Rozwiązanie zadania komiwojażera przy pomocy algorytmu genetycznego. 1) Wersja sekwencyjna i zrównoleglona (pamięć wspólna).

Onaszkiewicz Przemysław, Gadawski Łukasz

31 stycznia 2016

1 Cel zadania

Celem pierwszego etapu projektu jest implementacja wersji sekwencyjnej algorytmu genetycznego działającego na pojedynczym procesorze do rozwiązywania problemu komiwojażera. A także zastosowanie dyrektyw *OpenMP* w celu dokonania zrównoleglenia wykonania algorytmu na wielu procesorach z pamięcią wspólną.

2 Problem komiwojażera

Problem zdefiniowany jest następująco: mając listę miast oraz odległości między nimi, znajdź najkrótszą, dozwoloną drogę (początkiem oraz końcem drogi jest ten sam wierzchołek), zawierającą każde miasto dokładnie raz. Przy czym można zacząć od dowolnego miasta oraz kolejność miast jest dowolna. Inaczej problem polega na znalezieniu minimalnego cyklu Hamiltona w pełnym grafie ważonym. Problem należy do zbioru problemów NP-trudnych.

3 Algorytm genetyczny

W 1975 roku przez Johna Hollanda został wynaleziony algorytm genetyczny, którego zadaniem było działanie analogiczne do procesu ewolucji na ziemi. Pseudokod prostego algorytmu genetycznego (ang. *Simple Genetic Algorithm*) został przedstawiony w pseudokodzie *Algotithm 1.*

Sterowanie algorytmem genetycznym odbywa się poprzez warunek stopu, którym może być satysfakcjonująca wartość funkcji celu lub ilość generacji. Typowy algorytm genetyczny rozpoczyna się inicjacją populacji wstępnej. W przypadku problemu komiwojażera **populacją** będzie lista osobników, natomiast każdy **osobnik** będzie konkretną listą miast, czyli jednym ze stanów z całej przestrzeni stanów. W przypadku problemu komiwojażera przestrzenią stanów jest zbiór wszystkich możliwych kombinacji dróg pomiędzy miastami. Następnie dokonywana jest ocena wartości każdego osobnika w populacji. W naszym

Algorithm 1 Simple Genetic Algorithm

```
1: procedure SIMPLE GENETIC ALGORITHM
2:     t ← 0
3:     initilize P^t
4:     evaluate P^t
5: while (not stop_condition):
6:     O^t ← reproduce P^t
7:     crossover O^t
8:     mutate O^t
9:     evaluate O^t
10:    P^{t+1} ← O^t
11:    t ← t + 1
```

przypadku będzie to obliczenie drogi każdego z zainicjowanych stanów. Kolejno następuje *reprodukcja* populacji, która zostanie opisana dokładniej w kolejnym punkcie. Następnie wykonywane są operacje krzyżowania oraz mutacji, czyli "urozmaicanie" aktualnej populacji, a w dalszej części wytypowanie populacji, która będzie stanowiła listę najlepszych osobników do reprodukcji w kolejnej generacji.

3.1 Reprodukcja

Reprodukacja polega na wytypowaniu osobników do populacji potomnych, ale tak aby preferować osobniki lepiej przystosowane, czyli posiadające lepszą wartość funkcji przystosowania. Ocena jakości osobników dokonywana jest na podstawie funkcji przystosowania. W przypadku problemu komiwojażera mniejsza droga jest lepszym rezultatem, a zatem dąży się do minimalizacji drogi, którą reprezentuje każdy osobnik. Podczas reprodukcji następuje losowy wybór osobników do populacji potomnej, ale prawdopodobieństwo wylosowania każdego z nich nie jest jednakowe. W przypadku osobników lepiej przystosowanych występuje większe prawdopodobieństwo. Wartość prawdopodobieństwa obliczana jest zgodnie z następującym wzorem:

$p_i = \frac{len\_sum - len_i}{\sum_i^I (len\_sum - x_i)}$, gdzie

len_sum - suma długości wszystkich osobników w populacji,

len_i - długość i-tego osobnika, dla którego jest liczone prawdopodobieństwo,

Następnie mając prawdopodobieństwa osobników w populacji następuje obliczenie dystrybuanty prawdopodobieństwa. Podczas losowania osobników następuje losowanie liczby z przedziału $(0.00, 1.00)$, a następnie wybranie osobnika, który odpowiada danej wartości dystrybuanty. Taki dobór nazywany jest selekcją ruletkową (ang. *round-wheel selection*).

3.2 Mutacja

Operacja mutacji wykonywana jest z określoną wartością prawdopodobieństwa, która jest parametrem algorytmu. Zgodnie z prawdopodobieństwem podejmowana jest decyzja o zmutowania konkretnego osobnika. Proces polega na losowej zamianie pozycji dwóch miast w początkowej liście miast. Dzięki temu zostaje wprowadzone całkowicie losowe zróżnicowanie dwóch osobników. Przeważnie

wartość tego parametru ustawiona jest na niską wartość, tak aby wprowadzać różnorodność w każdym pokoleniu, ale aby również nie zakłócać polepszania wartości funkcji dostosowania w pokoleniu.

