

# HPC - MPI

Tomasz Kępa  
tk359746@students.mimuw.edu.pl

2 czerwca 2019

## 1 Kompilacja

Program powinien kompilować się na dowolnym kompilatorze (gcc, cray, intel), ale najlepsze wyniki uzyskałem na kompilatorze **Cray** i na nim proszę go kompilować.

## 2 Struktura plików

Rozwiązanie podzielone jest na pliki w następujący sposób:

- Struktury danych:
  - *config.h* – struktura przechowująca sparsowane flagi przekazane do programu
  - *mpigroup.h* – struktura definiująca grupę obliczeniową (cały świat, grupy replikacyjne, warstwy)
  - *matrix.h* *matrix.cpp* – struktury przechowujące informacje o macierzy oraz macierze rzadkie i gęste
- *densematgen.h* *densematgen.cpp* – pliki dostarczone razem z treścią zadania służące do generowania macierzy gęstej
- *utils.h* – mniej istotne pomocnicze funkcje
- *matrixmul.h* *matrixmul.cpp* – definicje głównych etapów obliczeń i główny program, implementacje w następujących plikach:
  - *initialization.cpp* – wczytywanie macierzy A, generowanie macierzy B, początkowa dystrybucja danych (jak dla  $c = 1$ )
  - *replication.cpp* – rozsyłanie danych między procesami z tych samych grup replikacyjnych, w przypadku algorytmu InnerABC dodatkowo wykonanie początkowego przesunięcia fragmentów macierzy A
  - *communication.cpp* – operacja shift-and-compute (jeden krok obliczeń jednego procesu)
  - *multiplication.cpp* – mnożenie macierzy i komunikacja z tym związana
  - *gathering.cpp* – zbieranie wyników

## 3 Struktury danych

Przed rozpoczęciem obliczeń wszystkie macierze są rozszerzane zerami, tak aby ilość wierszy i kolumn była podzielna przez ilość procesów.

### 3.1 Metadane macierzy

Najważniejsze informacje o macierzy przechowywane są w strukturze *MatrixInfo*. Zawiera ona wszystkie informacje potrzebne do zaalokowania odpowiedniej ilości pamięci przed odbiorem nieznanej macierzy i z tego powodu wysyłana jest zawsze przez wysłaniem macierzy.

### 3.2 Macierze rzadkie

Macierze rzadkie przechowywane są w strukturze *SparseMatrix*. Jest to dokładnie taki sam format jak format na wejściu, czyli CRS z trzema tablicami. Taki format został wybrany z kilku powodów:

- Nie trzeba tracić czasu na zmianę formatu podczas inicjalizacji
- Biblioteka MKL potrafi używać ten format (w wersji z czterema tablicami, ale przejście do tego formatu nie kosztuje)
- Jest to format row-major, co jest korzystne dla ręcznej implementacji mnożenia macierzy

### 3.3 Macierze gęste

Macierze gęste przechowywane są w strukturze *DenseMatrix* w pojedynczej tablicy rozmiaru  $rows \times cols$  w kolejności column-major. Taki format został wybrany z następujących powodów:

- Jest to korzystna kolejność dla implementacji lokalnego mnożenia macierzy
- Procesy trzymają w swoich fragmentach całe kolumny oryginalnych macierzy, więc rozsyłanie i zbieranie macierzy jest dużo prostsze w takim formacie i nie wymaga wykonywania dodatkowych kopii (lokalnych) macierzy

## 4 Intensywność numeryczna

Oznaczenia:

- $d$  – średnia ilość niezerowych elementów w jednym wierszu macierzy A
- $e$  – ilość mnożeń macierzy A przez macierz B
- $n$  – wymiary macierzy A, B i C

### 4.1 Operacje zmiennoprzecinkowe

Do policzenia jednej komórki macierzy C trzeba wykonać średnio  $d$  mnożeń i  $d-1$  dodawań w jednym kroku. Zatem do policzenia macierzy C potrzebne jest  $(2d-1) \cdot n^2 \cdot e$  operacji zmiennoprzecinkowych.

