Porównanie MPI, OpenMP oraz podejścia hybrydowego w programowaniu równoległym

Piotr Gębalski, Adrian Jabłoński

26 maja 2025

Spis treści

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Cel sprawozdania

Niniejsze sprawozdanie ma na celu przeprowadzenie szczegółowej analizy porównawczej trzech kluczowych podejść w programowaniu równoległym: Message Passing Interface (MPI), Open Multi-Processing (OpenMP) oraz rozwiązań hybrydowych łączących obydwa paradygmaty. Głównym celem jest zbadanie wydajności zastosowania każdego z tych podejść w różnych scenariuszach obliczeniowych.

Dokument prezentuje teoretyczne podstawy każdej z technologii, a następnie porównuje ich efektywność na podstawie implementacji programu do badania czy dany punkt należy do wykresu.

1.2 Podstawy teoretyczne

1.2.1 Open Multi-Processing (OpenMP)

OpenMP to interfejs programowania aplikacji (API) dla programowania równoległego z pamięcią współdzieloną. Wykorzystuje model fork-join, w którym program rozpoczyna wykonanie jako pojedynczy wątek (master thread), a następnie tworzy zespół wątków roboczych do wykonywania równoległych sekcji kodu.

Główne cechy OpenMP:

- **Model pamięci współdzielonej** – wszystkie wątki mają dostęp do tej samej przestrzeni adresowej
- **Dyrektywy kompilatora** – równoległość wprowadzana poprzez pragma w kodzie źródłowym
- **Przyrostowe równoległenie** – możliwość stopniowego dodawania równoległości do istniejącego kodu sekwencyjnego
- **Automatyczne zarządzanie wątkami** – środowisko wykonawcze automatycznie zarządza tworzeniem i niszczeniem wątków

Paralelizacja pętli głównej z OpenMP

Kluczowym elementem implementacji jest zastosowanie dyrektywy OpenMP do równoległego przetwarzania głównej pętli obliczeniowej:

```
#pragma omp parallel for reduction(+ : match_count) schedule(dynamic)
for (int i = 0; i < count; i++){
   double expected = f(xs[i], coeffs);
   if (fabs(expected - ys[i]) < TOLERANCE)
   {
       match_count++;
   }
}
```

1.2.2 Message Passing Interface (MPI)

MPI stanowi standard komunikacji dla programowania równoległego w środowiskach rozproszonych. Opiera się na paradygmacie przekazywania komunikatów między niezależnymi procesami, które nie dzielą wspólnej pamięci. Każdy proces MPI posiada własną, prywatną przestrzeń adresową, a komunikacja odbywa się poprzez jawne wysyłanie i odbieranie wiadomości.

Kluczowe charakterystyki MPI obejmują:

- **Model SPMD** (Single Program, Multiple Data) – ten sam program wykonuje się na różnych procesorach z różnymi danymi
- **Jawną komunikację** – programista musi explicite określić kiedy i jakie dane są przesyłane między procesami
- **Skalowalność** – możliwość efektywnego działania na tysiącach procesorów w klastrach obliczeniowych
- **Przenośność** – standard działa na różnych architekturach od wielordzeniowych stacji roboczych po superkomputery

1.2.3 Podział danych i komunikacja w MPI

Kluczowym elementem implementacji MPI jest podział danych między procesy oraz ich synchronizacja (podany kod nie jest całym spójnym kodem, a tylko pociętym fragmentem):

```
// Broadcast total count to all processes
MPI_Bcast(&total_count, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);

// Calculate local counts and displacements
int points_per_proc = total_count / size;
int remainder = total_count % size;

[...]

// Scatter the points
MPI_Scatterv(all_xs, counts, displs, MPI_DOUBLE, local_xs,
            local_count, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
MPI_Scatterv(all_ys, counts, displs, MPI_DOUBLE, local_ys,
            local_count, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
```

```
// Process local points
for (int i = 0; i < local_count; i++) {
   double expected = f(local_xs[i], coeffs);
   if (fabs(expected - local_ys[i]) < TOLERANCE) {
       local_matches++;
   }
}

// Reduce the match count
MPI_Reduce(&local_matches, &total_matches, 1, MPI_INT,
          MPI_SUM, 0, MPI_COMM_WORLD);
```

1.2.4 Podejście hybrydowe (MPI + OpenMP)

Programowanie hybrydowe łączy zalety obu paradygmatów, wykorzystując MPI do komunikacji między węzłami obliczeniowymi a OpenMP do równoległości wewnątrz każdego węzła. To podejście jest szczególnie efektywne w nowoczesnych architekturach, gdzie klastry składają się z węzłów wielordzeniowych.

Zalety podejścia hybrydowego:

- **Hierarchiczna równoległość** – wykorzystanie struktury sprzętowej (węzły + rdzenie)
- **Redukcja komunikacji** – mniej procesów MPI oznacza mniej komunikatów między węzłami
- **Efektywność pamięciowa** – współdzielenie pamięci wewnątrz węzła przy użyciu OpenMP
- **Lepsze dopasowanie do architektury** – naturalne mapowanie na klastry wielordzeniowe

