UNIVERZITET U BEOGRADU - ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

MULTIPROCESORKI SISTEMI (13S114MUPS, 13E114MUPS)

DOMAĆI ZADATAK 1 – OPENMP

Izveštaj o urađenom domaćem zadatku

Predmetni asistent:

doc. dr Marko Mišić

Studenti:

Bogdan Bebić 2017/0011

Uroš Krstić 2017/0228

Beograd, novembar 2020.

SADRŽAJ

1. PROBLEM 1 – RAČUNANJE BROJA Π (PI)

1.1. Tekst problema

Paralelizovati program koji izračunava vrednost broja PI korišćenjem formule:

$$\pi = 4 * \sum_{k=1}^{n} \frac{(-1)^{k+1}}{2k-1}.$$

Tačnost izračunavanja direktno zavisi od broja iteracija, a zbog malog radijusa konvergencije serija konvergira veoma sporo. Program se nalazi u datoteci **piCalc.c** u arhivi koja je priložena uz ovaj dokument. Prilikom paralelizacije nije dozvoljeno koristiti direktive za podelu posla (*worksharing* direktive), već je iteracije petlje koja se paralelizuje potrebno raspodeliti ručno. Obratiti pažnju na ispravno deklarisanje svih promenljivih prilikom paralelizacije. Program testirati sa parametrima koji su dati u datoteci **run**. [1, N]

1.2. Delovi koje treba paralelizovati

1.2.1. Diskusija

Jedino mesto u programu koje se može paralelizovati je glavna for petlja koja radi sumu faktora koji čine vrednost broja pi.

1.2.2. Način paralelizacije

Paralelizacije je rađena ručno – bez direktiva za podelu posla (*worksharing* direktiva). Ovo je urađeno podelom posla prema id-u niti, svakoj niti je dodeljen određeni chunk posla – ovo je implementacija poznatog SPMD pattern-a paralelnog programiranja. Razmatrana je i podela posla koja je cirkularna, ali ovo jedino može da unese dodatne režijske troškove oko promašaja u procesorkom kešu. U ovom prostom programu za računanje broja pi se to verovatno ne dešava – ali svakako se performanse time ne mogu poboljšati.

1.3. Rezultati

Paralelizacijom ovog programa na više hardverskih niti se dobija ubrzanje koje je prikazano na grafiku (Slika 1) – ovo ubrzanje se vidi u slučaju većeg posla.

1.3.1. Logovi izvršavanja

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti.

```
$ ./z1 1000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159165358977
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159165358973
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.003196s
Parallel elapsed time: 0.002080s
Test PASSED

$ ./z1 10000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159255358979
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159255358983
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.040515s
Parallel elapsed time: 0.009042s
```

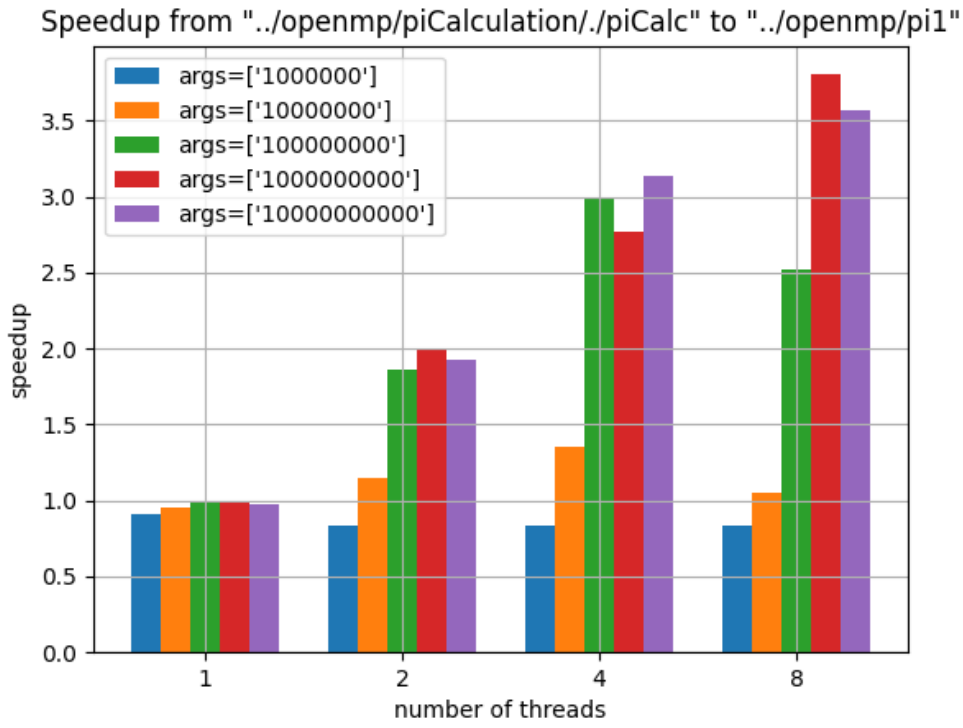
```
Test PASSED

$ ./z1 100000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 100000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159264358933
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 100000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159264358988
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.326829s
Parallel elapsed time: 0.080812s
Test PASSED

$ ./z1 1000000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265258805
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265258932
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 3.192847s
Parallel elapsed time: 0.797162s
Test PASSED

$ ./z1 10000000000
```

```
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265348835
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265348821
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 31.837818s
Parallel elapsed time: 7.959584s
Test PASSED
```

