OpenMP — део 1

Рачунарски системи високих перформанси

Петар Трифуновић Вељко Петровић

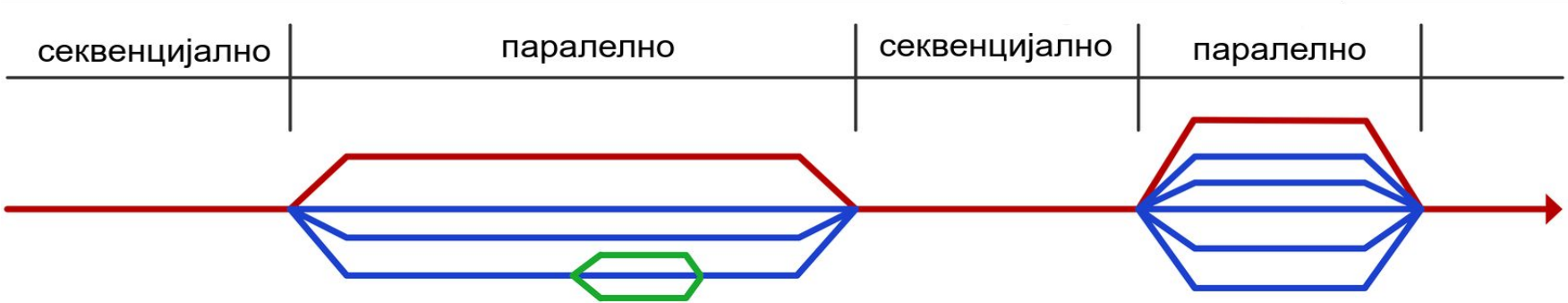
Факултет техничких наука
Универзитет у Новом Саду

Рачунарске вежбе, Зимски семестар 2022/2023.

OpenMP

- API за програмирање паралелних апликација на вишепроцесним (енг. *multiprocessing*) машинама, заснован на концепту **дељења меморије**.
- Обухвата скуп компајлерских директива (енг. *compiler directives*), библиотечких рутина (енг. *library routines*) и променљивих окружења (енг. *environment variables*).
- Постоји подршка за програмске језике **C, C++** и Fortran.

fork-join модел



- **Паралелни регион** (енг. *Parallel region*) — део програма који извршава тим нити.
- **Мастер нит**
- **Новокреиране нити** — идентификатори од 1 до $N - 1$, не постоје након паралелног региона у којем су креиране.
- Све нити у паралелном региону чине **тим нити.**

[1] Оригинална илустрација преузета из књиге *Parallel Computing Book*

fork-join модел

- У OpenMP се тим нити креира коришћењем `parallel` конструкције (енг. *parallel construct*)

```
#pragma omp parallel [klauzule]
    strukturirani-blok
```

- Структурирани блок:
  - Има тачно једну улазну тачку
  - Има тачну једну излазну тачку (не може садржати `break`, `goto`, може `exit`)
- Клаузуле: `num_threads`, ...

Пример 1: Добри стари Hello World!

```c
#include <stdio.h>
#include <omp.h>

int main() {

    #pragma omp parallel
    {
        int id = omp_get_thread_num();
        printf("Hello(%d)", id);
        printf(" world!(%d)\n", id);
    }

    return 0;
}
```

Пример 1: добри Hello Стари World!

- Један пример извршавања:

```
Hello(1)Hello(2)        world!(2)
Hello(0) world!(0)   world!(1)
Hello(3) world!(3)
```

- Иако нигде у примеру број нити није задат, OpenMP радно окружење (енг. *execution environment*) је одлучило да направи 4 нити.
- Типично, OpenMP радно окружење прави онолико нити колико има језгара (физичких или логичких). Нпр. овај испис је добијен извршавањем на Интеловом процесору i5 3337U (4 логичка језгра).

Пример 1: добри Hello Стари World!

- Како створити неки произвољан број нити у паралелном региону? `omp_set_num_threads()` `OMP_NUM_THREADS`
- Могуће је и да радно окружење **не направи** онолико нити колико сте од њега затражили услед постојећих ограничења!
- **Друге интересантне функције:** `omp_get_num_threads()`, `omp_get_thread_num()`, `omp_get_max_threads()`

Превођење изворне датотеке

- **Како компајлирати?** Отворити терминал, позиционирати се у директоријум у којем се налази изворна датотека (`izvornad.c`) и унети:

```
gcc [-g] [-o izvrsnad] izvornad.c -fopenmp [-O2]
```

- У случају да постоји више изворних датотека, потребно их је све навести. Делови у угластим заградама нису обавезни.
- Опције:
  - `-g` — омогућава прикупљање података за дебаговање
  - `-o` — специфицира назив излазне датотеке, у овом случају то је извршна датотека
  - `-O2` | `-O3` — индикатор компајлеру да примени одређене скупове оптимизација (`O3` већи скуп оптимизација од `O2`). Употреба ових опција се **не препоручује** у комбинацији са `-g` опцијом!

Условно превођење

- У одређеним случајевима је могуће **исти** OpenMP изворни код превести и у секвенцијални и у паралелни програм.

```
#ifdef _OPENMP
// pozivi OpenMP api-ja  #endif
```

- Преводилац игнорише непознате директиве.
- Једно решење које ради као паралелно на платформама са OpenMP подршком, а на осталим ради као секвенцијално.

Покретање извршне датотеке

- **Како покренути искомпајлирано решење?** Отворити терминал, позиционирати се у директоријум у којем се налази извршна датотека (`izvrsnad`) и унети:

```
./izvrsnad <lista-argumenata>
```

- У случају да при компајлирању није наведено име извршне датотеке, она ће се подразумевано звати `a.out`.