1.2.5 Hybrydowa paralelizacja MPI + OpenMP

W implementacji hybrydowej zastosowano kombinację MPI do komunikacji między procesami oraz OpenMP do paralelizacji wewnątrz każdego procesu (podany kod nie jest całym spójnym kodem, a tylko pociętym fragmentem):

```
// Initialize MPI with thread support
int provided;
MPI_Init_thread(&argc, &argv, MPI_THREAD_FUNNELED, &provided);

[...]

// Set number of OpenMP threads
omp_set_num_threads(num_threads);

// Process local points with OpenMP parallelism
int local_matches = 0;
```

```
#pragma omp parallel reduction(+:local_matches)
{
   #pragma omp for schedule(dynamic)
   for (int i = 0; i < local_count; i++)
   {
       double expected = f(local_xs[i], coeffs);
       if (fabs(expected - local_ys[i]) < TOLERANCE)
       {
           local_matches++;
       }
   }
}

// Reduce the match count across all MPI processes
MPI_Reduce(&local_matches, &total_matches, 1, MPI_INT,
          MPI_SUM, 0, MPI_COMM_WORLD);
```

1.2.6 Architektura sprzętowa a wybór technologii

Wybór odpowiedniej technologii programowania równoległego zależy w znacznej mierze od dostępnej architektury sprzętowej:

Systemy z pamięcią współdzieloną (SMP) – wielordzeniowe procesory w jednym węźle, gdzie OpenMP często stanowi optymalne rozwiązanie ze względu na niski koszt komunikacji i prostotę implementacji.

Klastry obliczeniowe – systemy rozproszone składające się z wielu niezależnych węzłów połączonych siecią, gdzie MPI jest naturalnym wyborem ze względu na brak wspólnej pamięci między węzłami.

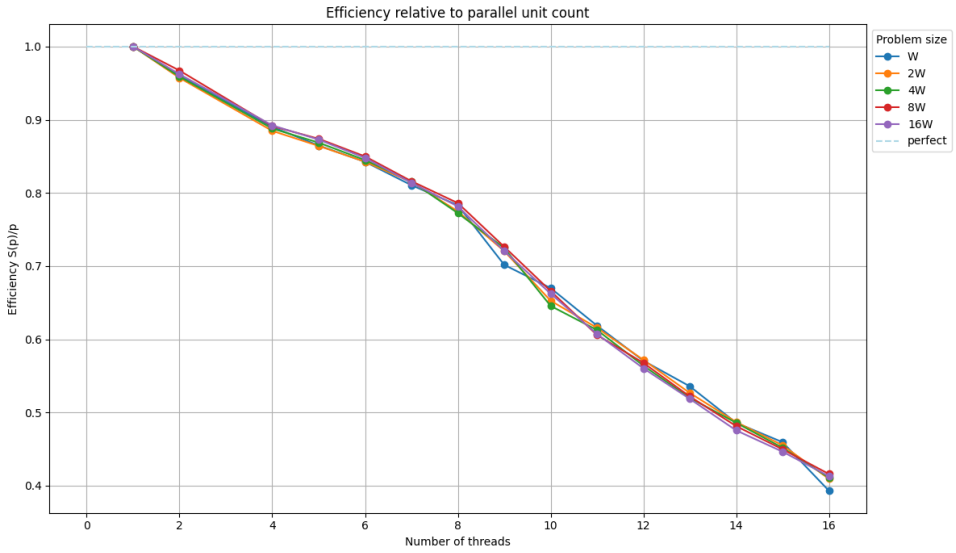
Klastry wielordzeniowe – nowoczesne systemy łączące zalety obu architektur, idealne dla podejścia hybrydowego, pozwalającego na wykorzystanie współdzielonej pamięci wewnątrz węzłów i komunikacji sieciowej między nimi.

Rozdział 2

OpenMP

2.1 Efektywność równoległego przetwarzania

Analiza wykresu efektywności (Rysunek 2.1) pokazuje charakterystyczny spadek efektywności wraz ze wzrostem liczby wątków. Wszystkie testowane rozmiary problemów wykazują podobne zachowanie:



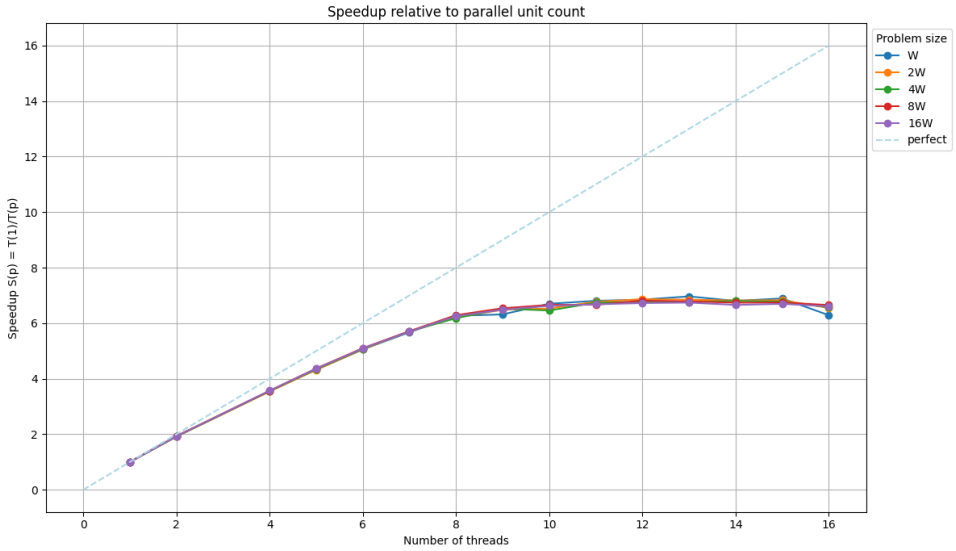
Rysunek 2.1: Efektywność OpenMP

- Efektywność rozpoczyna się od wartości bliskiej 1.0 (100%) dla małej liczby wątków
- Następuje stopniowy spadek efektywności wraz ze wzrostem liczby wątków
- Dla 16 wątków efektywność spada do około 40-45% niezależnie od rozmiaru problemu
- Krzywe dla różnych rozmiarów problemów są bardzo zbliżone, co wskazuje na podobne właściwości skalowania

Obserwowany spadek efektywności wynika z rosnących kosztów synchronizacji między wątkami oraz narzutu związanego z zarządzaniem większą liczbą jednostek wykonawczych. Zjawisko to jest typowe dla programowania równoległego i zgodne z prawem Amdahla.

