

dr hab inż. Wojciech Kwedło, prof. PB.

Wydział Informatyki

Politechnika Białostocka

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Bratka zatytułowanej:
Metody i algorytmy adaptacji obliczeń uczenia maszynowego i aplikacji
numerycznych do wysokowydajnych systemów komputerowych

1. Znaczenie problemów badawczych

Problematyka redukcji zużycia energii elektrycznej w systemach obliczeniowych wysokiej wydajności (HPC) stanowi obecnie jedno z kluczowych wyzwań informatyki. W obliczu dążenia do osiągnięcia i przekroczenia bariery eksaskalowej (exascale computing), głównym ograniczeniem dalszego skalowania systemów przestała być technologiczna możliwość upakowania tranzystorów, a stał się nim bilans energetyczny oraz limity termiczne układów scalonych (tzw. power wall). W nowoczesnych centrach superkomputerowych koszty zasilania i chłodzenia stanowią znaczącą część całkowitego kosztu posiadania (TCO), co sprawia, że maksymalizacja wskaźnika wydajności na wat (FLOPS/W) staje się celem równoważnym z dążeniem do minimalizacji czasu obliczeń.

W tym kontekście podjęty w pierwszej części rozprawy temat optymalizacji energetycznej aplikacji numerycznych jest wysoce aktualny i istotny. Tradycyjne podejście, polegające wyłącznie na usprawnieniach sprzętowych, wyczerpuje swój potencjał, co wymusza poszukiwanie rezerw na poziomie oprogramowania i algorytmów. Zastosowanie mechanizmów dynamicznego skalowania napięcia i częstotliwości (DVFS - dynamic voltage and frequency scaling) sterowanych z poziomu aplikacji, a nie tylko systemu operacyjnego, wpisuje się w nowoczesny nurt współprojektowania sprzętu i oprogramowania (hardware-software co-design). Jest to szczególnie istotne w przypadku czasochłonnych obliczeń numerycznych (np. rozważane w rozprawie symulacje dyfuzji czy adwekcji), gdzie nawet niewielka procentowa redukcja poboru mocy przekłada się na wymierne oszczędności ekonomiczne i zmniejszenie śladu węglowego.

Drugim, obszerniejszym zagadnieniem poruszonym w rozprawie, jest problematyka minimalizacji czasu realizacji zapytań zliczających (counting queries). Zagadnienie to posiada fundamentalne znaczenie dla wydajności algorytmów uczenia maszynowego, ze szczególnym uwzględnieniem procesu uczenia struktur sieci Bayesowskich. Ponieważ automatyczna ekstrakcja wiedzy z danych za pomocą modeli probabilistycznych wymaga wykonania ogromnej liczby operacji zliczania (niezbędnych do wyznaczenia statystyk wystąpień atrybutów), usprawnienie biblioteki SABNAtk bezpośrednio przekłada się na skrócenie czasu budowy złożonych systemów wnioskowania. W obliczu rosnących wolumenów danych, opracowanie metod przyspieszających te operacje stanowi istotny wkład w rozwój narzędzi eksploracji danych.

2. Układ recenzowanej rozprawy

Konstrukcja rozprawy jest poprawna, choć sformułowana we wstępie teza („Przeprowadzone badania wskazują...”) budzi wątpliwości ze względu na swój wysoki stopień ogólności. Jest to bezpośrednią konsekwencją dychotomii tematycznej pracy, łączącej dwa odległe zagadnienia: energooszczędność w metodach numerycznych oraz optymalizację zapytań zliczających. Cele pracy zostały jednak zdefiniowane precyzyjnie.

Część merytoryczna rozpoczyna się od opisu metod redukcji zużycia energii w obliczeniach numerycznych (rozdział 2). Kolejne części (rozdziały 3–6) poświęcono problematyce zapytań zliczających, przedstawiając kolejno: sformułowanie problemu i bibliotekę SABNAtk, metody poprawy wydajności strategii opartych na mapach bitowych, automatyzację doboru strategii oraz jej zrównoleglenie. Rozdział 7 dotyczy optymalizacji zapytań zliczających dla architektury ccNUMA, a całość zamyka podsumowanie (rozdział 8). Dorobek publikacyjny Doktoranta jest znaczący: na 85 pozycji bibliograficznych, 10 stanowi jego współautorstwo (w tym 8 jako pierwszy autor).

