

Gliwice, 21.12.2023 r.

Dr hab. inż. Katarzyna Harężlak, prof. PŚ
Katedra Informatyki Stosowanej
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Politechnika Śląska w Gliwicach

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Michała Kukowskiego
pt. „Indeksowanie baz danych na nowoczesnych typach pamięci”
przygotowanej pod kierunkiem
prof. dr. hab. Jacka Cichonia oraz dr. inż. Wojciecha Macyny

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Michała Woźniaka, otrzymane dnia: 6 listopada 2023 roku.

1. Przedmiot rozprawy, aktualność i ważność tematyki rozprawy

Bazy danych są podstawą funkcjonowania wielu systemów informatycznych, a ich zadaniem jest gromadzenie zbiorów informacji w celu ich późniejszego udostępniania. Jedną z najczęściej wykonywanych operacji w bazach danych jest operacja wyszukiwania i jej implementacja decyduje o efektywnym dostępie do przechowywanych informacji. W przypadku nieuporządkowanych struktur, przeszukiwanie musi odbywać się sekwencyjnie, co jest zadaniem czasochłonnym i nie do zaakceptowania przez użytkowników. Popularnym i podstawowym rozwiązaniem tego problemu jest wprowadzenie indeksowania zawartości baz danych, które znacznie zwiększa efektywność wyszukiwania. Podejście to wykorzystuje dodatkowe struktury zawierające wskaźniki logicznie posortowane według wartości jednego lub większej liczby kluczy tak, aby spełniały kryterium uporządkowania. Jednakże, korzystanie z indeksów, poza niewątpliwą zaletą, jaką jest efektywny dostęp do danych, niesie ze sobą również pewne obciążenia. Każda modyfikacja danych wymusza aktualizację indeksu, powodując dodatkowy narzut czasowy na wykonywaną operację. Zaleca się więc rozważne podejście do tworzenia takich struktur. Dotyczy to zarówno ograniczenia tej operacji tylko do tych atrybutów, względem których często wykonywana jest operacja wyszukiwania, jak i samej budowy indeksu.

Badania dotyczące omawianego obszaru prowadzone są już od wielu lat i jak dotąd opracowano różne metody indeksowania baz danych. Jednak rozwój technologiczny umożliwiający gromadzenie coraz to większych zbiorów danych, korzystanie z nich w systemach wbudowanych, a także pojawienie się nowych rozwiązań w zakresie pamięci trwałych, wymuszają poszukiwania nowych rozwiązań efektywnego dostępu do informacji. Użytkownicy sprzętów komputerowych, uzyskując szybsze i bardziej pojemne pamięci dyskowe, oczekują wykorzystania tych możliwości również w obszarze baz danych. Dlatego prace w tym kierunku są ciągle rozwijane.

WPLYNĘŁO

04-01-2024

RDN-IT / 4 / 2024

Praca naukowa wraz z metodami opisanymi w rozprawie doktorskiej Pana magistra inżyniera Michała Kukowskiego wpisują się w ten nurt, a tematyka podjęta w rozprawie doktorskiej jest ważna, celowa i aktualna. W rozprawie postawiono dwa główne cele.