2.2 Przyśpieszenie obliczeń

Wykres przyśpieszenia (Rysunek 2.2) ujawnia ograniczenia skalowalności OpenMP w testowanym środowisku:



Rysunek 2.2: Przyśpieszenie OpenMP

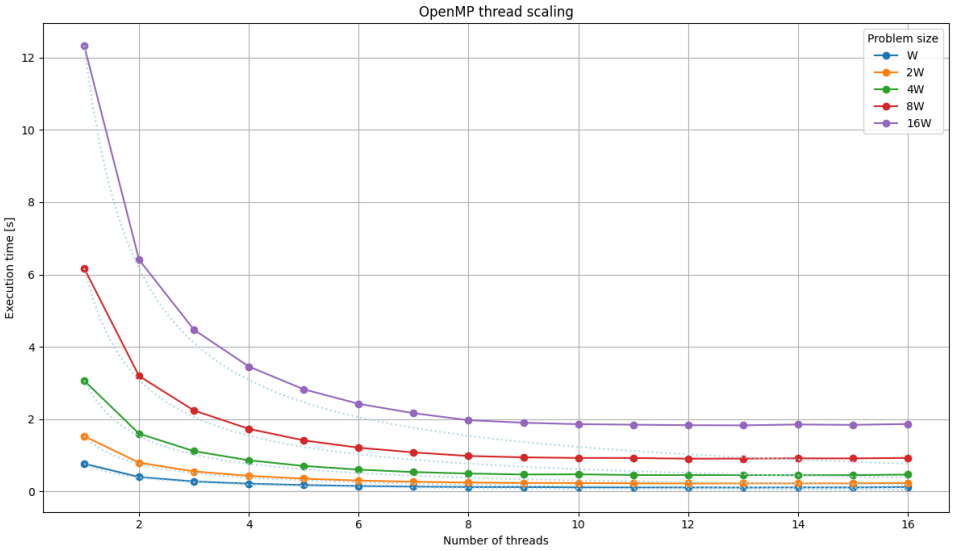
- Maksymalne osiągnięte przyśpieszenie wynosi około 6.5-7x dla większości rozmiarów problemów
- Przyśpieszenie stabilizuje się po osiągnięciu 8-10 wątków
- Dalsze zwiększanie liczby wątków powyżej 10 nie przynosi istotnych korzyści
- Linia reprezentująca idealne przyśpieszenie (perfect scaling) pokazuje znaczną różnicę względem osiągniętych wyników

Plateau przyśpieszenia wskazuje na osiągnięcie granicy efektywności równoległego przetwarzania w danej architekturze sprzętowej. Prawdopodobnie wynika to z ograniczeń przepustowości pamięci oraz zwiększonej rywalizacji o zasoby systemowe.

2.3 Czas wykonania

Wykres czasu wykonania (Rysunek 2.3) dostarcza szczegółowego obrazu wydajności dla poszczególnych rozmiarów problemów:

- **Problem 16W**: Najdłuższy czas wykonania (około 12.3s dla 1 wątku), największy potencjał do równoległenia
- **Problem 8W**: Średni czas wykonania (około 6.1s dla 1 wątku), dobra skalowalność
- **Problem 4W**: Krótszy czas (około 3.1s dla 1 wątku), zauważalny spadek czasu z liczbą wątków



Rysunek 2.3: Przyśpieszenie OpenMP

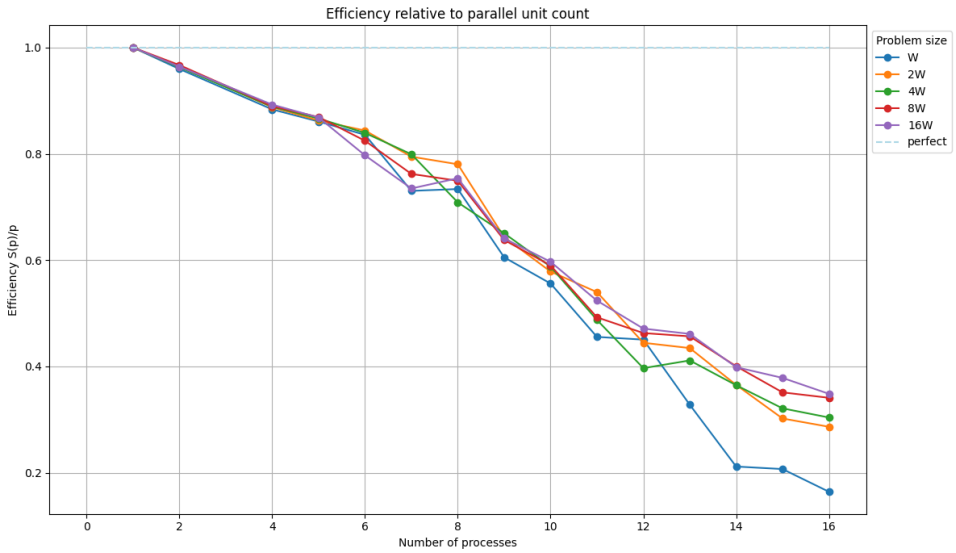
- **Problem 2W**: Szybkie wykonanie (około 1.6s dla 1 wątku), ograniczone korzyści z równoległenia
- **Problem W**: Najkrótszy czas (około 0.8s dla 1 wątku), minimalne korzyści z dodatkowych wątków