Strukturę pracy oceniam pozytywnie. Szczególnie wartościową praktyką Autora jest bezpośrednia walidacja eksperymentalna wprowadzanych algorytmów, następująca zaraz po ich opisie.

3. Osiągnięcia autora

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

- Opracowanie dwóch autorskich metod redukcji zużycia energii elektrycznej dla aplikacji równoległych w środowisku OpenMP (nie wliczając w to metody referencyjnej typu brute-force). Proponowane rozwiązania opierają się na heterogenicznym skalowaniu napięcia i częstotliwości DVFS dla poszczególnych rdzeni. Istotą obydwu metod jest większa redukcja taktowania tych jednostek, które są lżej obciążone w wyniku statycznego podziału iteracji pętli na wątki (sytuacja, gdy liczba iteracji nie jest podzielna przez liczbę wątków). Doktorant dokonał eksperymentalnej oceny metod na przykładzie dwóch algorytmów: numerycznego rozwiązania równania dyfuzji oraz wielowymiarowego algorytmu adwekcji MPDATA. Eksperymenty obliczeniowe przeprowadzono na platformach Intel CascadeLake i AMD Milan-X. Warto podkreślić, że wyniki tych prac zostały opublikowane na łamach Journal of Parallel and Distributed Computing – czasopisma o ugruntowanej pozycji i wysokiej renomie w środowisku naukowym zajmującym się przetwarzaniem równoległym oraz obliczeniami o wysokiej wydajności (HPC).
- Opracowanie dwóch algorytmicznych udoskonaleń strategii opartej na mapach bitowych, zaimplementowanych w bibliotece SABNAtk. Pierwsze z nich (oznaczone akronimem SNIJ) eliminuje nadmiarowe operacje wyznaczania przecięć map bitowych na najniższym poziomie drzewa przeszukiwania w głąb (DFS – *Depth-First Search*). Druga strategia (SNIJK) wprowadza mechanizm przycinania (*pruning*) wybranych gałęzi drzewa przeszukiwań, co pozwala na pominięcie analizy całych poddrzew. Efektywność obu metod zweryfikowano eksperymentalnie na platformach serwerowych wyposażonych w procesory Intel Cascade Lake, AMD Rome oraz AMD Milan, wykazując znaczące skrócenie czasu realizacji zrównoleglonych strumieni zapytań.
- Opracowanie metody automatycznego doboru strategii realizacji zapytań zliczających. W rozwiązaniu tym Doktorant zastosował modele regresji typu online, których zadaniem jest predykcja czasu wykonania zapytania dla trzech rozważanych technik: map bitowych, tablic kontyngencji oraz sortowania pozycyjnego (radix sort). Kluczową cechą proponowanego mechanizmu jest

uczenie ciągłe modeli wraz z przetwarzaniem strumienia zapytań, co pozwala na dynamiczną adaptację systemu do zmieniającej się charakterystyki strumienia. Decyzja o wyborze strategii podejmowana jest na podstawie kryterium minimalnego prognozowanego czasu realizacji. Skuteczność podejścia zweryfikowano w dwóch scenariuszach: dla syntetycznego, losowego strumienia zapytań oraz w rzeczywistej aplikacji służącej do uczenia struktur sieci Bayesowskich. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że mechanizm adaptacyjny pozwala na znaczne skrócenie całkowitego czasu obliczeń w porównaniu do statycznego wykorzystania którejkolwiek z pojedynczych strategii.

- Opracowanie zrównoleglonej wersji metody automatycznego doboru strategii oraz jej adaptacja do specyfiki wieloprocesorowych architektur z niejednorodnym dostępem do pamięci (ccNUMA). Uwzględniono przy tym kluczową cechę tych systemów, jaką jest różnica w czasie dostępu do pamięci lokalnej i zdalnej. W warstwie implementacyjnej Doktorant wykorzystał mechanizmy synchronizacji wątków (mutedeksy) ze standardu C++ oraz mechanizm zagnieżdżonego zrównoleglenia (nested parallelism) środowiska OpenMP. Przeprowadzone badania wykazały, że metoda adaptacyjna utrzymuje swoją przewagę wydajnościową również w przetwarzaniu równoległym. Ponadto, zastosowanie dedykowanych optymalizacji uwzględniających architekturę NUMA pozwoliło na dodatkowe, znaczne skrócenie czasu realizacji strumienia zapytań.