3.3 Krzyżowanie

Operacja krzyżowania również ma na celu wprowadzenie różnorodności w osobnikach w kolejnych pokoleniach. Jest wykonywana z określoną wartością prawdopodobieństwa, która jest parametrem algorytmu. Wszystkie osobniki w populacji są dobierane w pary. Następnie dla każdej z pary zgodnie z parametrem jest podejmowana decyzja o dokonaniu operacji krzyżowania. W dalszej kolejności losowane zostają indeksy krzyżowania. Elementy osobników pomiędzy tymi indeksami zostają zamienione między osobnikami. A elementy osobników znajdujące się poza indeksami zostają przepisane począwszy od wylosowanego indeksu. Geny(miasta), które już znajdują się w osobniku są pomijane. T gwarantuje że osobnik po krzużowaniu będzie osobnikiem prawidłowym (każge miasto będzie odwiedzone tylko raz).

4 Implementacja

4.1 Tworzenie mapy miast

W naszej implementacji mapa została odwzorowana jako obiekt posiadający wielkość, zbiór miast oraz strukturę danych *mapa* gdzie kluczem jest para miasto-miasto oraz odległość między taką na mapie.

4.1.1 Wczytanie z pliku

Mapę odległości między miastami można odczytać z pliku tekstowego o strukturze przedstawionej poniżej. W pierwszej linii pliku znajdują się wierzchołki grafu oddzielone tabulatorami. W kolejnych liniach znajdują się krawędzie grafu(po jednej krawędzi na linię) w postacie wierzchołek - wierzchołek - wartość. Separatorem w pliku jest tabulator. Przykład pliku przedstawiono poniżej.

```
0       1       2       3
0       1       100
0       2       10
0       3       10
1       2       20
1       3       70
2       3       50
```

4.1.2 Losowa generacja mapy

Możliwa jest losowa generacja mapy poprzez wywołanie metody :

```
shared_ptr<Map> Map::ConstructMapOfSize(int mapSize,
                int lowestPossibleDistance = 0, int highestPossibleDistance = 200)
```

Podana metoda konstruuje mapę miast o zadanej wielkości, która jest grafem pełnym. Krawędzie grafu które są odległościami między miastami mają losowe

wartości pomiędzy wartościami zadanymi w parametrach *lowestPossibleDistance i highestPossibleDistance*.

4.2 Konfiguracja programu

Konfiguracja programu jest możliwa przy pomocy pliku *app.properties*. Umożliwia on zdefiniowanie następujących parametrów:

- **population_size** - wielkość populacji w każdej iteracji algorytmu,
- **propability_of_crossover** - prawdopodobieństwo krzyżowania,
- **propability_of_mutation** - prawdopodobieństwo mutacji,
- **generation_number** - liczba pokoleń, czyli iteracji algorytmu, w przypadku naszej implementacji jest to warunek stopu.

Przykładowa zawartość pliku konfiguracyjnego została zamieszczona poniżej.

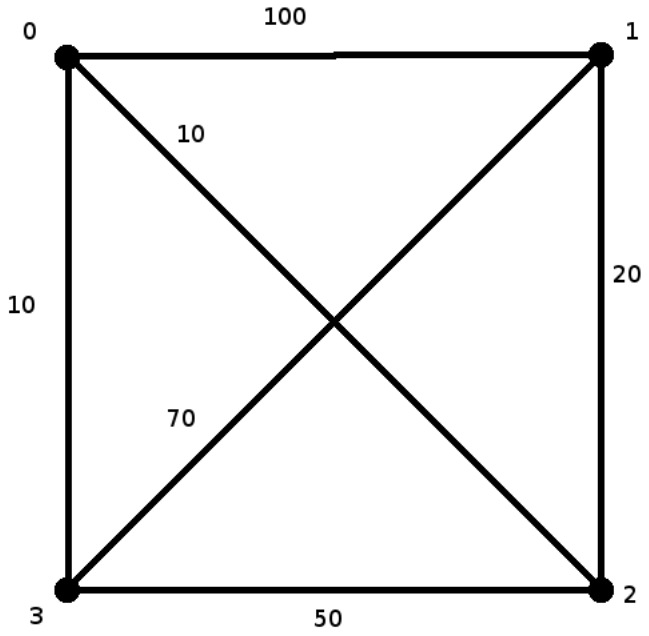
```
population_size=5
propability_of_crossover=0.20
propability_of_mutation=0.01
generation_number=3
```

5 Testy OpenMP

Przeprowadzono testy z działania programu. Dzielą się one na dwie części. Pierwszą z nich jest Sprawdzenie poprawności algorytmu na niewielkich grafach. Kolejną jest przetestowanie efektywności zrównoleglenia algorytmu.

5.1 Testy poprawności

Jako dane wejściowe sprawdzające poprawność działania algorytmu wykorzystano dwa, małe, tendencyjnie stworzone grafy, w których można z łatwością dokonać weryfikacji działania algorytmu.Schematy podanych grafów przedstawiono poniżej.