Rozdział 3

MPI

3.1 Efektywność równoległego przetwarzania

Analiza wykresu efektywności (Rysunek 3.1) pokazuje znacznie bardziej dramatyczny spadek efektywności w porównaniu do OpenMP:



Rysunek 3.1: Efektywność MPI

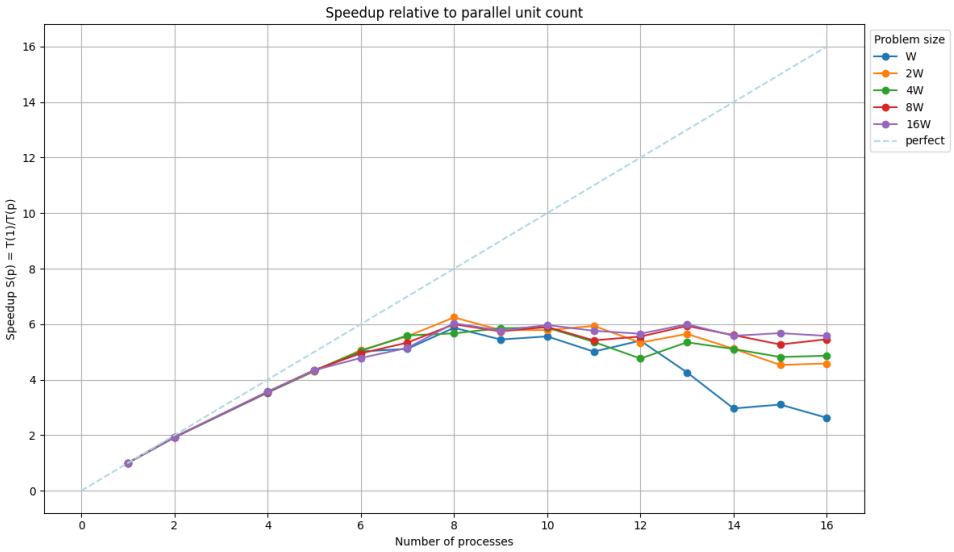
- Efektywność rozpoczyna się od wartości bliskiej 1.0 (100%) dla 1-2 procesów
- Następuje bardzo gwałtowny spadek efektywności już po przekroczeniu 4 procesów
- Dla 16 procesów efektywność spada dramatycznie do około 15-30
- Problem o rozmiarze W wykazuje najgorsze właściwości skalowania, osiągając zaledwie około 16% efektywności przy 16 procesach
- Większe problemy (16W) zachowują nieco lepszą efektywność, ale nadal znacznie gorszą niż OpenMP

Obserwowany drastyczny spadek efektywności wynika z wysokich kosztów komunikacji między procesami MPI oraz narzutu związanego z przesyłaniem danych przez sieć. W

przeciwieństwie do OpenMP, gdzie wątki dzielą wspólną pamięć, procesy MPI muszą jawnie komunikować się poprzez przesyłanie komunikatów.

3.2 Przyśpieszenie obliczeń

Wykres przyśpieszenia (Rysunek 3.2) ujawnia poważne ograniczenia skalowalności MPI:



Rysunek 3.2: Przyśpieszenie MPI

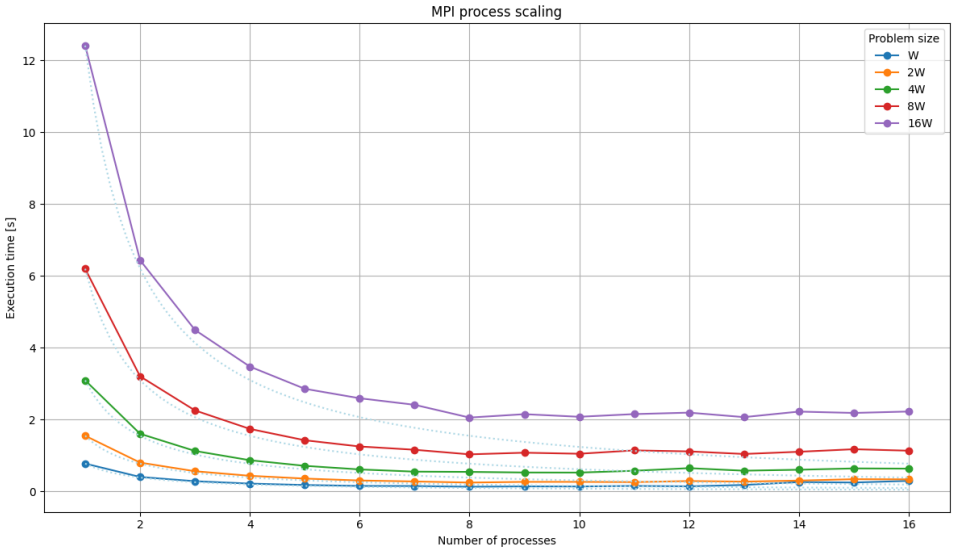
- Maksymalne osiągnięte przyśpieszenie wynosi około 5.5-6x dla większych problemów (8W, 16W)
- Przyśpieszenie osiąga maksimum już przy 6-8 procesach, po czym następuje stagnacja lub nawet spadek
- Problem o rozmiarze W wykazuje najgorsze przyśpieszenie, osiągając maksimum około 2.5-3x
- Dalsze zwiększanie liczby procesów powyżej 8-10 skutkuje pogorszeniem wydajności
- Różnica względem idealnego przyśpieszenia (perfect scaling) jest znacznie większa niż w przypadku OpenMP

Plateau przyśpieszenia występuje znacznie wcześniej niż w OpenMP, co wskazuje na dominujący wpływ kosztów komunikacji. Po przekroczeniu optymalnej liczby procesów, koszty komunikacji przewyższają korzyści z równoległego przetwarzania.

