

Porównywanie efektywności metod mnożenia macierzy

Sebastian Maciejewski 132275 i Jan Techner 132332
grupa II, zajęcia we wtorki o 15:10, tygodnie nieparzyste,
email: maciejewski.torun@gmail.com

30 kwietnia 2019

1 Wstęp

Sprawozdanie dotyczy zadania w wariancie 22. - porównywanie efektywności metod mnożenia macierzy:

- dla 3 pętli kolejność jki, podział pracy przed 1. pętlą
- dla 6 pętli kolejność pętli zewnętrznych ijk, wewnętrznych iijjkk, podział pracy przed 4. pętlą

Wszystkie pomiary zostały wykonane na komputerach laboratoryjnych w sali 2.7.6.

2 Analiza przygotowania eksperymentu

2.1 Kod wykorzystywany przy pomiarach

Kod, którego używaliśmy w eksperymencie został tak podzielony, aby cała logika przetwarzania znajdowała się w pojedynczej funkcji. Poniżej prezentowany jest kod tylko tych funkcji - generowanie macierzy i wypełnianie jej losowymi liczbami, liczenie czasu i wypisywanie wyników działającą w ten sam sposób dla wszystkich wariantów przetwarzania.

2.1.1 Metoda 3 pętli - równoległe

```
1 void multiply_matrices_JKI()
2 {
3     #pragma omp parallel for
4     for (int j = 0; j < COLUMNS; j++)
5         for (int k = 0; k < COLUMNS; k++)
6             for (int i = 0; i < ROWS; i++)
7                 matrix_r[i][j] += matrix_a[i][k] * matrix_b[k][j];
8 }
```

2.1.2 Metoda 3 pętli - sekwencyjnie

```
1 void multiply_matrices_IKJ_sequentially()
2 {
3     for (int i = 0; i < ROWS; i++)
4         for (int k = 0; k < COLUMNS; k++)
5             for (int j = 0; j < COLUMNS; j++)
6                 matrix_r[i][j] += matrix_a[i][k] * matrix_b[k][j];
7 }
```

2.1.3 Metoda 6 pętli - równoległe

```
1 void multiply_matrices_IJK_IJJKK()
2 {
3     int r = 10;
4     for (int i = 0; i < ROWS; i += r)
5         for (int j = 0; j < COLUMNS; j += r)
6             for (int k = 0; k < COLUMNS; k += r)
7                 #pragma omp parallel for
8                     for (int ii = i; ii < i + r; ii++)
9                         for (int jj = j; jj < j + r; jj++)
10                             for (int kk = k; kk < k + r; kk++)
11                                 matrix_r[ii][jj] += matrix_a[ii][kk] * matrix_b[kk][jj];
12 }
```

2.2 Analiza podziału pracy na wątki

2.2.1 Dyrektywy OpenMP

W naszym kodzie używamy dyrektyw 'pragma omp parallel for', które sprawiają, że iteracje pętli będą wykonane w sposób równoległy przez kilka wątków. Każdy z wątków wykona jednakowy zakres iteracji, w naszym wypadku, przy podziale na 4 wątki, pierwszy wątek wykona pierwszą $\frac{1}{4}$ operacji, drugi kolejną itd. Dopiero po zakończeniu przetwarzania przez wszystkie wątki następuje synchronizacja i przejście dalej - do zakończenia pomiaru czasu.

2.2.2 Analiza ryzyka wystąpienia wyścigu i zjawiska false sharingu

Zjawisko wyścigu, czyli równoległa modyfikacja tej samej zmiennej przez różne procesy, nie występuje w naszym kodzie.

Aby się o tym przekonać wystarczy zwrócić na to, że w naszym przypadku, w równoległym przetwarzaniu dla 3 pętli mamy zapis do *matrix_r[i][j]*, gdzie wartości *j* są dzielone pomiędzy procesy z powodu wystąpienia dyrektywy 'parallel for' przed pętlą odpowiedzialną za inkrementację licznika kolumn *j* (2.1.1, linijki od 3 do 7). Co za tym idzie każdy proces zawsze zapisuje do innej kolumny niż pozostałe, więc zjawisko wyścigu nie występuje w tym przypadku.