1. Analiza dotychczasowych algorytmów i struktur danych wykorzystywanych do indeksowania relacyjnych baz danych.
2. Opracowanie nowych metod indeksowania oraz implementacja zaproponowanych struktur danych.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska podzielona została na osiem rozdziałów. W rozdziale pierwszym zawarto wprowadzenie w tematykę rozprawy, przedstawiono motywację prowadzonych badań oraz cele rozprawy. W rozdziale drugim Doktorant omawia różne podejścia do indeksowania baz danych, wzbogacając opis licznymi rysunkami. Podaje również wady i zalety poszczególnych rozwiązań. Rozdział trzeci poświęcony jest charakterystyce pamięci trwałych, z uwzględnieniem wpływu jaki mają na funkcjonowanie różnych metod indeksowania. Opis słowny uzupełniony jest tabelami zawierającymi wartości parametrów pamięci oraz rysunkami, które prezentują zasady funkcjonowania dyskutowanych rozwiązań. W rozdziale czwartym zaprezentowana została, opracowana na potrzeby badań, platforma testowa, której trzon stanowi symulator modeli pamięci wraz z algorytmami indeksującymi zawartość bazy danych. Na platformie dostępne są też trzy zestawy kwerend opracowane na podstawie zestawów eksperymentalnych dostępnych w literaturze. Kolejne trzy rozdziały prezentują nowatorskie rozwiązania dedykowane różnym typom pamięci trwałych wraz z formalną analizą ich złożoności, opis przeprowadzonych eksperymentów i omówienie uzyskanych rezultatów. W ostatnim rozdziale Autor przedstawia krótkie podsumowanie osiągnięć i proponuje dalsze kierunki prac.

Można zatem stwierdzić, że wszystkie oczekiwane elementy zostały opisane w rozprawie. W moim odczuciu pewne rozczarowanie/niedosyt stanowi zawartość rozdziałów 5, 6 i 7. Choć stanowią podstawę rozprawy doktorskiej, nie zostały przygotowane z należytą starannością. Poza licznymi błędami interpunkcyjnymi, stylistycznymi oraz literowymi, obecnymi również w całej pracy, pojawiają się tu również takie, które utrudniają zrozumienie prezentowanych rozwiązań.

3. Oryginalne osiągnięcia

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy, decydujących o jej wartości teoretycznej i praktycznej, a które wyróżniają ją spośród dostępnych w literaturze przedmiotu, zaliczyć można:

- a) Dokonanie krytycznej oceny metod indeksowania baz danych po kątem możliwości ich wykorzystania w coraz powszechniej stosowanych pamięciach trwałych bazujących na nowoczesnych technologiach.
- b) Projekt i implementację autorskiej struktury Flash Aware Tree (FA-Tree) dla przechowywania rekordów w pamięciach flash typu NAND wraz z autorskimi mechanizmami wirtualizacji. Zaproponowane podejście wykorzystuje strukturę drzewa B+ z opóźnionym zapisem do pamięci flash. Zmniejsza to liczbę reorganizacji drzewa, wydłużając żywotność pamięci. Cecha ta uzyskiwana jest dzięki zastosowaniu bufora w pamięci RAM. Niewielki rozmiar tego bufora daje przewagę opracowanej metodzie nad klasycznym indeksem LSM, co czyni nową metodę efektywną dla zastosowań w systemach wbudowanych. Przeprowadzone eksperymenty

potwierdziły mniejsze lub równe wykorzystanie pamięci, przy większej efektywności czasowej w stosunku do alternatywnych rozwiązań.

- c) Projekt i implementację nowych rozwiązań dla indeksowania wierszowego, kolumnowego i częściowego dla baz danych gromadzonych na dyskach SSD. Nacisk położony został na efektywne wykorzystanie charakterystyki pracy takich pamięci (zapis i odczyt pełnych stron danych) i równoległym zapisie wszystkich kości strony danych. Ponadto w każdym z rozwiązań wprowadzono mechanizm opóźnionego usuwania rekordów, co korzystnie wpływa na liczbę reorganizacji partycji.
- Indeksowanie wierszowe – opracowanie indeksu Flash Aware LSM Tree (FA-LSM), bazującego na strukturze LSM, w celu uzyskania możliwości zbiorczego dodawania rekordów. Cel osiągnięto dzięki wprowadzeniu bufora przechowującego metadane wszystkich węzłów (adres, wielkość, minimalną i maksymalną wartość klucza) oraz dodatkowego typu węzła, gromadzącego dopisywane rekordy, a który może być utworzony na dowolnym poziomie drzewa, bez konieczności reorganizacji struktury.
 - Indeksowanie kolumnowe – opracowanie indeksu Columned FD-Tree (CF-Tree), bazującego na indeksie FD o zapisie wierszowym, opracowanym dla dysków SSD. W zaproponowanym rozwiązaniu wyróżniono dwa typy drzew FD – zawierające wartości klucza rekordu oraz wartości atrybutów niekluczowych – po jednym drzewie dla każdego atrybutu. Wszystkie drzewa posiadają taki sam rozmiar, a algorytm scalający łączy ich zawartość w całe rekordy, zgodnie z warunkami wyszukiwania.
 - Indeksowanie częściowe – opracowanie systemu indeksowania częściowego Lazy Adaptive Merging (LAM) optymalizującego dostęp do dysku poprzez mechanizm opóźnionego usuwania danych z partycji lub przenoszonych do indeksu. Mechanizm ten wspierany jest przez odpowiednie struktury w pamięci RAM eliminujące niepotrzebne operacje na partycjach. Do struktur tych należą dziennik rejestrujący zakresy danych, które zostały usunięte lub już przepisane do indeksu oraz drzewo zawierające metadane partycji. Odroczone reorganizacja partycji możliwa jest dzięki tablicy rejestrującej ich bieżące użycie. Struktura LAM zapewnia współpracę z dowolnym indeksem dedykowanym dla dysków SSD.