Listing 1. Logovi izvršavanja računanja pi

1.3.2. Grafici ubrzanja

U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.



Slika 1. Grafik zavisnosti ubrzanja u odnosu na broj niti za različite argumente pokretanja

1.3.3. Diskusija dobijenih rezultata

Paralelizacija na više niti je donela ubrzanje za posao koji je dovoljno veliki – ovo ubrzanje se najbolje vidi kada imamo više od 1000000 iteracije petlje. Program je embarrassingly parallel i svaka nit dobija određeni chunk iteracija za računanje. Posao svake niti je iste veličine, pa je statička raspodela najbolji način paralelizacije, jer ne unosi dodatne režijske troškove pozivanja schedule operacije. Za pokretanje na jednoj niti se vidi vrlo malo usporenje – ovo je očekivano – to usporenje je uzrokovano režijskim troškovima inicijalizacije OpenMP okruženja.

2. PROBLEM 2 – RAČUNANJE BROJA Π (PI)

2.1. Tekst problema

Paralelizovati program koji izračunava vrednost broja PI korišćenjem formule:

$$\pi = 4 * \sum_{k=1}^{n} \frac{(-1)^{k+1}}{2k-1}.$$

Tačnost izračunavanja direktno zavisi od broja iteracija, a zbog malog radijusa konvergencije serija konvergira veoma sporo. Program se nalazi u datoteci **piCalc.c** u arhivi koja je priložena uz ovaj dokument. Prilikom paralelizacije koristiti direktive za podelu posla (*worksharing* direktive). Obratiti pažnju na raspodelu opterećenja po nitima i testirati program za različite načine raspoređivanja posla. Program testirati sa parametrima koji su dati u datoteci **run**. [1, N]

2.2. Delovi koje treba paralelizovati

2.2.1. Diskusija

Jedino mesto u programu koje se može paralelizovati je glavna for petlja koja radi sumu faktora koji čine vrednost broja pi.

2.2.2. Način paralelizacije

Paralelizacije je rađena putem direktiva za podelu posla (*worksharing* direktiva). Ovo je urađeno ugrađenim konstruktom OpenMP-a (#pragma omp parallel for), svakoj niti je dodeljen određeni chunk posla – ovo je implementacija poznatog SPMD pattern-a paralelnog programiranja. Razmatrana je i dinamčka podela posla nitima, ali ovo jedino može da unese dodatne režijske troškove oko pozivanja scheduler-a.

2.3. Rezultati

Paralelizacijom ovog programa na više hardverskih niti se dobija ubrzanje koje je prikazano na grafiku (Slika 2) – ovo ubrzanje se vidi u slučaju većeg posla.