Podobna sytuacja występuje przy 6 pętlach - każdy proces zapisuje do osobnego wiersza z powodu wystąpienia dyrektywy 'parallel for' przed pętlą odpowiedzialną za inkrementację zmiennej *ii* (2.1.3, linijki od 7 do 11) - w tym przypadku również nie dojdzie do wyścigu.

Inaczej sytuacja ma się w przypadku zjawiska false sharingu. False sharing występuje wtedy, gdy różne procesy zapisują zmienne znajdujące się w tej samej linii pamięci - wówczas kopie linii w pamięciach podręcznych innych procesów stają się nieaktualne i dany proces musi ponownie pobrać linię z pamięci aby zapewnić spójność pamięci podręcznej. To zajmuje czas, więc takie zjawisko jest nieporządkane, gdyż wpływa negatywnie na efektywność przetwarzania.

Długość linii pamięci w systemach, na których wykonywane były pomiary to 64B, zatem w każdej linii pamięci mieści się 16 zmiennych typu float, używanych przez nas w obliczeniach. Rozmiary instancji w naszych pomiarach były ≥ 400 . Mając to na uwadze, możemy się zająć analizą ryzyka wystąpienia zjawiska false sharingu.

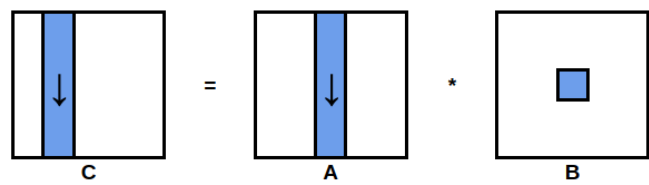
W wersji przetwarzania równoległe dla 3 pętli mamy do czynienia z podziałem pracy przed 1. pętlą, *j*, która odpowiada za licznik kolumn.

DUŻY ZNAK ZAPYTANIA ? NAD TYM:

W tym wypadku możemy stwierdzić, że z uwagi na to, iż każdy z procesów zapisuje dane jedynie do swojej kolumny macierzy, zjawisko false sharingu nie wystąpi gdyż rozmiar jednej kolumny jest znacznie większy od rozmiaru jednej linii pamięci - dla instancji o wielkości 400, w kolumnie mieści się około 50 linii pamięci. Jedynym miejscem, w którym to zjawisko może wystąpić są brzegi kolumn. (ALE CHYBA JEDNAK WIERSZY) CZY JEDNAK WYSTĄPI BO MACIERZ JEST UŁOŻONA W PAMIĘCI WIERSZAMI I KAŻDY PROCES ROBI SOBIE KOPIĘ WIERSZA, WIĘC JAK KTOŚ COŚ ZMIENI W INNEJ KOLUMNIE TO POTRZEBNY JEST PONOWNY ODCZYT CAŁEGO WIERSZA?

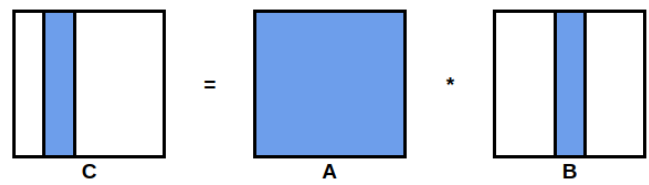
DO OBGADANIA, BO JEŚLI JEST TAK Z WIERSZAMI, TO W 6 PĘTLACH NIE BĘDZIE FALSE SHARINGU A W 3 BĘDZIE.