W większości przypadków, każde z rozwiązań uzyskiwało lepsze parametry wykorzystania pamięci i czasu realizacji dostępu do danych niż podejścia alternatywne. W innych przypadkach podano uzasadnienie otrzymanych wyników.

- d) Projekt i implementację systemu indeksowania częściowego PCM Adaptive Merging (PAM) dla baz danych zapisywanych na pamięciach PCM. Utworzenie systemu poprzedzone było opracowaniem udoskonalonej wersji metody Adaptive Merging (extended Adaptive Merging eAM), która bazując na opóźnionym usuwaniu danych, zmniejsza liczbę niepotrzebnych operacji zapisu danych. Ograniczenia w dalszej modyfikacji algorytmu Adaptive Merging były czynnikiem motywującym do poszukiwania innych możliwości optymalizacji procesu reorganizacji partycji. W efekcie zaproponowano system PAM o strukturze analogicznej do systemu LAM. Oba rozwiązania różnią się podejściem do gromadzenia informacji na temat danych usuwanych z partycji. W systemie LAM dane przenoszone do indeksu lub usuwane z bazy danych gromadzone są w jednym dzienniku. Natomiast w systemie PAM, zaproponowano dla nich osobne struktury. W rozprawie nie podano uzasadnienia tej różnicy. Ponadto, chociaż system PAM może współpracować z dowolnym indeksem dedykowanym pamięci PCM, zdecydowano się na opracowanie własnej struktury Buffered B+ Tree, która

zapewnia minimalizację operacji na partycjach poprzez buforowanie w pamięci RAM wewnętrznych węzłów drzewa oraz danych dodawanych lub usuwanych z indeksu. Również i to podejście wykazywało się lepszymi parametrami realizacji dostępu do danych w porównaniu do alternatywnych metod.

- e) Algorytmy opracowane dla realizacji podstawowych operacji na danych dla każdego z zaproponowanych rozwiązań.
- f) Eksperymenty zaprojektowane dla oceny poprawności opracowanych metod oraz ich realizacja z użyciem różnych typów pamięci o różnej charakterystyce, dostępnych w zaimplementowanym symulatorze. Wykorzystany zestaw kwerend pozwolił na uzyskanie przekrojowych analiz. Na podstawie prowadzonych eksperymentów wskazano parametry mające wpływ na efektywność wykonywanych operacji.
- g) Ocenę skuteczności zaproponowanych podejść poprzez zestawienie ich wyników z uzyskanymi dla alternatywnych metod stosowanych w analizowanym obszarze.