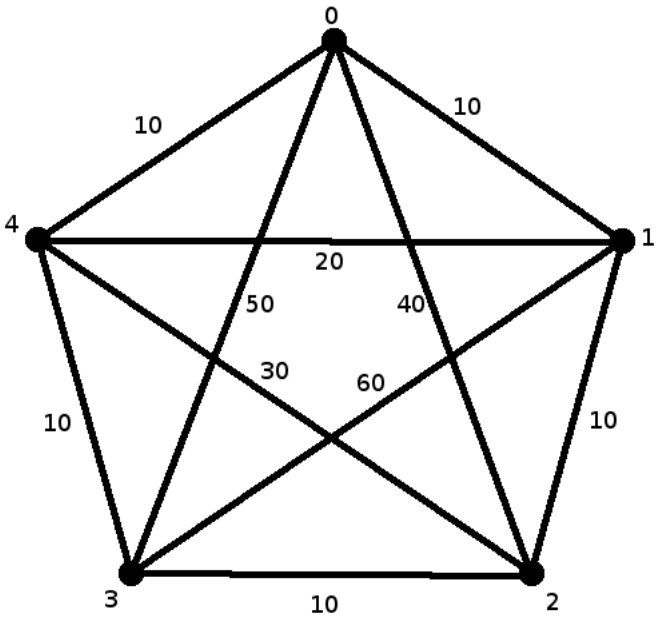


Rysunek 1: Graf wejściowy zawierający 4 wierzchołki

Po przetworzeniu pliku wejściowego zawierającego graf 1 Algorytm wyznaczył najkrótszą ścieżkę o wartości 110. Należy pamiętać że ostatnim odcinkiem pokonywanym przez kuriera jest droga z ostatniego odwiedzonego miasta do miasta z którego wyruszył. W tym przypadku jest to krawędź pomiędzy wierzchołkami 1 i 3 o wartości 70. Najważniejsze fragmenty pliku wejściowego zostały przedstawione poniżej.

```
POPULATION SIZE: 30

map size: 4
nodes:0 1 2 3
m[first city: 0 sec city: 1] = 100
m[first city: 0 sec city: 2] = 10
m[first city: 0 sec city: 3] = 10
m[first city: 1 sec city: 2] = 20
m[first city: 1 sec city: 3] = 70
m[first city: 2 sec city: 3] = 50


Initial population initialization time: 7154 microseconds

START reproduce
```

```
START reproduce
0 'st generation production time: 22464 microseconds

START reproduce
1 'st generation production time: 14053 microseconds

START reproduce
2 'st generation production time: 9021 microseconds

START reproduce
3 'st generation production time: 362 microseconds

START reproduce
4 'st generation production time: 339 microseconds

START reproduce
5 'st generation production time: 357 microseconds

whole loop time 46596

 END: 3->0->2->1

PAth LEN: 110
```



Rysunek 2: Graf wejściowy zawierający 5 wierzchołków

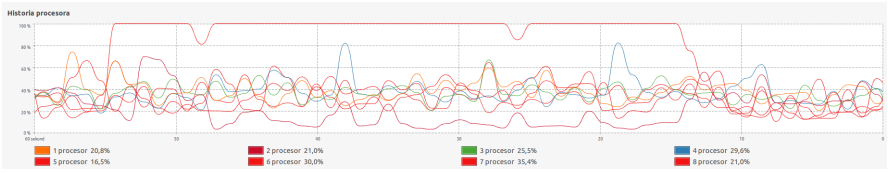
Po przetworzeniu pliku z grafem wejściowym przedstawionego na rysunku 2 program wyznaczył ścieżkę o wartości 50. Najważniejsze fragmenty pliku wejściowego zostały przedstawione poniżej.

```
map size: 5
nodes:0 1 2 3 4
m[first city: 0 sec city: 1] = 10
m[first city: 0 sec city: 2] = 40
m[first city: 0 sec city: 3] = 50
m[first city: 0 sec city: 4] = 10
m[first city: 1 sec city: 2] = 10
m[first city: 1 sec city: 3] = 60
m[first city: 1 sec city: 4] = 20
m[first city: 2 sec city: 3] = 10
m[first city: 2 sec city: 4] = 30
m[first city: 3 sec city: 4] = 10


Initial population initialization time: 8892 microseconds

START reproduce
```

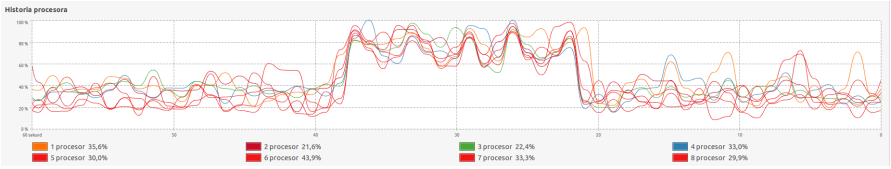
```
START reproduce
0 'st generation production time: 14998 microseconds

START reproduce
1 'st generation production time: 14012 microseconds

START reproduce
2 'st generation production time: 14433 microseconds

START reproduce
3 'st generation production time: 11731 microseconds

START reproduce
4 'st generation production time: 12254 microseconds

START reproduce
5 'st generation production time: 18946 microseconds

whole loop time 86374

END: 4->0->1->2->3

PAth LEN: 50
```