2.2.3 Podział przetwarzania w metodzie 3-pętlowej



Rysunek 1: Obszar danych dla jednej wewnętrznej pętli

JAKIŚ OPIS

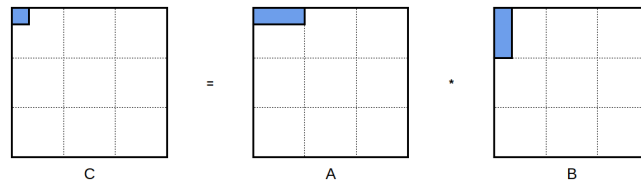


Rysunek 2: Obszar danych dla dwóch wewnętrznych pętli

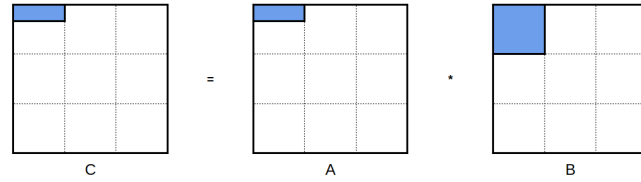
JAKIŚ OPIS

2.2.4 Podział przetwarzania w metodzie 6-pętlowej

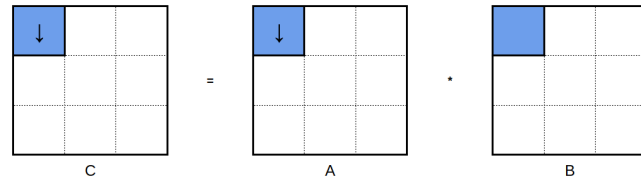
TODO OPISY



Rysunek 3: Obszar danych dla pętli kk



Rysunek 4: Obszar danych dla pętli jj, kk



Rysunek 5: Obszar danych dla pętli ii, jj, kk

2.3 Analiza lokalności czasowej

Znaczącym czynnikiem mającym wpływ na efektywność przetwarzania jest czas dostępu do danych. Ten czas jest znacznie krótszy przy dostępie podręcznej pamięci procesora niż przy konieczności odwołania się do pamięci RAM. Bardzo ograniczona pojemność pamięci podręcznej sprawia, że kod powinien być pisany w taki sposób, aby maksymalizować wykorzystanie danych już załadowanych do pamięci podręcznej i minimalizować ilość odczytów z RAM. Przetwarzanie jest efektywne wtedy, gdy kod charakteryzuje się czasową lokalnością odwołań do pamięci, czyli wielokrotnym wykorzystaniem danych załadowanych do pamięci podręcznej zanim zostaną zastąpione innymi danymi odczytanymi z RAM.

Zakładamy, że rozmiar pamięci podręcznej procesora, na którym przeprowadzane są obliczenia to 6 MB. Jest to pojemność pamięci L3 - L2 nie jest tu brane pod uwagę, ponieważ część danych obecnych w niej pokrywa się z danymi w L3. Również pamięć L1 jest przy tym założeniu pomijana, ponieważ jej pojemność jest tak mała, że jej uwzględnianie nie miało by znaczącego wpływu na obliczane wielkości instancji.

Przy obliczeniach zakładamy, że $1 \text{ MB} = 1000 \text{ KB} = 1000000 \text{ B}$, przy czym pojedyncza zmienna typu float, z których korzystamy, ma rozmiar 4 B.

Dla metody 3 pętli wzór, którego używamy do obliczania rozmiaru instancji, dla której będzie zachowana lokalność czasowa to:

$$n^2 * 4 + n * 16 * 4 + n * 16 * 4 \leq \frac{6 * 1000000}{4}$$

przy czym n to rozmiar instancji.

Wzór ma taką postać, bo DLACZEGO DOKŁADNIE TAK BYŁO?

Po obliczeniu uzyskana wartość n rozmiaru instancji, dla której wciąż będzie zachowana lokalność czasowa to w przybliżeniu $n \leq 596$.

Dla metody 6 pętli wzór do obliczenia rozmiaru instancji ma postać:

$$3 * 4 * r^2 \leq 6000000$$

gdzie r to rozmiar wykorzystywanego bloku, pobieranego każdorazowo z macierzy.