### 4.2 Transfery pamięci

Rozpatrzmy to podobnie jak poprzednio. W tym przypadku istotne staje się jak trzymana jest macierz rzadka A. Założę teraz, że jest to format CRS. W jednym kroku, do policzenia jednej komórki potrzebujemy odczytać jeden wiersz macierzy A i jedną kolumnę macierzy B. Jeśli chodzi o zapisy to potrzebujemy to zrobić tylko raz w macierzy C.

Wczytanie wiersza macierzy A wymaga odczytania średnio  $4 \cdot 2 + 4 \cdot d + 8 \cdot d$  bajtów (2 el. tablicy trzymającej długości wierszy,  $d$  indeksów kolumn,  $d$  elementów macierzy A). W macierzy B czytamy średnio  $8 \cdot d$  bajtów ( $d$  elementów). Na koniec jeszcze musimy wykonać jeden zapis w macierzy C (8 bajtów)

Razem daje to  $16 + 20d$  bajtów na element macierzy C w jednym kroku.

W sumie policzenie całej macierzy C wymaga transferu  $(16 + 20d) \cdot n^2 \cdot e$  bajtów.

## 5 Komunikacja

W obu algorytmach (o ile  $c \neq 1$ ) procesy podzielone są w dwuwymiarową siatkę. Najpierw, wszystkie procesy podzielone są w grupy replikacyjne rozmiaru  $c$ , a pomiędzy tymi grupami, procesy o tych samych rangach wyznaczają warstwy. Warstw musi być oczywiście  $c$ .

W trakcie inicjalizacji koordynator wczytuje macierz A i wysyła odpowiednie fragmenty do wszystkich procesów. Następnie, procesy w tych samych grupach replikacji wymieniają między sobą swoje fragmenty

macierzy A (i B dla InnerABC). W trakcie obliczeń procesy wysyłają komunikaty tylko wewnątrz swojej warstwy (w InnerABC trzeba jeszcze wymienić się obliczonymi fragmentami B na początku każdego kroku). W trakcie końcowego zbierania danych komunikacja wygląda inaczej w obu algorytmach i szerzej opisana jest w części poświęconej optymalizacjom.

## 6 Optymalizacje

### 6.1 MPI

Przy implementacji największy nacisk położyłem na efektywne wykorzystanie możliwości danych przez MPI:

- Większość komunikacji jest asynchroniczna i przepleciona z obliczeniami.
- Początkowe rozsyłanie fragmentów macierzy A przez koordynatora odbywa się tabela po tabeli. Po wysłaniu jednej tabeli mechanizmem *scatter* (asynchronicznie), koordynator od razu zabiera się za przygotowanie kolejnej.
- Przesyłanie macierzy w trakcie replikacji w grupie replikacyjnej odbywa się przez customowe komunikatory za pomocą mechanizmu *broadcast*.
- Przesyłanie macierzy wewnątrz warstw (shift) w trakcie obliczeń przeplecione jest z lokalnie wykonywanym mnożeniem. W InnerABC wymiana obliczonych fragmentów macierzy B wewnątrz grup replikacyjnych na początku niezerowych kroków odbywa się przez mechanizm *allreduce*
- Zbieranie macierzy C wewnątrz grupy replikacyjnej odbywa się za pomocą mechanizmu *reduce* z operacją sumowania (tylko w InnerABC) Zbieranie macierzy C w warstwie zerowej to zwykle *gather*. W przypadku ColumnA jest od razu wykonywana operacja *gather*.
- Zliczanie liczby elementów większych od danego – w przypadku ColumnA jest to zwykle *reduce* po wszystkich procesach, w przypadku InnerABC macierz C najpierw zbierana jest do warstwy 0 i dopiero w tej warstwie jest wykonywana redukcja.

Macierz A dzielona jest między procesy po równej ilości kolumn/wierszy. Innych opcji nie rozważałem ponieważ byłoby to niezgodne z opisem algorytmu.

### 6.2 Flagi kompilacji

Najlepsze wyniki uzyskałem na kompilatorze **Cray**. Włączyłem następujące opcje:

- *-O3* – domyślne optymalizacje
- *-hfp3* – optymalizacje operacji zmiennoprzecinkowych
- *-h vector3* – wektoryzacja operacji wykonywanych w pętlach
- *-hipa4 -hwp -h pl=...* – automatyczne inline’owanie funkcji

### 6.3 Lokalne mnożenie

Formaty macierzy zostały dobrane tak, aby było jak najmniej skoków w tablicach reprezentujących macierze. Zatem macierz A jest row-major, macierze B i C są column-major.