Podsumowując, badania zostały poprawnie zaplanowane i przeprowadzone. W pierwszej kolejności zdefiniowano problem badawczy, dokonano krytycznej analizy istniejących rozwiązań, a następnie zdefiniowano metodę badawczą. Opracowane struktury i algorytmy wspierające proces indeksowania zostały kolejno zaimplementowane i zweryfikowane w jednolitym środowisku testowym. Ich skuteczność potwierdzono w eksperymentach prowadzonych zgodnie z przygotowanymi scenariuszami. Przeprowadzono analizę porównawczą skuteczności zaproponowanych rozwiązań z wynikami innych metod z badanych obszarów, która posłużyła do wyciągnięcia końcowych wniosków.

Potwierdzeniem osiągnięć Doktoranta jest dorobek publikacyjny, na który składa się 5 publikacji z czego dwie z wyznaczonym współczynnikiem wpływu (IF) o sumarycznej wartości 2,13, znajdujących się na liście ministerialnej (70 pkt. MNiSW) oraz trzy publikacje konferencyjne, dwie z listy ministerialnej (70 pkt. MNiSW). Cztery publikacje umieszczone zostały w bazie Scopus, z czego jedna, najnowsza, nie znajduje się w spisie bibliograficznym rozprawy. Również cztery publikacje widnieją w bazie Web of Science, wszystkie zostały ujęte w spisie bibliograficznym rozprawy. Zarówno w bazie Scopus, jak i Web of Science, Indeks Hirscha Doktoranta wynosi 1. We wszystkich pracach Doktorant jest drugim autorem, choć w opisie bibliograficznym rozprawy, w pozycji 5 został umieszczony błędnie na pierwszym miejscu.

4. Wiedza Autora oraz znajomość literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy rozprawa

Autor rozprawy wykazał się dobrą znajomością dorobku literaturowego dotyczącego zagadnień, którym jest ona poświęcona. Podstawą oceny literatury jest spis liczący 233 pozycje. Doktorant uwzględnił tu zarówno prace odnoszące się do najnowszych badań w tematyce rozprawy, jak i prace dokumentujące rozwój metod indeksowania danych na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat. Choć w samym spisie widoczne są drobne uchybienia, jak np., brak daty ostatniego dostępu do stron internetowych, czy brak opisu bibliograficznego dla pozycji 203, tak ujęty dobór literatury oceniam pozytywnie. Świadczy on o dostatecznej wiedzy Doktoranta w obszarze badawczym rozprawy doktorskiej.

5. Wady i słabe strony rozprawy, uwagi dyskusyjne

Rozprawa jako całość nie ma istotnych wad w zakresie metody badawczej, sposobu prezentacji wyników, a także w zakresie formułowania wniosków. Można jednak zgłosić zastrzeżenia natury językowej i edycyjnej, niestosowanie się do zasad interpunkcji oraz liczne błędy literowe. Choć docenić należy ilustracje prezentujące opracowane struktury i ich działanie, to brak staranności w ich przygotowaniu i nieprecyzyjność sformułowań w ich opisie, oceniam jako słabą stronę rozprawy. Uchybienia nie zmieniają co prawda dorobku Doktoranta, jednak, wprowadzając w błąd czytelnika, powodują wydłużenie czasu na zrozumienie i ocenę rozwiązań.

W szczególności do błędów takich zaliczyć można:

- a) Str. 44, część zdania „wskaznik wewnętrzny, który wskazuje na tę samą stronę co poprzedni wskaznik danego poziomu” i na stronie 45 (pisownia oryginalna) „musieliśmy dodać wewnętrzny wskaznik wskazujący na tę samą stronę do ostatni wskaznik na poziomie L_i ”, odnoszą się prawdopodobnie do tej samej sytuacji, lecz nie jest tożsame.
- b) Str. 54, w linii 17 pierwszego akapitu zadeklarowano prezentację wyników tylko pamięci Samsung, tymczasem w pracy zamieszczono rezultaty dla wszystkich typów pamięci.
- c) Str. 57, w przedostatniej linii znajduje się odwołanie do zestawu kwerend Z_{balans} – taki zestaw nie został zaprezentowany. Wygląda na to, że to błąd literowy, ale utrudniający analizę wyników.
- d) Str. 58, Autor twierdzi: „Zauważymy, że drzewo $B+$ nadpisuje nawet 123 razy więcej pamięci” – nie udało mi się uzyskać takiego wyniku na podstawie danych zwartych w pracy. Dlaczego akurat taka liczba została wspomniana w rozprawie?
- e) Str. 67, w opisie przykładu znalazło się zdanie: „Podczas dodawania zbiorczego 10 rekordów” – czy nie powinno być dwudziestu rekordów?
- f) Str. 83, w opisie wyników mamy komentarz: „Dla zestawu Z_B drzewo $FALSM$ uzyskało wynik 12%” – tego na rysunkach 6.13 i 6.14 nie widać.
- g) Str. 89, druga linia zawiera zdanie „wskazuje na stronę P_2 poziomu L_1 ” – czy nie chodziło o poziom L_2 ?
- h) Str. 94, w pseudokodzie 6.3, linie 14 i 31 odwołują się odpowiednio do zmiennych `EXTERNAL_FENCE` oraz `ExternalFence` – czy te zmienne reprezentują tę samą wielkość?
- i) Str. 94, w tym samym pseudokodzie, linie 22 i 23 sugerują, że `External.numEntriesBeforePageArray[i]` dla $i=1$ jest niezainicjowany. Czy to jest zamierzone działanie?
- j) Str. 96, we wzorze 6.2, ostatnim elementem jest n , które wcześniej nie zostało zdefiniowane – czy nie powinno być zatem $npos$?
- k) Str. 98, analiza kosztów wstawiania zawiera przekształcenia ze strony 47-51, może wystarczyło się do nich odwołać?
- l) Str. 120, rysunek 6.34, w drzewie $PB+$ znajduje się zapis (1,21) reprezentujący prawdopodobnie minimalną i maksymalną wartość znajdującą się na partycji P_2 , z analizy rysunku wynika, że powinno chyba być (6,21)?
- m) Str. 126, w pseudokodzie 6.5, linia 22 zawiera zmienną k , czy nie powinno być `key`?

- n) Str. 149, w opisie rysunku pojawia się stwierdzenie: „pozostałe partycje $P1(1-26)$, $P2(2-21)$..” partycji o takich zawartościach nie widać na rysunkach. Czy nie popełniono błędu w zakresach partycji? Podobny błąd pojawia się w bloku „dane partycji” (Str. 150 rysunek 7.2.)
- o) Str. 154, zawiera odwołanie do algorytmu 19, którego nie ma w rozprawie.
- p) Str. 156, w pseudokodzie 7.2 w linii 10 pojawia się zmienna FANOUT, której znaczenia nie znamy.
- q) Str. 161, w opisie wyników pojawia się zdanie „Analizując wykresy 7.6 i 7.7 widzimy, że tak samo jak selektywność, również rozmiar rekordu nie wpływa na charakterystykę trendu” – tymczasem na obu wykresach pokazane są wyniki dotyczące tego samego rozmiaru rekordu.

Ponadto pewne błędy i nieprecyzyjne sformułowania pojawiły się w analizie kosztów, które utrudniły śledzenie poprawności procesu wyznaczania złożoności. Ułatwieniem na pewno byłoby ponumerowanie wszystkich równań.

- a) Str. 47, w twierdzeniu 5.1 P_{cap} zdefiniowano jako liczbę rekordów – a co rozumiemy przez *n-liczbę danych* – liczbę rekordów, liczbę kolumn czy liczbę bajtów?
- b) Str. 49, t_{insert} zdefiniowano jako „czas potrzebny na dodanie n element” – czy chodziło o n elementów czy n -tego elementu?
- c) Str. 49, w równaniu N^{write} , pierwszy człon sumy zdefiniowano jako $|L_{i-1}|^j$. W kolejnych podstawieniach człon ten zastępowany jest prawą stroną równania definiującego $|L_i|^j$. Czy $|L_{i-1}|^j = |L_i|^j$, czy w sumie pierwszym członem powinno być $|L_i|^j$?
- d) Str. 50, we wzorze 5.2 – założono, że w algorytmie scalania rekurencyjnie schodzącym na niższe poziomy struktury, liczba danych $|L_{i-1}|$ jest stała i niezależna od j . Czy jednak scalając niższe poziomy struktury nie mamy do czynienia z pojemnością K razy większą? Z czego wynika przyjęte założenie?