2.3.1. Logovi izvršavanja

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti.

```
$ ./z2 1000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159165358977
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159165358973
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.008275s
Parallel elapsed time: 0.005338s
Test PASSED

$ ./z2 10000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159255358979
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159255358983
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.039251s
Parallel elapsed time: 0.009018s
Test PASSED

$ ./z2 100000000
```

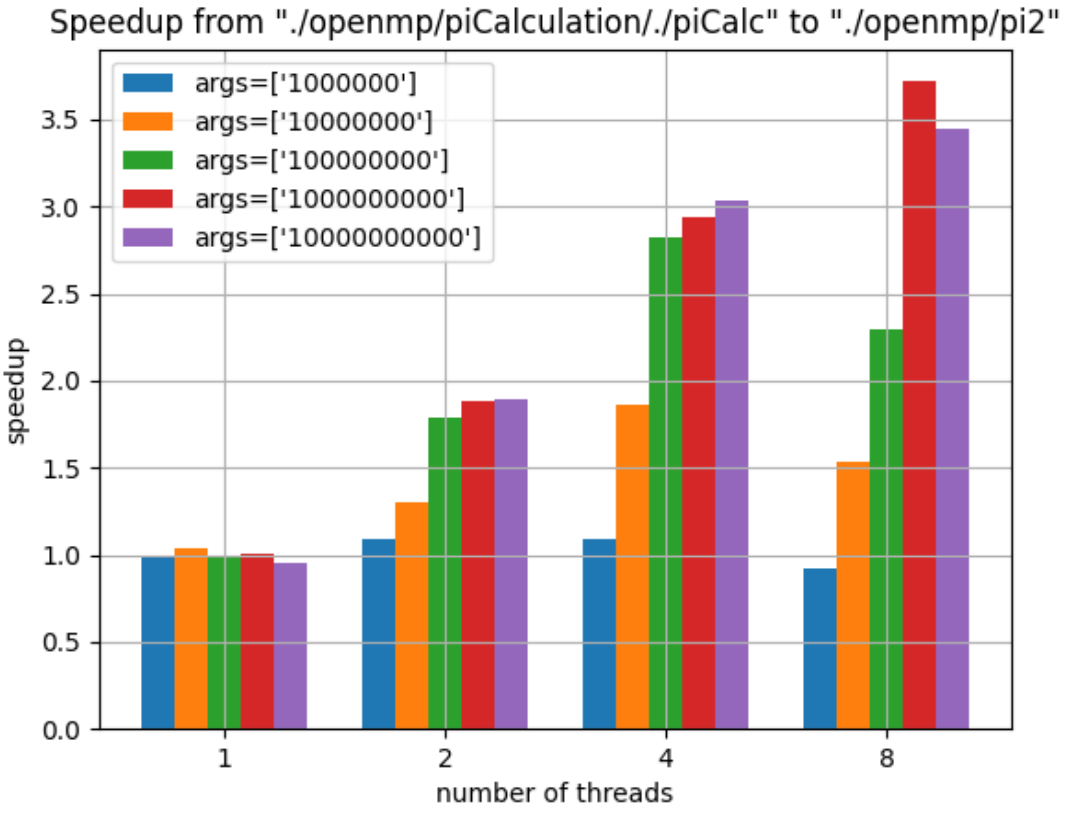
```
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 100000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159264358933
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 100000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159264358988
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.324678s
Parallel elapsed time: 0.080689s
Test PASSED

$ ./z2 1000000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265258805
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265258932
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 3.182975s
Parallel elapsed time: 0.797392s
Test PASSED

$ ./z2 10000000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
```

```
With n = 10000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265348835
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265348821
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 31.835786s
Parallel elapsed time: 7.961063s
Test PASSED
```

Listing 2. Logovi izvršavanja računanja pi

2.3.2. Grafici ubrzanja

U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.



Slika 2. Grafik zavisnosti ubrzanja u odnosu na broj niti za različite argumente pokretanja

2.3.3. Diskusija dobijenih rezultata

Paralelizacija na više niti je donela ubrzanje za posao koji je dovoljno veliki – ovo ubrzanje se najbolje vidi kada imamo više od 1000000 iteracije petlje. Program je embarrassingly parallel i svaka nit dobija određeni chunk iteracija za računanje. Posao svake niti je iste veličine, pa je statička raspodela najbolji način paralelizacije, jer ne unosi dodatne režijske troškove pozivanja schedule operacije. Za pokretanje na jednoj niti se vidi vrlo malo usporenje – ovo je očekivano – to usporenje je uzrokovano režijskim troškovima inicijalizacije OpenMP okruženja.