### 6.4 OpenMP

Wykonałem próbę użycia równoległej implementacji MKL (używającej OpenMP). Wyniki były znacznie gorsze niż przy wykorzystaniu wersji sekwencyjnej i poleganiu na MPI, dlatego nie próbowałem używać OpenMP w mojej implementacji.

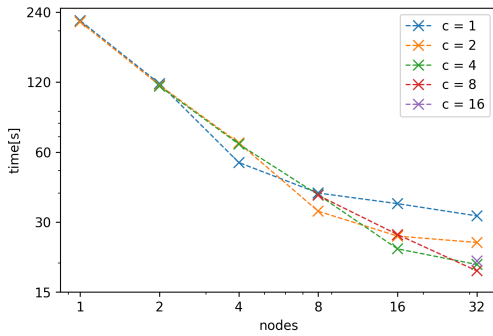
## 7 Skalowalność

Wszystkie podane czasy to kompletne czasy uruchomienia programu, razem z czasem operacji IO.

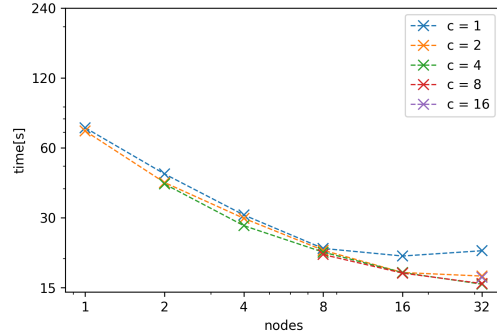
### 7.1 Silna skalowalność

Testy silnej skalowalności zostały przeprowadzone na dwóch macierzach A. Pierwsza miała  $n = 50000$  wierszy i  $d = 1000$  wartości w każdym wierszu. Druga –  $n = 100000, d = 100$ . W pierwszym przypadku mnożenie było wykonywane  $e = 5$  razy, w drugim  $e = 2$ . W obu przypadkach czas wczytywania macierzy wynosił ok. 9.5s Wyniki zostały przedstawione na rys. 1 i rys. 2.

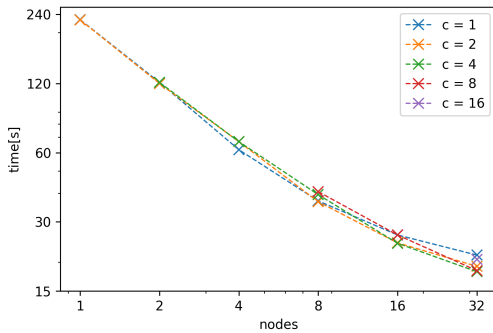
Brak niektórych wyników dla drugiej macierzy wynika z tego, że macierz ta jest zbyt duża żeby zmieścić ją w pamięci jednego węzła i nie dało się przez to przetestować niektórych kombinacji flag i ilości węzłów.