3.3 Czas wykonania

Wykres czasu wykonania (Rysunek 3.3) pokazuje różnice w wydajności dla poszczególnych rozmiarów problemów:

- **Problem 16W**: Najdłuższy czas wykonania (około 12.3s dla 1 procesu), największy spadek czasu do około 2.2s przy optymalnej liczbie procesów



Rysunek 3.3: Czas wykonania MPI

- **Problem 8W**: Średni czas wykonania (około 6.1s dla 1 procesu), spadek do około 1.1s przy 6-8 procesach
- **Problem 4W**: Krótszy czas (około 3.1s dla 1 procesu), spadek do około 0.8s przy małej liczbie procesów
- **Problem 2W**: Szybkie wykonanie (około 1.6s dla 1 procesu), spadek do około 0.4s, ale ograniczone korzyści z większej liczby procesów
- **Problem W**: Najkrótszy czas (około 0.8s dla 1 procesu), minimalne korzyści z równoległenia, czas stabilizuje się na poziomie około 0.3s

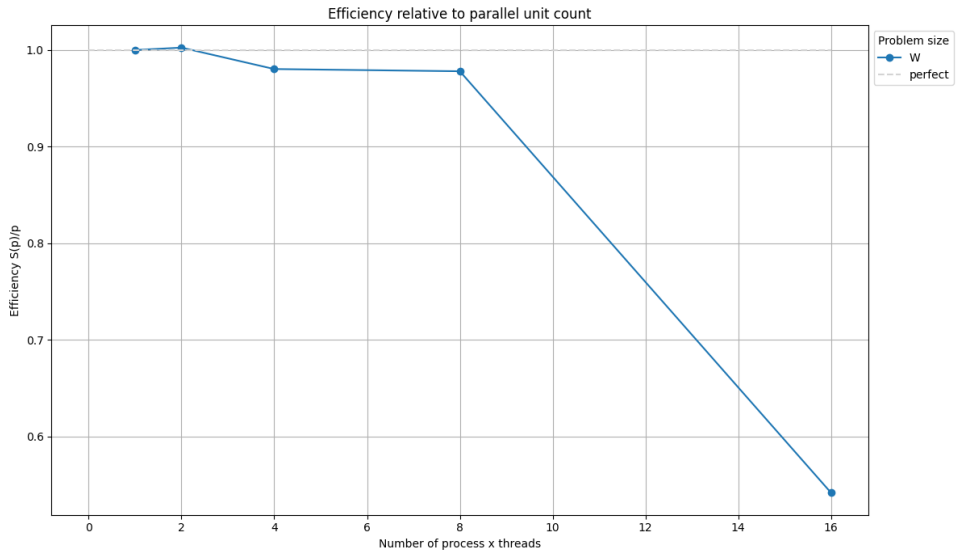
Charakterystyczną cechą MPI jest wyraźnie widoczne optimum w liczbie procesów dla każdego rozmiaru problemu. Po przekroczeniu tej optymalnej wartości, czas wykonania przestaje spadać lub nawet wzrasta, co jest efektem przewagi kosztów komunikacji nad korzyściami z równoległego przetwarzania.

Rozdział 4

Hybryda

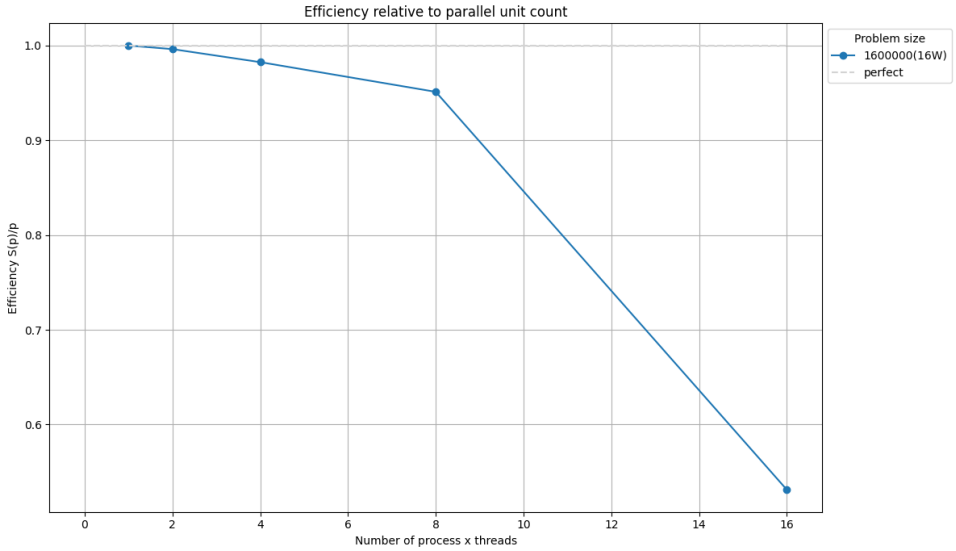
4.1 Efektywność równoległego przetwarzania