Warto podkreślić, że Doktorant jest pierwszym autorem trzech referatów dotyczących metod optymalizacji zapytań zliczających, opublikowanych w materiałach warsztatów organizowanych podczas prestiżowej konferencji Euro-Par.

4. Poprawność

Po lekturze rozprawy nasuwają się następujące uwagi:

- Brakiem w opisie metodyki eksperymentalnej w rozdziale 2 jest pominięcie specyfikacji środowiska programistycznego: nazwy i wersji kompilatora oraz zastosowanych opcji optymalizacji, w szczególności tych determinujących

wykorzystanie rozszerzeń wektorowych (SSE/AVX/AVX2/AVX-512). Szczegóły te są kluczowe w kontekście badań nad mechanizmem DVFS, ponieważ intensywne wykorzystanie jednostek SIMD wymusza na procesorze obniżenie częstotliwości pracy (tzw. AVX Offset). Przykładowo, specyfikacja użytego w badaniach procesora Intel Xeon Gold 6240

(<https://www.intel.com/content/www/us/en/content-details/338848/2nd-gen-intel-xeon-scalable-processors-specification-update.htm>) podaje, że przy obciążeniu wszystkich rdzeni taktowanie Turbo Boost wynosi 3.3 GHz dla instrukcji skalarnych/SSE/AVX natomiast dla instrukcji AVX-512 ulega znacznemu obniżeniu (do 2.5 GHz). Podana przez Autora (s. 19) maksymalna częstotliwość 2.5 GHz – wartość niższa nawet od taktowania bazowego (2.6 GHz) – sugeruje niejawnie użycie instrukcji AVX-512. Brak jawnej deklaracji w tym zakresie utrudnia jednak jednoznaczną interpretację i replikację wyników. Ponadto, ważną staje się weryfikacja, czy żądana przez mechanizm DVFS częstotliwość pracy była w rzeczywistości osiągnięta przez procesor. W pracy zabrakło informacji, czy Doktorant monitorował, np. przy użyciu narzędzia LIKWID, na które się powołuje (s. 30) i liczników sprzętowych (performance counters) rzeczywiste taktowanie rdzeni w trakcie eksperymentów. Jest to o tyle istotne, że przy niewystarczającej wydajności układu chłodzenia lub przekroczeniu limitów energetycznych (power limits), sprzętowe mechanizmy zabezpieczające mogły wymusić redukcję częstotliwości (throttling) niezależnie od ustawień programowych, co wpłynęłoby na otrzymane wyniki.

- Badania eksperymentalne przedstawione w rozdziale 2 ograniczono do jednej wartości parametru $L_a = 1,02$ co oznacza akceptację spadku wydajności obliczeń (wydłużenie czasu wykonania) o maksymalnie 2%. Nawet jeśli wielowariantowa analiza wrażliwości na ten parametr wiązałaby się ze zbyt dużym nakładem pracy, przyjęcie tak sztywnego progu wymaga merytorycznego uzasadnienia, którego w rozprawie zabrakło.
- Eksperymenty przedstawione w rozdziale 2 przeprowadzono przy włączonej obsłudze wielowątkowości współbieżnej (SMT / Hyper-Threading). W pracy zabrakło jednak merytorycznego uzasadnienia dla tego wyboru. W kontekście zadań typu HPC decyzja ta jest dyskusyjna, ponieważ powszechnie wiadomo, że w

intensywnych obliczeniach numerycznych SMT może powodować degradację wydajności. Wynika to z rywalizacji wątków logicznych o współdzielone zasoby rdzenia, takie jak jednostki wykonawcze (ALU/FPU) czy pamięć podręczną, co w efekcie wydłuża czas obliczeń zamiast go skracać.