Uwagi o charakterze dyskusyjnym

- a) W większości opisów proponowanych struktur Doktorant używa pierwszej osoby liczby mnogiej: „podjęliśmy”, „zapropowaliśmy”, co wskazuje na kilku autorów tych rozwiązań. Jest to wytłumaczalne, zważywszy na dwóch autorów każdej publikacji, na których bazuje rozprawa doktorska. Choć w jednym z opisów pojawia się pierwsza osoba liczby pojedynczej (str. 86), to z treści rozprawy nie wynika jednoznacznie jaka była rola Doktoranta w prowadzonych pracach badawczych prezentowanych w rozprawie.
- b) Podstawą realizacji eksperymentów i wnioskowania na podstawie uzyskanych wyników jest opracowany w tym celu symulator różnych typów i rodzajów pamięci. Nasuwa się pytanie, czy i w jaki sposób zweryfikowano zgodność działania symulatora z rzeczywistymi odpowiednikami.
- c) W rozdziale czwartym, dla prezentacji schematu używanej w rozprawie bazy danych, zastosowano nieformalny diagram (rysunek 4.2). Właściwszym byłoby wykorzystanie bardziej sformalizowanej postaci, jaką jest dla przykładu Diagram Związków Encji (ang. Entity Relational Diagram ERD). Jaka była motywacja Doktoranta dla opuszczenia tej ścieżki?
- d) Wyniki uzyskane w testach pokazywane są zawsze w sposób zbiorczy. Dla przykładu skupmy się na rysunku 5.5, gdzie zaprezentowano czas realizacji stu tysięcy operacji dla każdego z zestawów. Czy oznacza to, że dany zestaw był wykonywany 100 tysięcy razy w całości, czy

liczba operacji podzielona została zgodnie z procentami zadeklarowanym dla danego zestawu? Wybierzmy znów dla przykładu zestaw ZP_{zapis}. Czy wykonano 60 000 operacji wstawiania pojedynczego rekordu, 20 000 operacji wyszukiwania pojedynczego rekordu i 20 000 usuwania pojedynczego rekordu? Czy poszczególne operacje wykonywane były w takiej kolejności, jak zostały wymienione w definicji zestawu, czy realizowane naprzemiennie? Czy parametry wykonania każdego typu operacji były podobne? Czy badano średnie i odchylenie standardowe uzyskiwanych wyników? I wreszcie czy badano istotność statystyczną różnic w uzyskiwanych wynikach?

- e) Prace badawcze prowadzone były w środowisku systemu operacyjnego Linux, jednak w wielu przypadkach w analizowanych zastosowaniach wykorzystywany jest również system Microsoft Windows. Rodzi się zatem pytanie, czy zaproponowane rozwiązania można zaadoptować do tego systemu i czy sprawdzą się równie dobrze.
- f) W rozprawie zabrakło także analizy i dyskusji kluczowych ograniczeń zaproponowanych metod oraz odniesienia uzyskanych dla nich wyników nie tylko do własnych badań, lecz również do wcześniejszych prac prowadzonych w tym obszarze.

6. Wniosek końcowy

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Kukowskiego, mimo pewnych uwag krytycznych, **spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora**, określone w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.). W mojej ocenie zawiera **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**. Doktorant osiągnął postawione cele, wykazując się niezbędną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie „Informatyka Techniczna i Telekomunikacja” i umiejętnościami w zakresie prowadzenia badań naukowych z wykorzystaniem metod informatycznych. **Wnoszę zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Katarzyna Koręcha