5.2 Testy efektywności zrównoleglenia

Kolejnym etapem testów było przetestowanie efektywności zrównoleglenia kodu. Wykorzystanie poszczególnych rdzeni procesora zostało przedstawione na rysunkach poniżej. Jeden z nich przedstawia wykonanie szeregowe programu, drugi zaś wykonanie zrównoleglone.



Rysunek 3: Diagram przedstawiający zużycie wątków przy wykonaniu sekwencyjnym



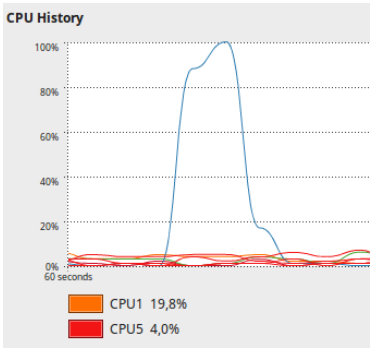
Rysunek 4: Diagram przedstawiający zużycie wątków przy wykonaniu zrównoleglonym

5.3 Wyniki testów

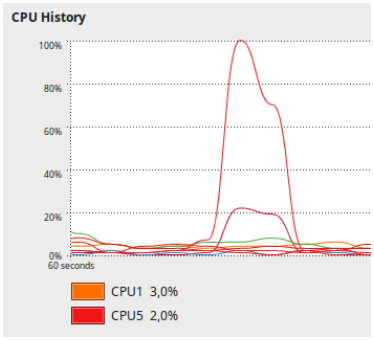
W poniższej tabeli przedstawiono wyniki testów. dla kilku wykonań z różną ilością wątków, różną ilością miast i wielkością populacji.

LICZBA WĄTKÓW	LICZBA MIAST	WIELKOŚĆ POPULACJI	LICZBA POKOLEŃ	CZAS WYKON.	RYS
1	100	50	10	1685526	5a
2	100	50	10	1411701	5b
4	100	50	10	1373483	5c
8	100	50	10	1360702	5d
1	500	50	10	73504041	6a
2	500	50	10	41945947	6b
4	500	50	10	27070634	6c
8	500	50	10	25775216	6d
1	100	100	10	4020926	7a
2	100	100	10	3303909	7b
4	100	100	10	3131004	7c
8	100	100	10	3179381	7d
1	500	100	10	145557350	8a
2	500	100	10	85992390	8b
4	500	100	10	71970985	8c
8	500	100	10	54755121	8d

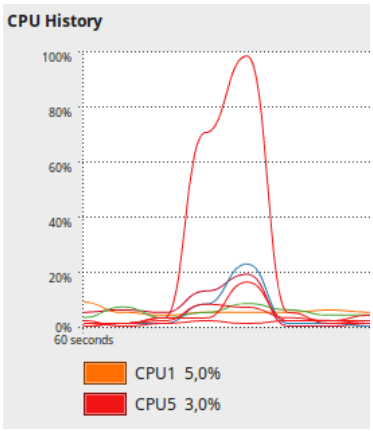
Tabela 1: Tabela przedstawiająca wyniki czasowe w zależności od liczby miast, rozmiaru populacji i ilości wątków



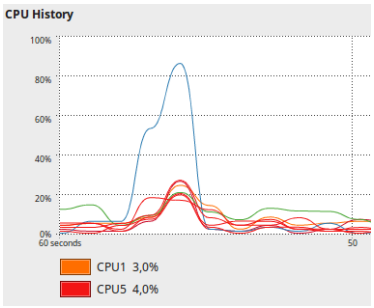
(a) Jeden wątek



(b) Dwa wątki



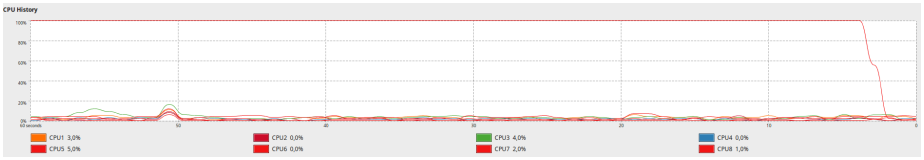
(c) Cztery wątki



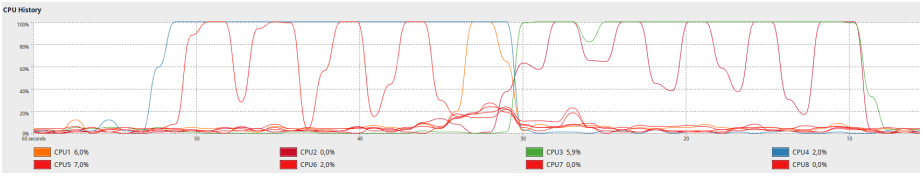
(d) Osiem wątków

Rysunek 5: Fragmenty schematu ilustrującego zużycie rdzeni procesora przy użyciu (5a) 1 wątku, (5b) 2 wątków, (5c) 4 wątków, (5d) 8 wątków przy 50 miastach i wielkości populacji równej 100(pierwsze 4 wiersze tabeli)