3. PROBLEM 3 – RAČUNANJE BROJA Π (PI)

3.1. Tekst problema

Paralelizovati program koji izračunava vrednost broja PI korišćenjem formule:

$$\pi = 4 * \sum_{k=1}^{n} \frac{(-1)^{k+1}}{2k-1}.$$

Tačnost izračunavanja direktno zavisi od broja iteracija, a zbog malog radijusa konvergencije serija konvergira veoma sporo. Program se nalazi u datoteci **piCalc.c** u arhivi koja je priložena uz ovaj dokument. Prilikom paralelizacije koristiti koncept poslova (*tasks*). Obratiti pažnju na eventualnu potrebu za sinhronizacijom. Rešenje testirati i prilagoditi tako da granularnost poslova bude optimalna. Program testirati sa parametrima koji su dati u datoteci **run**. [1, N]

3.2. Delovi koje treba paralelizovati

3.2.1. Diskusija

Jedino mesto u programu koje se može paralelizovati je glavna for petlja koja radi sumu faktora koji čine vrednost broja pi.

3.2.2. Način paralelizacije

Paralelizacije je rađena putem koncepta poslova (*tasks*). Ovo je urađeno ugrađenim konstruktom OpenMP-a (#pragma omp task), svakoj task-u je dodeljena po jedan chunk iteracija, potom se ti task-ovi raspodeljuju na hardverske niti putem OpenMP okruženja. Razmatrano je i podela posla task-ovima tako da svaki task dobije jednu iteraciju, ali je primećeno da ovo unosi velike režijske troškove za raspoelu task-ova na niti, a da svaki task ima trivijalno mali posao koji radi.

3.3. Rezultati

Paralelizacijom ovog programa na više task-ova koji se dodeljuju hardverskim nitima se dobija ubrzanje koje je prikazano na grafiku (Slika 3) – ovo ubrzanje se vidi u slučaju većeg posla.

3.3.1. Logovi izvršavanja

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti.

```
$ ./z3 1000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159165358977
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159165358973
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.014481s
Parallel elapsed time: 0.002097s
Test PASSED

$ ./z3 10000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159255358979
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159255358983
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.042082s
Parallel elapsed time: 0.008904s
```

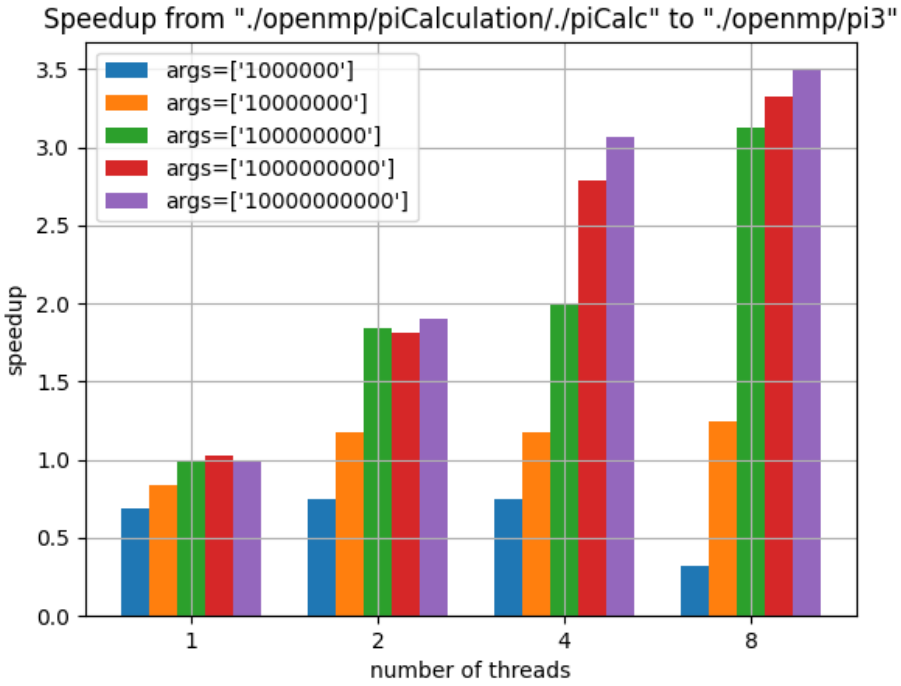
```
Test PASSED

$ ./z3 100000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 100000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159264358933
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 100000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159264358988
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 0.326934s
Parallel elapsed time: 0.080753s
Test PASSED

$ ./z3 1000000000
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265258805
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 1000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265258932
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 3.192513s
Parallel elapsed time: 0.797299s
Test PASSED

$ ./z3 10000000000
```

```
----------------------Sequential execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265348835
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979
----------------------Parallel execution----------------------
Before for loop, factor = 0.000000.
After for loop, factor = -1.000000.
With n = 10000000000 terms
   Our estimate of pi = 3.14159265348821
   Ref estimate of pi = 3.14159265358979

Sequential elapsed time: 31.839965s
Parallel elapsed time: 7.968897s
Test PASSED
```