Dla modelu hybrydowego zastosowaliśmy ilość punktów 100000 (W) oraz 1600000 (16W), ponieważ wykresy bardzo na siebie nachodziły na jednym wykresie. Analiza wykresu efektywności (Rysunek 4.1 oraz Rysunek 4.2) pokazuje znacznie lepsze właściwości skalowania modelu hybrydowego w porównaniu do czystego MPI oraz OpenMP:



Rysunek 4.1: Efektywność Hybrid MPI+OpenMP (W)

- Efektywność rozpoczyna się od wartości bliskiej 1.0 (100%) dla małej liczby jednostek równoległych
- Dla obydwu rozmiarów problemów wykazują bardzo podobne zachowanie skalowania
- Do 8 jednostek równoległych efektywność utrzymuje się na poziomie około 95-97%
- Znaczący spadek efektywności następuje dopiero po przekroczeniu 8 jednostek równoległych
- Dla 16 jednostek równoległych efektywność spada do około 53-54% dla obu rozmiarów



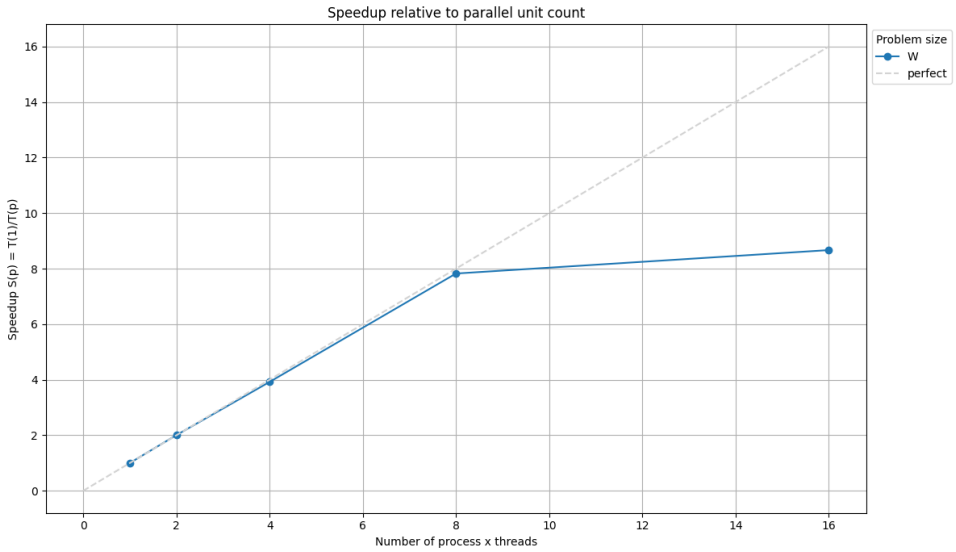
Rysunek 4.2: Efektywność Hybrid MPI+OpenMP (16W)

- Krzywe obydwu rozmiarów problemów są praktycznie identyczne, co wskazuje na bardzo dobrą skalowalność niezależną od rozmiaru problemu

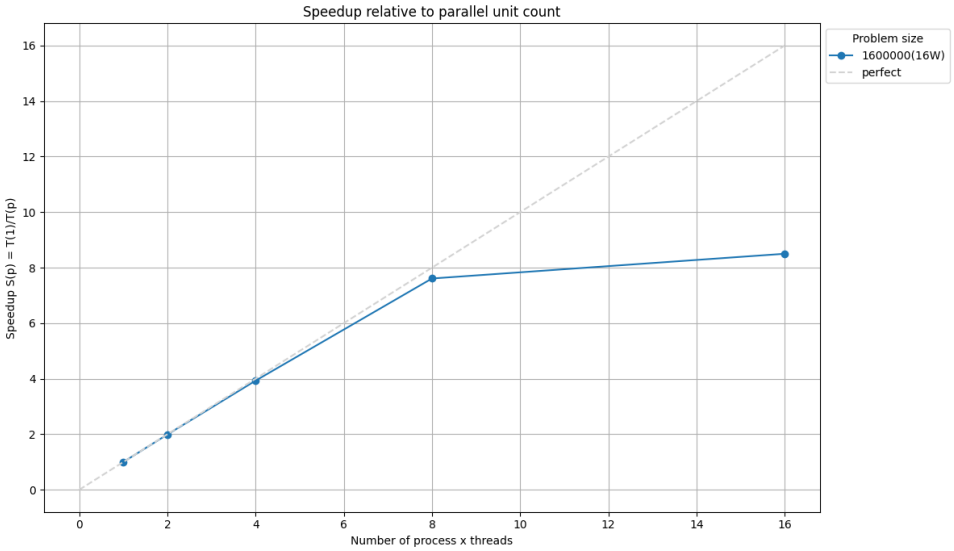
Model hybrydowy wykazuje znacznie lepszą efektywność niż czysty MPI dzięki kombinacji komunikacji między procesami (MPI) z równoległością wątków w obrębie procesu (OpenMP). Pozwala to na zmniejszenie liczby kosztownych komunikacji międzyprocesowych.