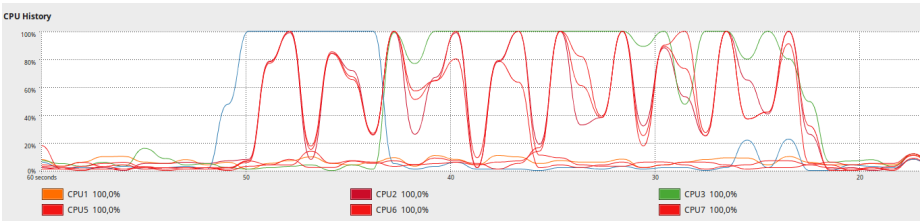
.



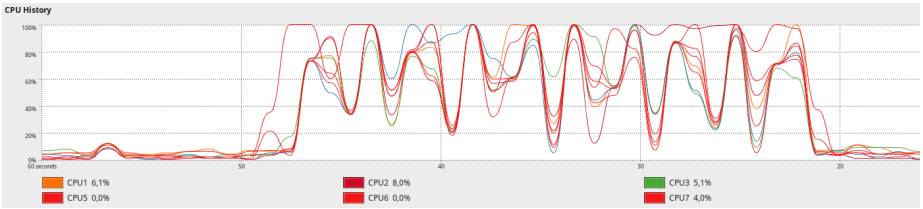
(a) Jeden wątek



(b) Dwa wątki



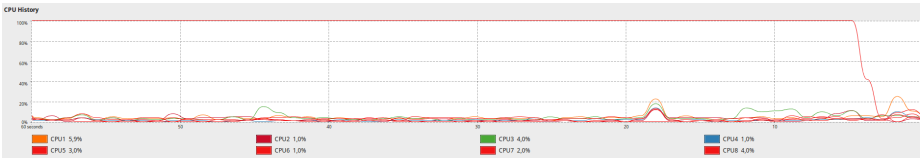
(c) Cztery wątki



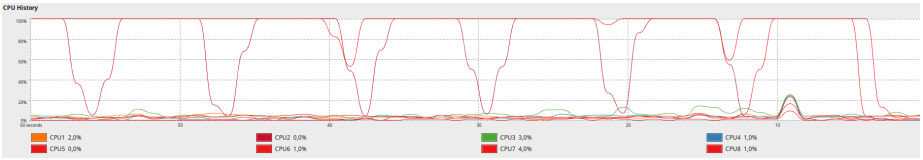
(d) Osiem wątków

Rysunek 6: Fragmenty schematu ilustrującego zużycie rdzeni procesora przy użyciu (6a) 1 wątku, (6b) 2 wątków, (6c) 4 wątków, (6d) 8 wątków przy 500 miastach i wielkości populacji równej 50(drugie 4 wiersze tabeli)

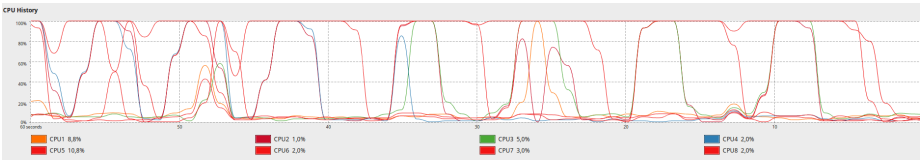
.



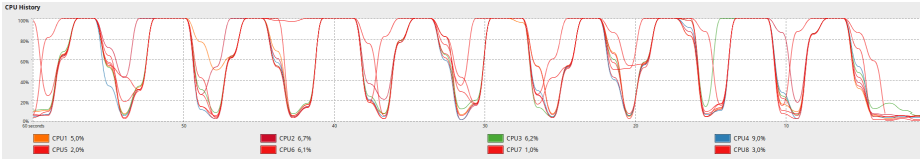
(a) Jeden wątek



(b) Dwa wątki



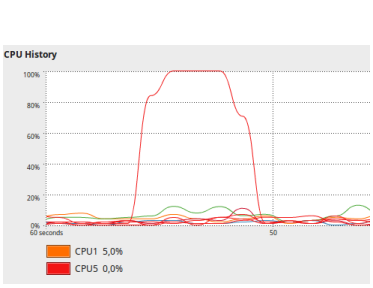
(c) Cztery wątki



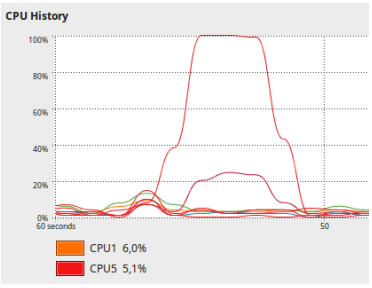
(d) Osiem wątków

Rysunek 7: Fragmenty schematu ilustrującego zużycie rdzeni procesora przy użyciu (7a) 1 wątku, (7b) 2 wątków, (7c) 4 wątków, (7d) 8 wątków przy 100 miastach i wielkości populacji równej 100(trzecie 4 wiersze tabeli)