Wzór ma taką postać ponieważ DLACZEGO DOKŁADNIE

Po obliczeniu wartość r , dla której będzie zachowana lokalność czasowa to $r \leq 707$.

2.4 Analiza lokalności przestrzennej

Lokalność przestrzenna jest związana z występowaniem w systemie pamięci wirtualnej. Jest mechanizm, który umożliwia procesowi pracę w jednym, ciągłym obszarze pamięci operacyjnej, nawet gdy fizycznie jest ona po-fragmentowana lub część z niej znajduje się w pliku wymiany, który procesy mogą wykorzystać jako dodatkową pamięć w przypadku, gdy w systemie brakuje fizycznej pamięci operacyjnej. Pamięć wirtualna niesie ze sobą pewne konsekwencje - najważniejszą z nich jest to, że teraz procesy muszą posługiwać się adresami logicznymi zamiast fizycznymi adresami mającymi bezpośrednie odwzorowanie w pamięci RAM. Taka pamięć jest dzielona na strony o rozmiarze 4 kB, które stanowią jeden, ciągły obszar w pamięci. Aby taki system mógł działać, pamięć RAM jest dzielona na ramki, których rozmiar odpowiada rozmiarowi stron. Strony mogą się znajdować w pamięci lub we wspomnianym wyżej pliku wymiany, co sprawia, że procesor musi posługiwać się logicznymi adresami aby uzyskać dostęp do danych.// Taka organizacja pamięci wymusza obecność mechanizmu tłumaczenia adresów logicznych na fizyczne, czyli odwzorowania adresów strony na adres ramki pamięci. Informacje o takich odwzorowaniach znajdują się w tablicy stron. W tym miejscu stosuje się pewne usprawnienie, jako, że przeglądanie takiej tablicy przy każdym odwołaniu byłoby bardzo mało wydajne. Tym usprawnieniem jest bufor translacji adresu TLB, który posiada określoną, stałą liczbę adresów stron i odpowiadających im ramek, dzięki czemu można szybko dokonać translacji adresu logicznego na fizyczny. Jednak tak jak w pamięci podręcznej, tak i w buforze translacji występuje ograniczenie rozmiaru.

Program chechuje się zachowaniem lokalności przestrzennej wtedy, kiedy nie występują sytuacje, w których w buforze translacji nie znajduje się adres szukanej strony. W procesorze, z którego korzystaliśmy przy obliczeniach bufor translacji mieści 544 pary adres strony - adres ramki. Każda ze stron pamięci wirtualnej ma rozmiar 4 kB, tak więc mieści 1024 liczby z wykorzystywanej przez nas macierzy.

Aby znaleźć wielkości instancji, dla których przetwarzanie zachowa lokalność przestrzenną dla 3 pętli posłużyliśmy się wzorem:

$$\frac{n * n}{1024} + n + n \leq 544$$

gdzie n to rozmiar instancji.

Taka postać wzoru wynika z Z CZEGO ?

Po obliczeniu wartość n , dla której będzie zachowana lokalność przestrzenna to $n \leq 243$.

Dla 6 pętli wzór na znalezienie takich wartości n i r , dla których przetwarzanie zachowa lokalność przestrzenną, wygląda następująco:

$$\min\left(r, \frac{r * n}{1024}\right) + 2 * \min\left(\frac{r}{4}, \frac{\frac{r}{4} * n}{1024}\right) \leq 544$$

gdzie n to rozmiar instancji, a r to rozmiar wykorzystywanego bloku.

Wzór ma taką postać ponieważ DLACZEGO ?