Listing 3. Logovi izvršavanja računanja pi

3.3.2. Grafici ubrzanja

U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.



Slika 3. Grafik zavisnosti ubrzanja u odnosu na broj niti za različite argumente pokretanja

3.3.3. Diskusija dobijenih rezultata

Paralelizacija na više task-ova je donela ubrzanje za posao koji je dovoljno veliki – ovo ubrzanje se najbolje vidi kada imamo više od 1000000 iteracije petlje. Program je embarrassingly parallel i svaka nit dobija određeni chunk iteracija za računanje – time što svaka nit dobija nekoliko task-ova. Posao svakog task-a je iste veličine, ali svaki task se dinamički raspodeljuje na hardverske niti, pa imamo dodatne režijske troškove pri pozivanju scheduler-a – zbog ovoga ovakav problem nije optimalno rešavati konstruktom task-ova. Za pokretanje na jednoj niti se vidi usporenje koje je očekivano zbog režijskih troškova inicijalizacije OpenMP okruženja i raspodele task-ova na istu nit.

4. PROBLEM 4 – *NEEDLEMAN-WUNSCH* ALGORITAM

4.1. Tekst problema

Paralelizovati program koji vrši poravnavanje bioloških sekvenci korišćenjem *Needleman-Wunsch* algoritma. Algoritam predstavlja primenu koncepta dinamičkog programiranja za globalno poravnavanje dve sekvence nukleotida ili aminokiselina (više o algoritmu na adresi: https://en.wikipedia.org/wiki/Needleman%E2%80%93Wunsch_algorithm). Program se nalazi u datoteci **needle.c** u arhivi koja je priložena uz ovaj dokument. Obratiti pažnju na raspodelu opterećenja po nitima i testirati program za različite načine raspoređivanja posla. Program testirati sa parametrima koji su dati u datoteci **run**. [1, N]

4.2. Delovi koje treba paralelizovati

4.2.1. Diskusija

Paralelizacija je moguća u svim for petljama koje vrše inicijalizaciju – to je urađeno for konstruktom OpenMP okruženja. Usled zavisnosti po podacima preko granica iteracija for petlji koje rade obradu matrice (for petlje su do-across tipa), nemoguće je paralelizovati spoljašnje petlje obrade, slično tome ni obrade dve trougaone matrice koje čine matricu koja se obrađuje se ne mogu raditi u paraleli. Uočeno je da unutrašnje petlje obrade trouganih delova matrice rade iteriranje po dijagonalama matrice, a da svaki element na dijagonali ima nezavisnu obradu od ostalih. Ove dve unutrašnje petlje su zbog toga paralelizovane for konstruktom. Kako TRACEBACK deo programa radi sekvencijalnu pretragu sa zavisnostima od prošle iteracije, ovaj deo programa mora ostati sekvencijalan zbog korektnosti izvršavanja.

4.2.2. Način paralelizacije

Paralelizacija je vršena for konstruktima OpenMP okruženja.

4.3. Rezultati

Paralelizacijom ovog programa se dobija ubrzanje koje je prikazano na grafiku (Slika 4) – ovo ubrzanje se najbolje vidi u slučaju većeg posla, iako se može primetiti i na manjoj količini posla.

4.3.1. Logovi izvršavanja

Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti.