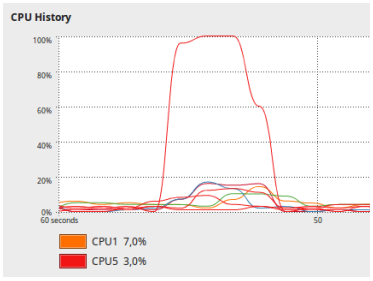
.



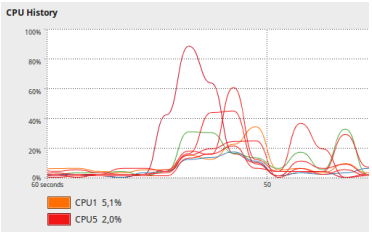
(a) Jeden wątek



(b) Dwa wątki



(c) Cztery wątki



(d) Osiem wątków

Rysunek 8: Fragmenty schematu ilustrującego zużycie rdzeni procesora przy użyciu (8a) 1 wątku, (8b) 2 wątków, (8c) 4 wątków, (8d) 8 wątków przy 500 miastach i wielkości populacji równej 100 (czwarte 4 wiersze tabeli)

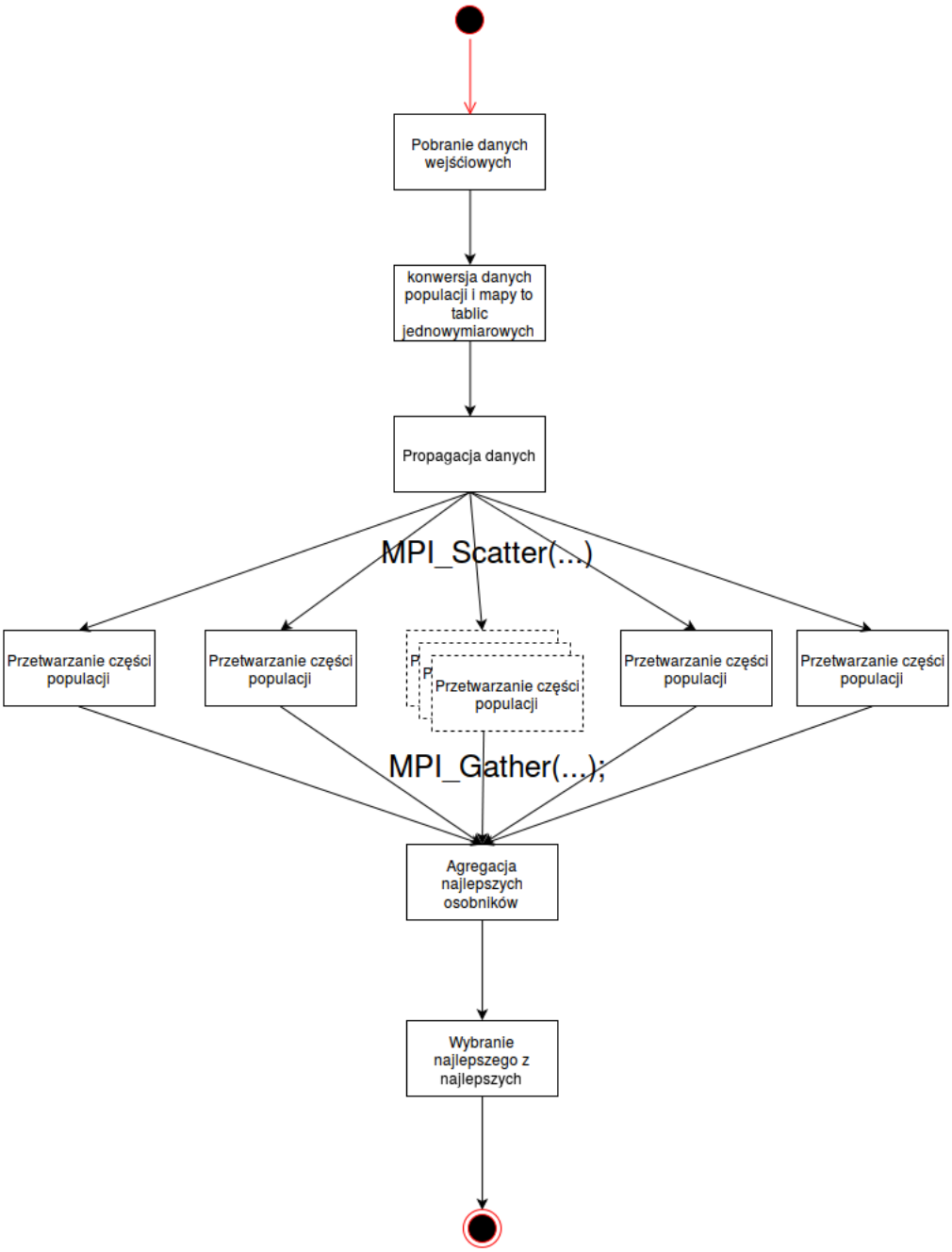
.