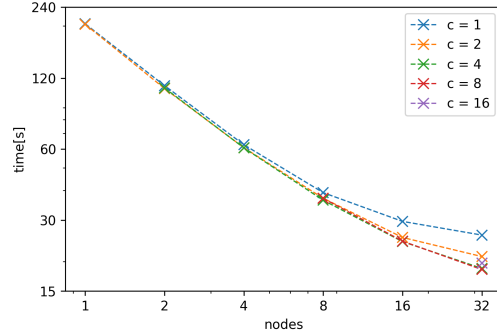
(a) ColumnA, no MKL



(b) ColumnA, MKL



(c) InnerABC, no MKL

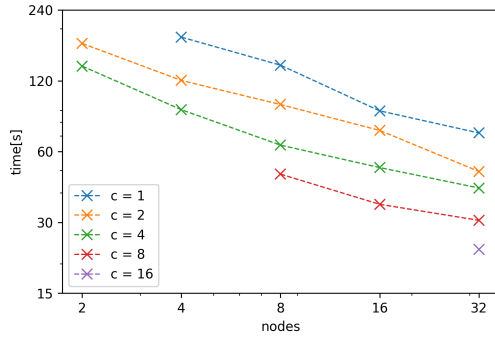


(d) InnerABC, MKL

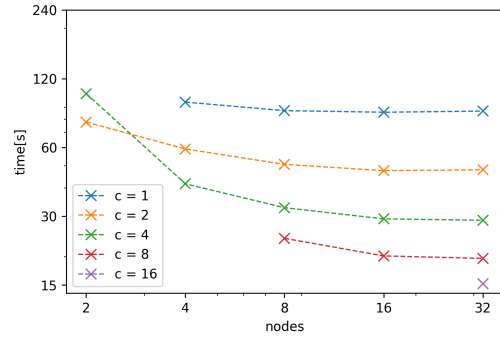
Rysunek 1: Silna skalowalność. Czasy dla  $n = 50000, d = 1000, e = 5, \text{tasks-per-node} = 24$

### 7.2 Słaba skalowalność

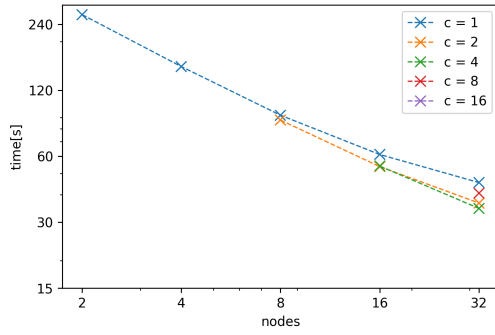
Testy słabej skalowalności zostały przeprowadzone na macierzy  $n = 100000, d = 100$ . Zmienną była liczba wykonywanych mnożeń i wynosiła  $e = \text{nodes} \times 5$ . Parametr  $c$  został ustalony na  $c = 2$ . Czas wczytywania macierzy wynosił ok. 9.5s Wyniki zostały przedstawione na rys. 3.



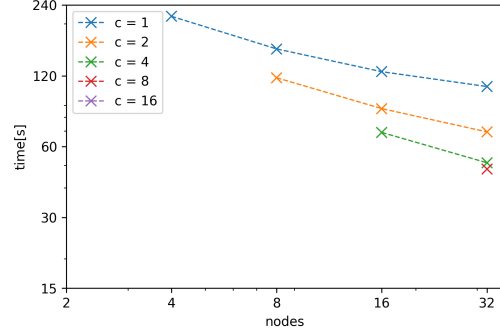
(a) ColumnA, no MKL



(b) ColumnA, MKL

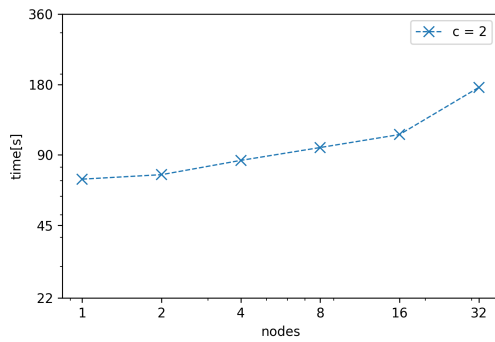


(c) InnerABC, no MKL

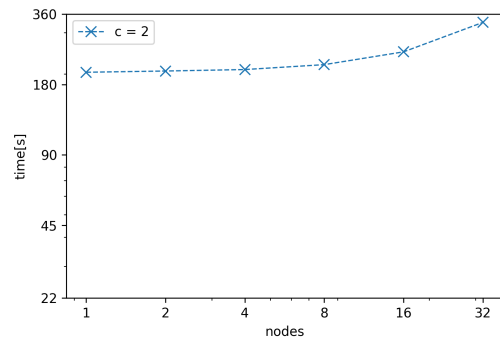


(d) InnerABC, MKL

Rysunek 2: Silna skalowalność. Czasy dla  $n = 100000, d = 100, e = 2, \text{tasks-per-node} = 24$



(a) ColumnA, MKL



(b) InnerABC, MKL

Rysunek 3: Słaba skalowalność. Czasy dla  $n = 50000, d = 1000, e = \text{nodes} \times 5, \text{tasks-per-node} = 24$