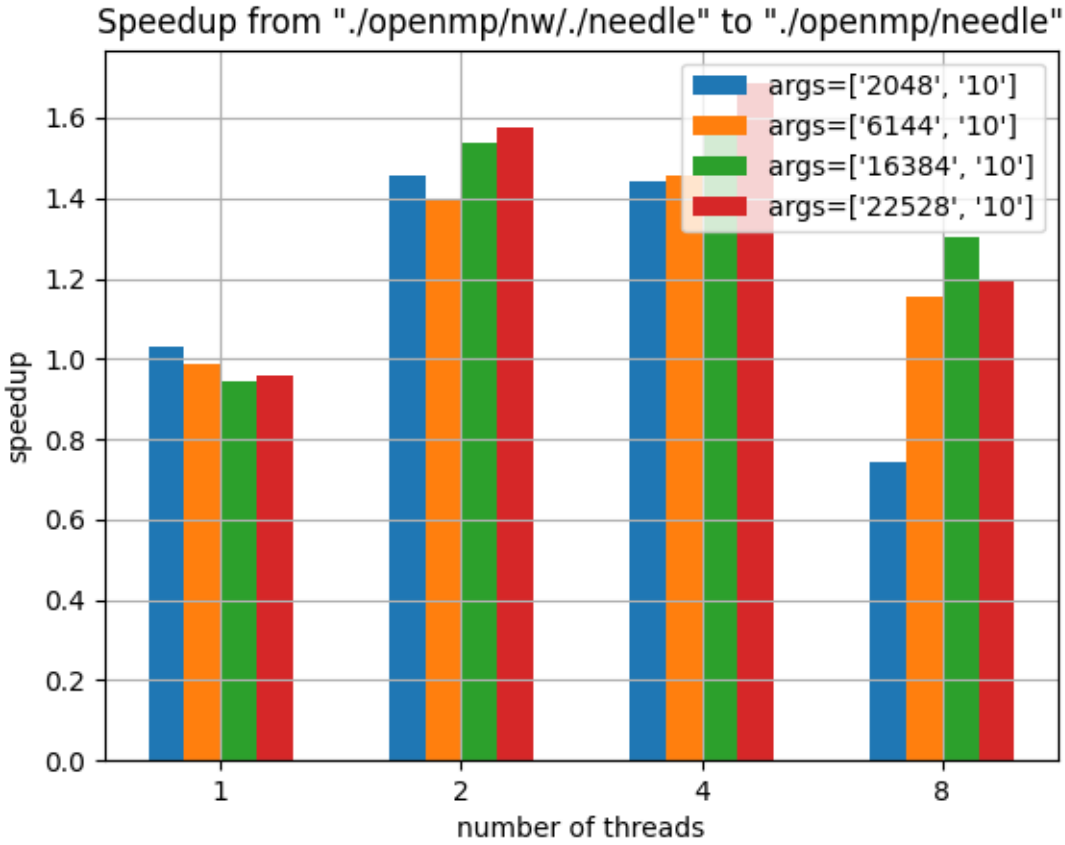
```
$ ./z4 2048 10
----------------------Sequential execution----------------------
Start Needleman-Wunsch
Processing top-left matrix
Processing bottom-right matrix
-----------------------Parallel execution-----------------------
Start Needleman-Wunsch
Processing top-left matrix
Processing bottom-right matrix

Sequential elapsed time: 0.110103s
Parallel elapsed time: 0.034839s
Test PASSED

$ ./z4 6144 10
----------------------Sequential execution----------------------
Start Needleman-Wunsch
Processing top-left matrix
Processing bottom-right matrix
-----------------------Parallel execution-----------------------
Start Needleman-Wunsch
Processing top-left matrix
Processing bottom-right matrix

Sequential elapsed time: 1.001968s
Parallel elapsed time: 0.522392s
Test PASSED

$ ./z4 16384 10
----------------------Sequential execution----------------------
Start Needleman-Wunsch
Processing top-left matrix
Processing bottom-right matrix
-----------------------Parallel execution-----------------------
```

```
Start Needleman-Wunsch
Processing top-left matrix
Processing bottom-right matrix

Sequential elapsed time: 9.237692s
Parallel elapsed time: 3.623918s
Test PASSED

$ ./z4 22528 10
----------------------Sequential execution----------------------
Start Needleman-Wunsch
Processing top-left matrix
Processing bottom-right matrix
-----------------------Parallel execution-----------------------
Start Needleman-Wunsch
Processing top-left matrix
Processing bottom-right matrix

Sequential elapsed time: 16.767249s
Parallel elapsed time: 7.104467s
Test PASSED
```

Listing 4. Logovi izvršavanja Needleman-Wunsch algoritma

4.3.2. Grafici ubrzanja

U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.