6 MPI. Implementacja OpenMPI

OpenMPI jest narzędziem które wspiera przesyłanie danych w formacie C. Czyli tablic danych określonego typu. Dodatkowo tablice muszą być jednowymiarowe. Kod programu napisany został w języku C++ zgodnie z obiektowym paradygmatem programowania, więc, aby uniknąć przepisywania całości kodu na programowanie strukturalne postanowiliśmy w OpenMPI zastosować zrównoleglenie dziedziny problemu.

6.1 MPI. Zrównoleglenie dziedziny problemu

W algorytmie genetycznym zostaje na podstawie mapy tworzona populacja osobników. W celu zrównoleglenia postanowiliśmy dzielić populacje na kilka mniejszych, a następnie każdą z nich podawać na wejście algorytmu. Po zakończeniu algorytmu najlepsze osobniki które powstały w wyniku realizacji każdego procesu są agregowane. Powstaje lista najlepszych osobników a następnie jest wybierany najlepszy z nich. Schemat zrównoleglenia jest przedstawiony na rysunku.



Rysunek 9: Rysunek obrazujący sposób zrównoleglenia za pomocą MPI

6.2 MPI. Konwersja danych do tablic jednowymiarowych

Do przesłania danych za pośrednictwem MPI nadają się:

- typy proste

- jednowymiarowe tablice
- struktury danych składające się z typów prostych

Z tego powodu zespół zdecydował się na zaimplementowanie konwersji niektórych obiektów obiektów na typt proste. Były to między innymi:

- Population $\leftrightarrow$ int*
- Individual $\leftrightarrow$ int*
- Map $\leftrightarrow$ int*
- City $\leftrightarrow$ int

Konwersja w stronę C odbyła się poprzez dodanie do klasy GeneticAlgorithm metod przyjmujących jako argumenty obiekty, a zwracających wskaźniki do zaalokowanych tablic.

Konwersja w stronę C++ odbyła się poprzez dodanie konstruktorów do odpowiednich obiektów, które jako argument przyjmują przede wszystkim wskaźnik na tablicę przechowującą reprezentację obiektu.

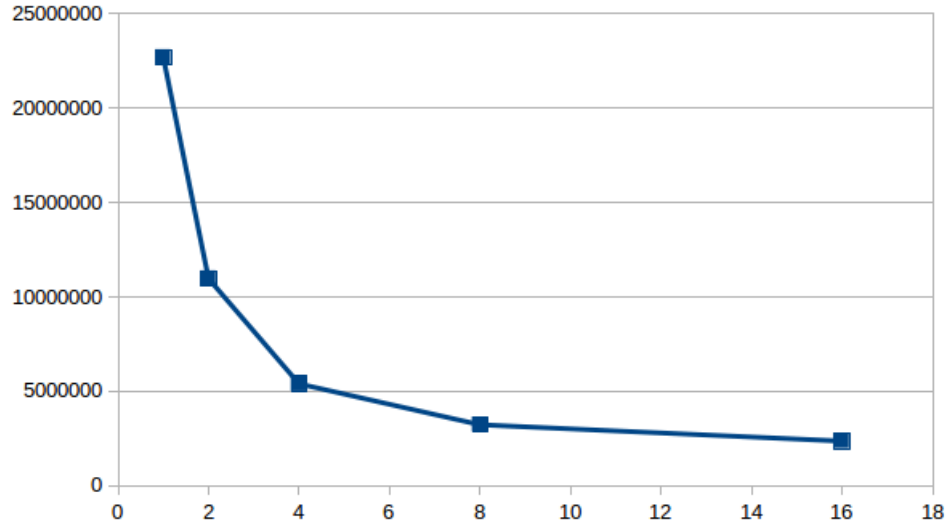
7 MPI. Testy

Testy zostały przeprowadzone na maszynie posiadającej 4 rdzeniowy procesor(2 wątki na rdzeń) Opis danych testowych:

- Graf
  - liczba miast 100
  - wagi krawędzi w zakresie $< 1, 100 >$
- wielkość populacji - 400
- liczba iteracji algorytmu - 15

7.1 MPI. Testy efektywności zrównoleglenia

Udało się zrównoleglić czas przetwarzania algorytmu. Wyniki przedstawiono na poniższym diagranmie.



