiędzy procesorami i inne modyfikacje.

W rozdziale siódmym Doktorant przystępuje do przedstawienia swych zasadniczych zmagania z implementacją obliczeń morfologicznych w komputerze Systola 1024. W tym obszernym rozdziale (46 stron) Autor omawia trzy metody implementacji operacji morfologicznych, rozważania swe ilustrując przykładowymi fragmentami kodów programów. Omówienie tych metod jest poprzedzone szczegółową analizą algorytmów systolicznych dla operacji morfologicznych na obrazie. Autor precyzyjnie przytacza aktywności poszczególnych procesorów w kolejnych pulsacjach zegara taktującego pracą systemu. Następnie opisano realizację transformacji Hit-and-Miss, operacje otwarcia i zamknięcia, transformację White Top Hat i Black Top Hat oraz ekstrakcję granicy.

W końcowej części rozdziału siódmego zaprezentowano wyniki obliczeń na rzeczywistych obrazach. Do testowania zaimplementowanych algorytmów morfologicznych wykorzystano zdjęcia polakierowanej powierzchni samochodu. W wyniku zastosowanych, opracowanych przez Doktoranta, sekwencji operacji morfologicznych na badanym obrazie – dokonano skutecznej ekstrakcji wcześniej niewidocznych (lub bardzo słabo widocznych) obiektów, będących defektami lakierowania pojazdu. Ponadto w tej części rozdziału porównano parametry czasowe komputera Systola 1024 i komputera klasy PC z procesorem Pentium 133 MHz, na przykładzie czasu realizacji kilku algorytmów szyfrujących (DES, 3-DES, IDEA i RSA). Podjęto także wyliczenie współczynnika przyspieszenia obliczeń (speed-up) w zależności od wymiarów przetwarzanego obrazu.

Rozprawę zamyka podsumowanie i wykaz literatury, zawierający 78 pozycji, dotyczących omawianych w pracy zagadnień, w tym 6 pozycji literaturowych z udziałem Autora.

Przystępując do oceny rozprawy należy zwrócić uwagę na trafny wybór tematyki badawczej, dotyczącej poszukiwań akceleracji obliczeń poprzez stosowanie systemów wieloprocessorowych oraz takich architektur tych systemów, które pozwalają na maksymalne wykorzystanie mocy obliczeniowej zastosowanych procesorów. Należy zwrócić uwagę, że zastosowany w rozprawie system Systola 1024 jest sprzętem obecnie mocno przestarzałym, jednak nie obniża to w żaden sposób wartości przedstawionych w niej rozważań, które mają zdecydowanie walor jakościowy a nie ilościowy. Zastosowanie nowocześniejszego i bardziej wydajnego systemu spowoduje poprawę parametrów szybkości obliczeń, ale wszystkie pozostałe zaprezentowane w rozprawie kwestie pozostaną nadal aktualne.

Przedstawiony tekst rozprawy jest zwarty, bowiem praca nie jest przesadnie obszerna i zawiera 124 strony. Tekst jest napisany stosunkowo poprawnym językiem. Organizacja tekstu pracy rodzi jednak pewne uwagi. Rozdział 2 jest bardzo krótki (2/3 strony) i bez jakichkolwiek strat mógłby zawrzeć się w rozdziale 1. Rozdział 3 jest bardzo ważny dla analizy porównawczej stosowanych przez Doktoranta metod z dotychczasowym stanem techniki w tym zakresie. Z tego powodu należy uznać, że jest on przesadnie krótki (1 i 2/3 strony, w tym rysunek) i napisany zbyt lapidarnie. Tytuł rozdziału 4 jest nie trafiony i mało komunikatywny.

Autor nie ustrzegł się pewnych błędów językowych, literowych i edytorskich. Uwagę zwraca używane często sformułowanie „operacja erozja” zamiast „operacja erozji” oraz „operacji zamknięcie” zamiast „operacji zamknięcia”. Jest to dziwactwo językowe, tym bardziej, że w innych miejscach jest np. „operacje zamknięcia i otwarcia”. Na str. 51 jest błędnie ponumerowany rysunek. Identyczne podpisy pod rys. 7.12 i 7.13 są niekomunikatywne. Na str. 110 błędnie przywołano rys. 4.3. Niezrozumiałe jest użycie sformułowania „w tak zwanej postaci negatywu” (str. 112).

W pracy zdarzają się nieliczne nieprecyzyjne określenia. Punkt „origin” raz jest określany jako „wyróżniony”, a w innym miejscu jako „centralny”. Przyjęta notacja opisu tzw. maski elementu strukturalnego nasuwa duże trudności w analizie tekstu. Dotyczy to w szczególności rys. 4.4 (brak punktu origin oznaczanego jako X). Sprzeciw budzi także użycie w odniesieniu do tego rysunku komentarza, że są to najczęściej używane elementy strukturalne, z powodu wpisanych w poszczególnych komórkach wartości „1”. W rozdziale tym brak wyraźnego określenia jakie wartości przyjmują poszczególne składowe elementy strukturalnego. Dopiero na str. 32 pojawia się określenie „* - element nieużywany” – bez bliższego skomentowania tego określenia. Na rys. 4.37 ponownie brak zaznaczonego punktu X. Podobnie na rys. 7.21 i 7.22 brak zaznaczonego punktu X, pomimo przywołania w podpisie rysunków.