Slika 4. Grafik zavisnosti ubrzanja u odnosu na broj niti za različite argumente pokretanja

4.3.3. Diskusija dobijenih rezultata

Problem sam po sebi nije preterano paralelan pošto koristi dinamičko programiranje koje unosi dosta zavisnoti po podacima preko granica iteracija svih petlji. Vidljivo je da je sa povećanjem posla veće ubrzanje, a primećuje se da za 2 i 4 niti se dobijaju najbolje performanse. Kako ova izvršavanja nisu testirana u izolovanom okruženju (vreme je mereno na običnom PC-u), moguće je da i za 8 niti ubrzanje bude bolje. Iz ovakvih podataka se može zaključiti da za 8 niti ima previše režijskog posla za fork-join, ovo je i očekivano pošto su paralelizovane unutrašnje petlje. Pokušana je i dinamička raspodela posla po nitima, ali u većini slučajeva ovo samo donosi usporenje u izvršavanju zbog dodatnog posla raspoređivanja niti.

5. PROBLEM 5 – INTERAKCIJA ČVRSTIH TELA (*N-BODY*)

5.1. Tekst problema

Paralelizovati program koji simulira problem interakcije čvrstih tela u dvodimenzionalnom prostoru (*n-body* problem). Tela interaguju putem gravitacione sile na osnovu sopstvene mase, pozicije u prostoru i trenutne brzine. Program se nalazi u direktorijumu **nbody** u arhivi koja je priložena uz ovaj dokument. Program se sastoji od više datoteka, od kojih je od interesa datoteka **nbody.c**. Analizirati dati kod i obratiti pažnju na način izračunavanja sila i energija. Ukoliko je potrebno međusobno isključenje prilikom paralelizacije programa, koristiti dostupne OpenMP konstrukte. Obratiti pažnju na efikasnost međusobnog isključenja niti i po potrebi ga svesti na što je moguće manju meru uvođenjem pomoćnih struktura podataka. Verifikaciju paralelizovanog rešenja vršiti nad dobijenim energijama i poslednjem stanju sistema. Način pokretanja programa se nalazi u datoteci **run**. [1, N]

5.2. Delovi koje treba paralelizovati

5.2.1. Diskusija

Paralelizacija je moguća u svim for petljama koje vrše inicijalizaciju – to je urađeno for konstruktom OpenMP okruženja. Usled zavisnosti po podacima preko granica iteracija for petlje koja radi glavnu obradu (for petlja je do-across tipa), nemoguće je paralelizovati spoljašnju petlju obrade. Unutrašnje petlje se mogu paralelizovati uz vođenje računa o sinhronizaciji pristupa promenljivama – nad nekim promenljivama se radi redukcija – ovo je urađeno reduction klauzulom OpenMP okruženja. Primećeno je da se funkcije Compute_force i Compute_energy mogu paralelizovati uz vođenje računa o redukciji promenljivih. Inicijalizacija u Gen_init_cond se isto može paralelizovati. For petjla koja izvršava Update_part je do-all tipa pa se može trivijalno paralelizovati for konstruktom.

5.2.2. Način paralelizacije

Paralelizacija je vršena for konstruktima OpenMP okruženja uz korišćenje reduction klauzule za redukciju sumiranja promenljivih i minimlnih izmena koda tako da bude pogodan za korišćenje OpenMP konstrukta.

5.3. Rezultati

Paralelizacijom ovog programa se dobija ubrzanje koje je prikazano na grafiku (Slika 5) – ovo ubrzanje se vidi u slučaju većeg posla, dok se na manjoj količini posla primećuje usporenje.