Rysunek 10: Wykres obrazujący Zależność czasu wykonania algorytmu od liczby wątków

Współczynnik zrównoleglenia między wykonaniem sekwencyjnym a wykonaniem na 8 procesach wynosi: *7,0211.*

7.2 MPI. Testy poprawności

Wyniki przeprowadzone na podstawie Małych grafów (4 i 5 wierzchołkowych) pozwalają stwierdzić poprawność algorytmu. Jednak przy większych rozwiązaniach Wyniki działania algorytmu na tym samym grafie nie zawsze dają te same rezultaty. Na przykład 10 iteracji dla 4 wątków i grafu opisanego w sekcji 7 otrzymano następujące wyniki:

Iteracja	LICZBA WĄTKÓW	Najlepsza znaleziona krawędź
1	4	4443
2	4	4303
3	4	4243
4	4	4412
5	4	4401
6	4	4308
7	4	4326
8	4	4223
9	4	4634
10	4	4446
	Odchylenie standardowe	114,62

Tabela 2: Tabela przedstawiająca wyniki działania algorytmu dla dziesięciu kolejnych iteracji dla grafu testowego

Wyjaśnienie takiego zachowania jest oczywiste, ponieważ algorytm jako jedyne kryterium końca przyjmuje ilość pokoleń, to w zależności od osobników jakie dostał na wejście potrafi zbiegać do określonego rozwiązania, ale nie zawsze uda mu się zbiec do tego samego.

8 Wnioski

W celu zbadania najbardziej pracochłonnych części programu dokonano profilowania aplikacji przy użyciu programu *callgrid*. Operacją, która trwa najdłużej jest krzyżowanie osobników. Dyrektywy *OpenMP* w celu zrównoleglenia pętli zostały dodane w następujących miejscach:

- operacja krzyżowania,
- operacja mutacji,
- obliczanie funkcji przystosowania dla osobników populacji,
- obliczanie prawdopodobieństwa osobnika do mechanizmu selekcji ruletkowej,
- konstruktor populacji - następuje w tym miejscu inicjalne tworzenie listy osobników na podstawie mapy miast na początku działania algorytmu.

Zrównoleglenie algorytmu za pomozą dyrektyw OpenMP powoduje około trzykrotne zmniejszenie czasu wykonania programu. Pliki wynikowe outSequence.txt i outParallel.txt przedstawiają Wyjście algorytmu w formie sekwencyjnej i zrównoleglonej Ze względu na ich długość poniżej zostały przedstawione niewielnie, lecz najważniejsze wycinki.

```
Parallel: whole_time = 40832015 microseconds
Sequential: whole_time = 16281865 microseconds
```

Następują niewielkie wahania współczynnika przyspieszenia, ale generalnie utrzymuje się on na poziomie około 3 (trzyktotne przyspieszenie po użyciu dyrektyw OpenMP)

8.1 Wnioski z przeprowadzonych testów OpenMP

Większa ilość testów przeprowadzonych na algorytmie z różnymi parametrami znajduje się w sekcji 5.3. Wnioski wysnute na jej podstawie można przedstawić następująco.

- Zgodnie z oczekiwaniami wraz ze wzrostem ilości wątków czas wykonania programu ulega skróceniu.
- Kiedy liczba miast jest znacznie większa od wielkości populacji wyniki zrównoleglenia dają zadowalające rezultaty, za to kiedy wielkość populacji jest porównywalna z liczbą miast w danym osobniku zrównoleglenie nie odnosi wielkiego skutku
- Powodem takich wyników jest fakt że aplikacja jest zrównoleglona na poziomie populacji(czyli osobniki w populacji są przetwarzane równocześnie, ale jednocześnie każdy osobnik jest krzyżowany sekwencyjnie przez jeden wątek). Sprawia to, że im dłuższy osobnik względem rodzaju populacji tym zrównoleglenie jest efektywniejsze.
- Wraz z powiększeniem wymiaru problemu przez zwiększenie liczby miast zrównoleglenie wykonania algorytmu powoduje lepsze rezultaty, ponieważ stosunek najbardziej pracochłonnych fragmentów programu, w których zastosowano dyrektywy OpenMP w celu zrównoleglenia, do reszty programu jest większy niż w przypadku małych problemów.
- Metoda koła ruletki powoduje,że wraz ze wzrostem liczby pokoleń algorytm ewoluuje coraz wolniej (dochodzi do powolnej stagnacji).

8.2 MPI. Wnioski z przeprowadzonych testów OpenMPI

Na podstawie testów przeprowadzonych na algorytmie można stwierdzić że zrównoleglenie dziedziny w znaczny sposób wpływa na przyspieszenie pracy algorytmu. Niestety nie jest to zależność liniowa, z racji tego że różne procesy w różnym czasie przetwarzają swoje części populacji. A w momencie agregacji wyników została ustawiona bariera więc te wątki które wykonały zadanie szybciej są zmuszone do czekania na wszystkie pozostałe.

Istnieje pewna rozbieżność znajdowania najkrótszej ścieżki, ale wynika ona z ograniczenia ilości pokoleń (iteracji algorytmu). Więc algorytm zwraca najlepsze rozwiązanie jakie udało mu się znaleźć w danym czasie.

Specyfika działania algorytmu sprawia że poszczególne procesy komunikują się ze sobą stosunkowo niewiele, a co za tym idzie wpływ komunikacji na szybkość działania jest niewielki.