Na str. 17 Autor podał definicję operacji erozji na obrazie o różnych poziomach szarości. Następne prezentowane rozważania dotyczą obrazów binarnych, ale brak jest komentarza dla tej sytuacji. Wątpliwości budzi poprawność zestawu rysunków 4.13-4.15. Współczynnik przyspieszenia na str. 33 jest oznaczony jako „k”, a na str. 114 jako „S” (brak w wykazie symboli). Na str. 44 popełniono błąd polegający na niezgodności opisu z rysunkiem 5.4. Wątpliwość budzi poprawność rys. 5.10 i 5.11 (w kolejnych pulsacjach powtarzane są operacje wykonane już poprzednio) oraz rys. 5.15 (północno-wschodnia część tablicy systoliczej). Nieściśle jest także sformułowanie, że Procesor TMS320C80 jest procesorem dedykowanym (str. 118).

Istotnym brakiem rozprawy jest brak parametrów czasowych zrealizowanych obliczeń. Niezrozumiałe jest odniesienie parametrów czasowych systemu Systola 1024 do parametrów czasowych procesora Pentium 133 MHz na przykładzie operacji szyfrowania (tab. 7.1 na str. 113) zamiast zrealizowanych operacji przetwarzania obrazów. Ponadto

rozdział 6 stoi jakby z boku głównego nurtu rozważań. Wielka szkoda, że nie udało się w jakiejś formie wykorzystać bardzo interesujących wniosków zawartych w tym rozdziale. Pewien niedosyt budzi także testowanie algorytmu tylko na jednym przykładzie polakierowanej powierzchni samochodu. Szkoda, że do pracy nie dołączono dysku CD ze zdjęciami testowymi w postaci elektronicznej (postać drukowana nie jest doskonała).

Analiza tekstu rozprawy rodzi także kilka pytań szczegółowych:

1. Czy sformułowanie, że architekturę tablicy systolicznej można traktować jako układ ASIC (str. 5) jest precyzyjne?
2. Czy zawarte w rozprawie stwierdzenie, że z powodu połączenia procesorów w tablicy systolicznej tylko z najbliższymi sąsiadami operacja przesuwania maski (elementu strukturalnego) po obrazie, sprowadza się do jednoczesnego nałożenia jej na wszystkie piksele i wówczas wykonywanie operacji morfologicznej odbywa się jednocześnie na całym obrazie (str. 5) jest prawdziwe dla każdego rozmiarów obrazu i tablicy systolicznej?
3. Czy zastosowany system Systola 1024 jest systemem unikatowym (str. 6), czy też produkowanym seryjnie (str. 113, 123)?
4. Dlaczego w rozdziale 7 użyto określenia „Systola 1024 jest doskonałym modelem ortogonalnej tablicy systolicznej i doskonale sprawdza się przy testowaniu oraz opracowywaniu algorytmów morfologii matematycznej” (str. 114) skoro cały rozdział 6 opracowano z powodu dokładnie przeciwnego stanu rzeczy?

Podsumowując należy stwierdzić, że wymienione uwagi krytyczne nie przysłaniają dorobku Doktoranta 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 badania nad takim modyfikowaniem algorytmów, aby były one dostosowane do implementacji w konkretnych wymaganiach użytkownika, w tym przypadku do ekstrakcji poszukiwanych cech obrazu. Istotny walor ocenianej pracy polega na tym, że przedstawione w rozprawie rozważania dotyczące algorytmów morfologicznych do przetwarzania obrazów są ściśle sprzężone z rozważaniami nad architekturą sprzętu, w którym te algorytmy mają być realizowane.

Sformułowane w wyniku takich jednoczesnych rozważań dotyczących algorytmów i architektury sprzętu wnioski, zawarte w rozdziale 6, są bodaj najważniejszym dorobkiem prezentowanych w rozprawie osiągnięć. Wnioski te prezentują liczne postulaty związane z budową dedykowanej architektury systolicznej do obliczeń związanych z ekstrakcją poszukiwanych cech obrazu metodami morfologii matematycznej.

Dorobek badawczy Doktoranta jest bardzo przydatny, ponieważ realizacja algorytmów przetwarzania obrazów, w tym skuteczność ekstrakcji poszukiwanych cech obrazu, jest ciągle aktualnym problemem. Obecny postęp technologiczny uzasadnia także prace zastosowania do tego celu architektury wieloprocesorowej do przyspieszenia tych obliczeń. Już osiągnięte efekty winny zachęcić Autora do dalszych prac na tym polu.

Do szczególnych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- 1) zastosowanie tablicy systolicznej do przetwarzania obrazów,
- 2) modyfikacja algorytmów morfologicznych ze względu na ich przeznaczenie dotyczące celu obliczeń i platformy technologicznej,
- 3) implementacja algorytmów morfologicznych w architekturze systolicznej,
- 4) opracowanie własnej koncepcji tablicy systolicznej z uwzględnieniem jej przeznaczenia do implementacji algorytmów morfologicznych przetwarzających obrazy,
- 5) opracowanie ogólniejszych przesłanek budowy specjalizowanych architektur wieloprocesorowych do przetwarzania obrazów, ze szczególnym uwzględnieniem architektur systolicznych,
- 6) weryfikacja opracowanych koncepcji w rzeczywistym systemie Systola 1024,
- 7) skuteczna ekstrakcja niewidocznych elementów obrazu na przykładzie rzeczywistego obrazu polakierowanej powierzchni samochodu.

Sformułowane uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz postawione pytania nie podważają dorobku Doktoranta 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 konstatuje, że moja opinia o wartości recenzowanej pracy jest zdecydowanie 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 wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującej Ustawie, dlatego **wnoszę o przyjęcie recenzowanej pracy jako rozprawy doktorskiej oraz wnioskuję o dopuszczenie Autora pracy, mgr. inż. Krzysztofa Lichego do jej publicznej obrony.**

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials 'KL' or similar, written in a cursive style.