5.3.1. Logovi izvršavanja

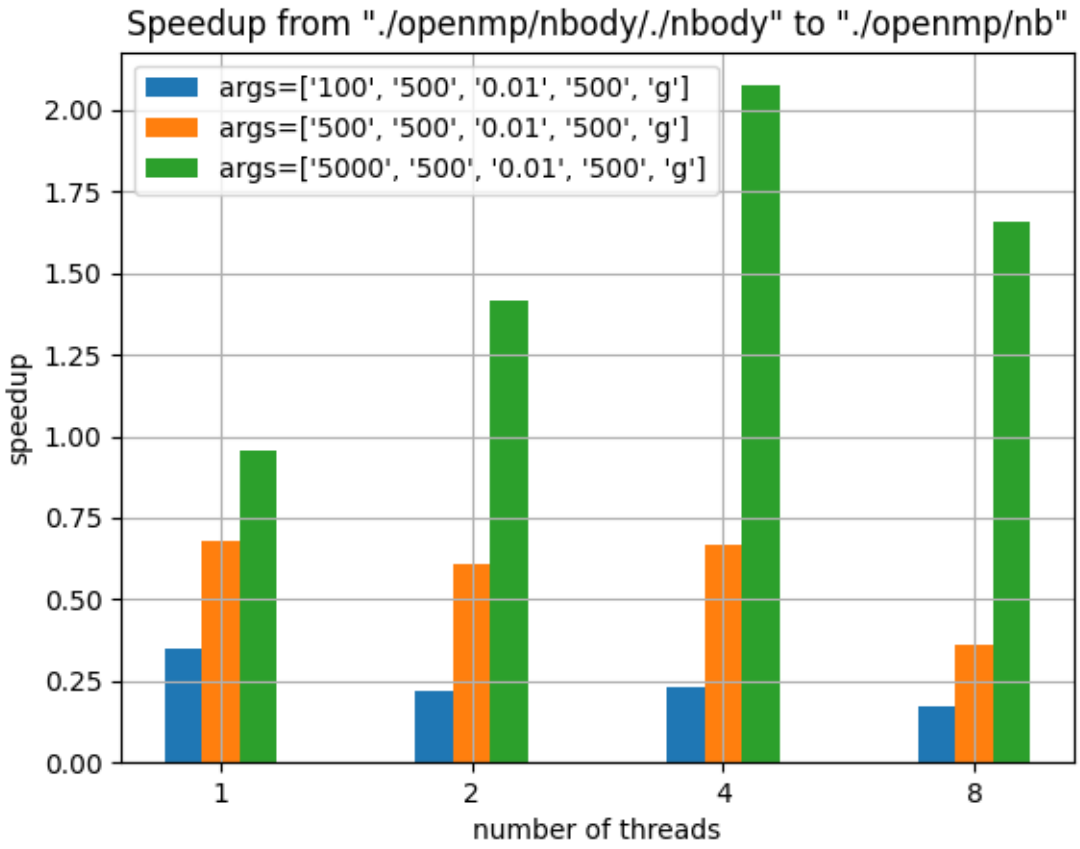
Ovde su dati logovi izvršavanja za definisane test primere i različit broj niti.

```
$ ./z5 100 500 0.01 500 g
   PE = -7.035612e+36, KE = 1.304554e+36, Total Energy = -5.731058e+36
Elapsed time = 8.872795e-02 seconds

Sequential elapsed time: 0.030873s
Parallel elapsed time: 0.088732s
Test PASSED

$ ./z5 500 500 0.01 500 g
   PE = -4.754056e+37, KE = 1.360414e+36, Total Energy = -4.618014e+37
Elapsed time = 6.411481e-01 seconds

Sequential elapsed time: 0.672129s
Parallel elapsed time: 0.641153s
Test PASSED

$ ./z5 5000 500 0.01 500 g
   PE = -6.649074e+38, KE = 2.481116e+36, Total Energy = -6.624263e+38
Elapsed time = 2.794771e+01 seconds

Sequential elapsed time: 54.167515s
Parallel elapsed time: 27.947755s
Test PASSED
```

Listing 5. Logovi izvršavanja n-body problema

5.3.2. Grafici ubrzanja

U okviru ove sekcije su dati grafici ubrzanja u odnosu na sekvencijalnu implementaciju.



Slika 5. Grafik zavisnosti ubrzanja u odnosu na broj niti za različite argumente pokretanja

5.3.3. Diskusija dobijenih rezultata

Primećeno je ubrzanje za veći posao, dok se za manji posao vidi usporenje u odnosu na sekvencijalni program. Ovo se objašnjava time što su paralelizovane unutrašnje petlje obrade što prouzrokuje veliki broj fork-join operacija – zato se ovo isplati samo u slučajevima kada unutrašenje for petlje imaju puno posla. Sve for petlje imaju uniformnu raspodelu posla, pa je statičko raspoređivanje najbolji način paralelizacije jer ne unosi dodatne režijske troškove.