4.2 Przyśpieszenie obliczeń

Wykres przyśpieszenia (Rysunek 4.3 oraz Rysunek 4.4) demonstruje doskonałe właściwości skalowania modelu hybrydowego:



Rysunek 4.3: Przyśpieszenie Hybrid MPI+OpenMP



Rysunek 4.4: Przyśpieszenie Hybrid MPI+OpenMP (16W)

- Obydwa rozmiary problemów wykazują niemal identyczne krzywe przyśpieszenia
- Przyśpieszenie rośnie liniowo do około 8 jednostek równoległych, osiągając wartość około 7.8x
- Dalszy wzrost jest wolniejszy, ale kontynuowany - dla 16 jednostek osiąga się około 8.5x przyśpieszenia
- Brak wyraźnego plateau czy spadku wydajności, charakterystycznego dla czystego MPI
- Krzywa przyśpieszenia jest znacznie bliższa idealnej linii skalowania niż w przypadku OpenMP czy MPI
- Niezależność od rozmiaru problemu wskazuje na dobrą skalowalność

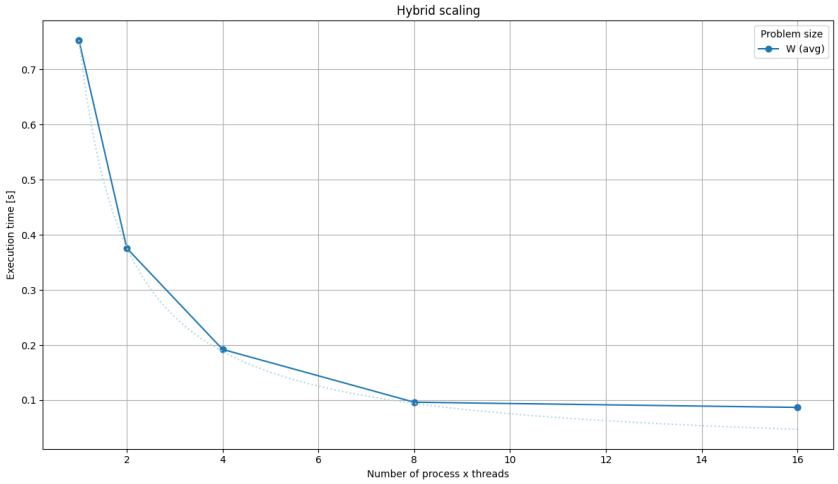
Model hybrydowy osiąga najlepsze przyśpieszenie spośród wszystkich testowanych podejść, łącząc zalety obu technologii i minimalizując ich wady.

4.3 Czas wykonania

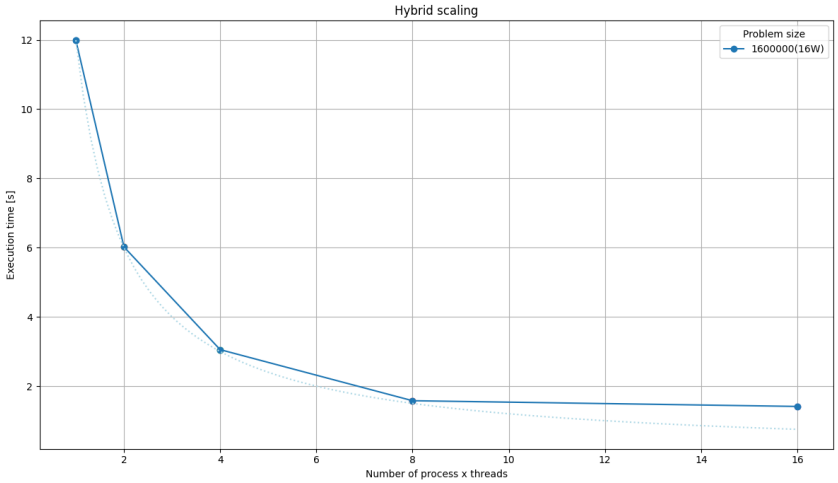
Wykres czasu wykonania (Rysunek 4.5 oraz Rysunek 4.6) potwierdza skuteczność modelu hybrydowego dla wszystkich rozmiarów problemów:

- **Problem W**: Krótszy czas (około 0.75s dla 1 jednostki), spadek do około 0.09s przy pełnej równoległości
- **Problem 16W**: Naturalnie dłuższy czas wykonania od W (około 12.0s dla 1 jednostki), konsekwentny spadek do około 1.4s przy 16 jednostkach równoległych

Charakterystyczną cechą modelu hybrydowego jest brak wyraźnego optimum - czas wykonania konsekwentnie spada wraz ze wzrostem liczby jednostek równoległych. Wszystkie rozmiary problemów wykazują podobne względne przyśpieszenie, co potwierdza doskonałą skalowalność tej architektury.



Rysunek 4.5: Czas wykonania Hybrid MPI+OpenMP (W)



Rysunek 4.6: Czas wykonania Hybrid MPI+OpenMP (16W)

Rozdział 5

Porównanie

Bezpośrednie porównanie trzech technologii równoległego przetwarzania dla największego testowanego problemu (16W) ujawnia wyraźne różnice w charakterystykach wydajnościowych każdego podejścia.

5.1 Analiza efektywności

Wykres porównania efektywności (Rysunek 5.1) pokazuje hierarchię wydajności analizowanych technologii:

Rysunek 5.1: Porównanie efektywności dla problemu 16W

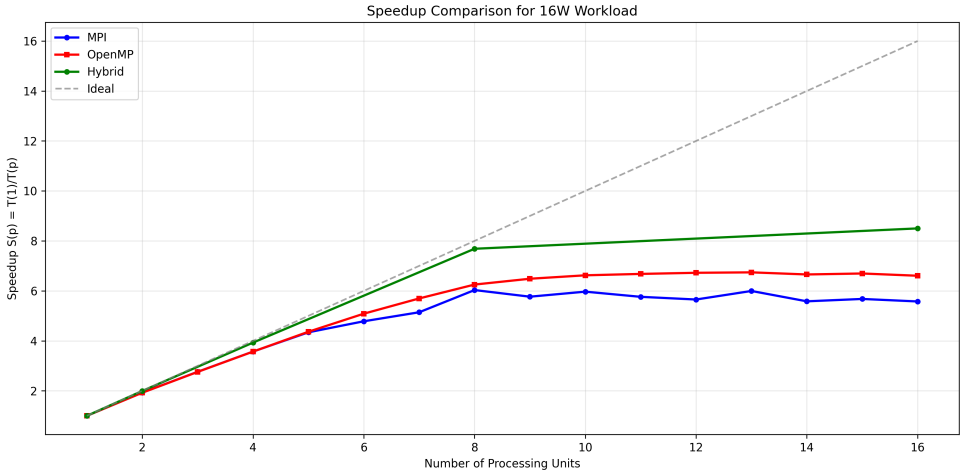
Model hybrydowy wykazuje zdecydowanie najlepszą efektywność w całym zakresie testowanych jednostek przetwarzania. Utrzymuje efektywność powyżej 95% do 8 jednostek, a nawet przy 16 jednostkach osiąga około 53% efektywności.

OpenMP zajmuje pozycję pośrednią, rozpoczynając od doskonałej efektywności, ale wykazując stopniowy spadek. Przy 8 jednostkach osiąga około 78% efektywności, a przy 16 jednostkach spada do około 41%.

MPI wykazuje najgorsze właściwości skalowania z dramatycznym spadkiem efektywności już po 4 procesach. Przy 8 procesach efektywność wynosi tylko około 75%, a przy 16 procesach spada do zaledwie 35%.

5.2 Analiza przyśpieszenia

Porównanie przyśpieszenia (Rysunek 5.2) potwierdza przewagę modelu hybrydowego:



Rysunek 5.2: Porównanie przyśpieszenia dla problemu 16W

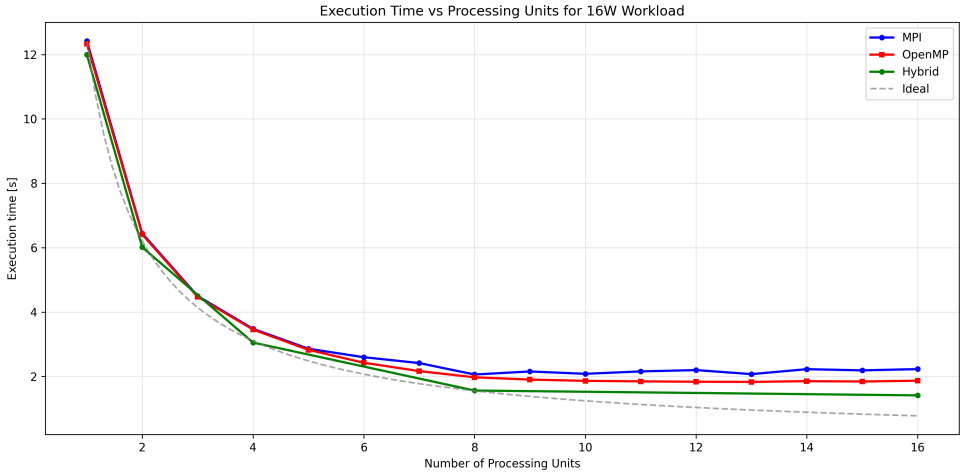
Model hybrydowy osiąga najlepsze wyniki z konsekwentnie rosnącym przyśpieszeniem, które osiąga wartość około 8.5x przy 16 jednostkach. Krzywa wykazuje najbardziej liniowy charakter, zbliżony do idealnej skalowalności.

OpenMP osiąga maksymalne przyśpieszenie około 6.5x przy 8-12 wątkach, po czym stabilizuje się na tym poziomie. Plateau wskazuje na osiągnięcie granicy wydajności architektury.

MPI wykazuje najgorsze przyśpieszenie z wyraźnym maksimum około 6x przy 8 procesach, po czym następuje stagnacja lub nawet lekki spadek wydajności.

5.3 Analiza czasu wykonania

Wykres czasu wykonania (Rysunek 5.3) przedstawia praktyczne implikacje różnic w wydajności:



Rysunek 5.3: Porównanie czasu wykonania dla problemu 16W

Wszystkie technologie rozpoczynają od podobnego czasu wykonania sekwencyjnego (około 12.3s), ale różnią się znacząco w zakresie redukcji czasu:

Model hybrydowy osiąga najkrótszy czas wykonania przy maksymalnej równoległości (około 1.4s przy 16 jednostkach), wykazując konsekwentny spadek bez plateau.

OpenMP osiąga czas około 1.8s przy optymalnej konfiguracji (8-12 wątków), z niewielkimi korzyściami z dalszego zwiększania liczby wątków.

MPI stabilizuje się na poziomie około 2.2s przy 8-10 procesach, wykazując wyraźne optimum i brak korzyści z większej liczby procesów.

5.4 Wnioski

Analiza porównawcza jednoznacznie wskazuje na przewagę **modelu hybrydowego MPI+OpenMP**, który łączy zalety obu technologii:

- Najlepsza efektywność i skalowalność w całym zakresie jednostek przetwarzania
- Brak wyraźnego plateau wydajności charakterystycznego dla innych podejść
- Konsekwentne skracanie czasu wykonania wraz ze wzrostem równoległości

OpenMP stanowi dobre rozwiązanie dla systemów wielordzeniowych z współdzieloną pamięcią, oferując prostotę implementacji przy zadowalającej wydajności.

MPI wykazuje największe ograniczenia skalowalności ze względu na koszty komunikacji, ale pozostaje niezbędny dla systemów rozproszonych i klastrów obliczeniowych.