I JAK OPISAĆ OBLICZANIE WARTOŚCI TEJ FUNKCJI 2 ZMIENNYCH

3 Analiza wyników eksperymentu pomiarowego

3.1 Wstępny opis eksperymentu pomiarowego

Ekspierymet został przeprowadzony na komputerach w sali laboratoryjnej 2.7.6 przy wykorzystaniu funkcji opisanych w punkcie 2.1 wywoływanych w programie, którego jedynym zadaniem poza wywołaniem wymienionych wyżej funkcji było losowanie macierzy (na początku, przed rozpoczęciem pomiaru czasu) i mierzenie czasu przetwarzania (na podstawie stanu zegara przed i po wywołaniu funkcji). Po podaniu wielkości instancji i kompilacji programu poddawaliśmy go analizie w programie CodeXL. Ogólnie mierzone (lub dane) były następujące wartości:

| Zmienna | Oznaczenie | Wartość progu |
|--|------------|---------------|
| Wielkość instancji | n | |
| Wielkość okna | r | |
| Czas przetwarzania | Tobl | |
| Liczba instrukcji assemblera | LIA | 250 000 |
| Liczba cykli procesora | LCP | 250 000 |
| Liczba dostępów do L1 | LDP | 250 000 |
| Liczba braków trafień do L3 | BTL3 | 50 000 |
| Liczba braków trafień do bufora translacji | BTBT | 50 000 |

Tablica 1: Oznaczenia i progi zmiennych

Wielkością instancji określamy rozmiar mnożonej macierzy kwadratowej.

Pomiary zbierane były w taki sposób, aby nie uruchamiać na raz analizy zbyt wielu parametrów, gdyż mogłoby to zakłócić wyniki. Aby tego uniknąć mierzyliśmy najpierw LDP, BTL3 i BTBT, a dopiero później LIA i LCP. Odczytane wyniki zapisywaliśmy do załączonego arkusza kalkulacyjnego. Dokonałmy też wstępnej analizy instrukcji assemblera, które składały się na nasz program aby zobaczyć które z nich najbardziej obciążały procesor (było ich najwięcej).

3.2 Wyniki uzyskane w eksperymencie

| n | Tobl | LIA | LCP | LDP | BTL3 | BTBT |
|-----|-------|------|-------|------|------|------|
| 400 | 0.078 | 1413 | 1871 | 925 | 35 | 1 |
| 450 | 0.109 | 1980 | 4914 | 1329 | 53 | 16 |
| 550 | 0.289 | 3566 | 15405 | 2370 | 113 | 1036 |
| 600 | 0.625 | 4554 | 29754 | 3159 | 136 | 2697 |
| 700 | 1.683 | 6856 | 77515 | 4999 | 349 | 7458 |

Tablica 2: Wyniki dla 3 pętli, przetwarzanie równoległe

| n | r | Tobl | LIA | LCP | LDP | BTL3 | BTBT |
|------|-----|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 1500 | 100 | 1.5780 | 233901 | 97207 | 33332 | 2688 | 44 |
| 1500 | 300 | 2.6770 | 105947 | 131667 | 33506 | 2002 | 153 |
| 1500 | 400 | 4.4530 | 98107 | 232887 | 87960 | 1192 | 653 |
| 1500 | 500 | 2.9530 | 241691 | 154389 | 31834 | 720 | 7617 |
| 1500 | 750 | 7.3280 | 101394 | 366565 | 31171 | 1086 | 40351 |
| 2000 | 200 | 3.6700 | 242986 | 204930 | 74343 | 2825 | 69 |

Tablica 3: Wyniki dla 6 pętli, przetwarzanie równoległe

| n | Tobl | LIA | LCP | LDP | BTL3 | BTBT |
|-----|--------|------|------|------|------|------|
| 400 | 0.0310 | 774 | 582 | 375 | 18 | 1 |
| 450 | 0.0630 | 1073 | 832 | 602 | 17 | 1 |
| 550 | 0.0940 | 1877 | 1431 | 1060 | 24 | 1 |
| 600 | 0.0940 | 2329 | 1577 | 1097 | 23 | 0 |
| 700 | 0.1660 | 3616 | 2441 | 1685 | 42 | 3 |
| 800 | 0.2340 | 5299 | 3534 | 2454 | 42 | 8 |

Tablica 4: Wyniki dla 3 pętli, przetwarzanie sekwencyjne