- W eksperymentach przeprowadzonych w rozdziale 4 Autor ograniczył się do zbadania skumulowanego wpływu obu optymalizacji (SNIJ oraz SNIJK), pomijając analizę wkładu poszczególnych komponentów (tzw. ablation study). Uniemożliwia to ocenę, która z technik jest kluczowa dla uzyskanego przyspieszenia. Ponadto, w rozdziale czwartym zabrakło krytycznego spojrzenia na proponowane optymalizacje i analizy przypadków brzegowych. Wykresy skrzypcowe na rysunku 4.5 ujawniają, że dla niewielkiej części zapytań z testowanego strumienia losowego odnotowano degradację wydajności (wydłużenie czasu obliczeń). W pracy brakuje próby wyizolowania tych zapytań, określenia ich charakterystyki oraz wyjaśnienia przyczyn, dla których proponowane metody okazały się w tych konkretnych przypadkach nieskuteczne.
- W rozdziale 5 zabrakło odniesienia uzyskanych wyników do teoretycznego minimum, wyznaczanego przez tzw. idealny selektor (oracle). Wartość tę można wyznaczyć post hoc jako sumę minimalnych czasów realizacji każdego zapytania osiągniętych przez najlepszą z trzech dostępnych strategii (dla przypadków, w których dysponowano kompletnymi danymi pomiarowymi). Takie zestawienie pozwoliłoby na precyzyjną ocenę jakości zastosowanych modeli regresji. Umożliwiłoby bowiem określenie, jak duży margines potencjalnej wydajności jest tracony na skutek błędów predykcji lub narzutu obliczeniowego samej metody doboru.
- W rozdziale 7 zabrakło podsumowania skalowalności końcowej wersji algorytmu (ccNUMA-AC) w odniesieniu do referencyjnej implementacji sekwencyjnej. Wartościowym uzupełnieniem rozprawy byłoby wyznaczenie współczynnika przyspieszenia względem referencyjnej implementacji sekwencyjnej i zestawienie go z teoretycznym przyspieszeniem liniowym (wynoszącym idealnie 128x dla 128 rdzeni). Mimo wspomnianych przez Autora ograniczeń systemu kolejkowego (limit

czasu wykonywania zadania), taką analizę porównawczą można było przeprowadzić dla instancji problemu o mniejszej złożoności obliczeniowej. Ponadto, opis środowiska eksperymentalnego w tym rozdziale jest niekompletny – brakuje informacji o wersji systemu operacyjnego oraz jego konfiguracji. W przypadku systemu Linux kluczowa jest kwestia statusu mechanizmu Automatic NUMA Balancing. Usługa ta, dążąc do automatycznej migracji stron pamięci w celu poprawy lokalności, może wchodzić w interferencje z ręcznymi optymalizacjami wprowadzonymi przez programistę, co mogło w istotny sposób zmienić (podwyższyć lub obniżyć) otrzymane wyniki wydajności.

5. Wiedza kandydata

Treść rozprawy dowodzi, że Kandydat dysponuje ugruntowaną i szeroką wiedzą w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. W szczególności widoczne jest to w obszarze obliczeń równoległych i obliczeń o wysokiej wydajności (HPC). Doktorant udowodnił, że sprawnie posługuje się warsztatem badawczym, planując i realizując eksperymenty weryfikujące efektywność obliczeniową i energetyczną autorskich metod. Załączona bibliografia została dobrana starannie, jest aktualna i adekwatna do podjętych w pracy problemów badawczych.

6. Wniosek końcowy

Przedstawione w punkcie czwartym uwagi mają w przeważającej mierze charakter doprecyzowujący, a w mniejszym stopniu polemiczny, i nie obniżają ogólnej, wysokiej oceny merytorycznej recenzowanej rozprawy. Stanowią one jedynie przyczynek do dyskusji podczas publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę ocenę przedstawioną w poprzednich punktach stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Bratka pt. „Metody i algorytmy adaptacji obliczeń uczenia maszynowego i aplikacji numerycznych do wysokowydajnych systemów komputerowych” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W szczególności:

- rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,

- ukazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja,
- potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie przedmiotowej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Pawła Bratka do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.