Задатак 1: Рачунање вредности броја π

- Коришћењем само parallel конструкције, паралелизовати програм који рачуна вредност интеграла (https://math.stackexchange.com/questions/22777/calculate-pi-precisely-using-integrals)

$$\int_0^1 \frac{4}{\left(1+x^2\right)} \mathrm{d}x$$

- Секвенцијална имплементација програма у C програмском језику је дата у директоријуму `zadaci`. Резултат интеграљења би требало да буде једнак броју π. Потребно је додати parallel конструкцију без даљих модификација секвенцијалног програма.
- Шта се дешава са резултатом?
- *Пример решења:* функција `parallel_code_incorrect`, датотека `pi.c`, директоријум `resenja`.

Опсег видљивости променљивих

- Дељене
  - Декларисане изван паралелног региона (нпр. `sum` из задатка 1)
  - Све OpenMP нити унутар региона имају приступ истој променљивој — **трка до података**
- Приватне
  - Свака OpenMP нит има своју инстанцу променљиве декларисане унутар паралелног региона
  - Бројачка променљива `for` петље првог нивоа
  - Променљиве декларисане у функцији позваној из паралелног региона

Задатак 2: Рачунање вредности броја π

- Модификовати решење претходног задатка тако да се уклони штетно преплитање.
- *Пример решења:* функција `parallel_code`, датотека `pi.c`, директоријум `resenja`.

Задатак 3: Рачунање вредности броја π

- Паралелно решење задатка 2 елиминише проблем штетног преплитања, али уводи проблем лажног дељења (енг. *false sharing*) при приступу низовној променљивој `sum`. Изменити решење тако да се отклони лажно дељење.
- *Напомена:* размислити о томе колико се елемената низа преноси у кеш процесора када се приступа једном елементу.
- *Пример решења:* функција `parallel_code_no_false_sharing`, датотека, `pi.c`, директоријум `resenja`.

Конструкције за експлицитну синхронизацију

- Синхронизација високог нивоа апстракције:
  - `barrier construct` - дефинише тачку у коду до које све активне нити морају да се зауставе док до те тачке не стигне и последња нит, након чега све нити могу наставити даље извршавање.
    #pragma omp barrier
  - `critical construct` - само једна нит може у једном тренутку бити у критичној секцији.

    #pragma omp critical

    ```
        strukturirani-blok
    ```
  - `atomic construct` - хардверски подржан искључив приступ ажурирању вредности просте променљиве. Уколико нема хардверске подршке, ова конструкција се понаша као и `critical`.

    #pragma omp atomic

Задатак 4: Рачунање вредности броја π

- Дорадити решење задатка 2 тако да се штетно преплитање уклони одговарајућим синхронизационим механизмом.
- *Пример решења:* функција `parallel_code_synchronization`, датотека `pi.c`, директоријум `resenja`.

Конструкције за поделу посла

- енг. *worksharing constructs*
  - `loop` конструкција (енг. *loop construct*)
  - `sections/section` конструкција (енг. *sections/section construct*)
  - `single` конструкција (енг. *single construct*)
- На крају блока кода који се извршава у склопу неке од конструкција за поделу посла подразумевано постоји **имплицитна баријерна синхронизација.**
- Подразумевано понашање се може променити навођењем `nowait` клаузуле у оквиру директива за поделу посла (пример касније).

Имплицитна баријерна синхронизација

- Имплицитна баријерна синхронизација се такође подразумевано налази и на **крају паралелног региона**, али је за разлику од конструкција за поделу посла, **није могуће одатле уклонити.**
- Зашто?

loop конструкција

- Синтакса:

```
#pragma omp for [klauzule]
for-petlje
```

- Проблеми у рачунарству високих перформанси се често своде на рад са великим низовима! То значи да често постоји итерирање кроз низове...
- Тај посао може да се подели на више нити! Свака нит у паралели може обрадити парче низа.
- Овај начин расподеле података сте већ имплементирали у задатку 2, али сте сами морали да специфицирате границе низа над којима ради свака појединачна нит.

`loop` конструкција

- Синтакса:

```
#pragma omp for [klauzule]
    for-petlje
```

- Клаузуле:
  - schedule
  - collapse
  - private
  - shared
  - reductio
  - nowait
  - ...

Пример 2: `loop` конструкција

- Пример употребе `for` директиве

```
#pragma omp parallel
{
        int sum = 0;
        #pragma omp for
        for (int i = 0; i < N; i++)
            sum += A[i];
}
```

- Коришћењем комбиноване конструкције:

```
#pragma omp parallel for
{
        int sum = 0;
        for (int i = 0; i < N; i++)
            sum += A[i];
}
```

`loop` конструкција: распоређивање

- **Како ће итерације петље бити додељене нитима?** OpenMP подржава више стратегија распоређивања које се могу специфицирати `schedule` клаузулом.

  #pragma omp for schedule(tip [,velicina_bloka])

`loop` конструкција: распоређивање

- **Како ће итерације петље бити додељене нитима?**
  - `static` — блокови итерација се додељују нитима у време компајлирања по `round-robin` принципу
  - `dynamic` — блокови итерација се додељују нитима у време извршавања тако да оптерећење нити буде оптимално
  - `guided` — модификација динамичког распоређивања где је сваки наредни блок додељен нити мањи од претходног
  - `auto` — компајлер одређује тип распоређивања који мисли да је најбољи за проблем
  - `runtime` — могуће је "споља" утицати на тип распоређивања преко
  - `OMP_SCHEDULE` променљива окружења

Редукције

- Присетимо се непотпуног паралелног сабирања елемената низа из примера 2

```
#pragma omp parallel for
{
        int sum = 0;
        for (int i = 0; i < N; i++) {
            sum += A[i];
        }
}
/* saberi parcijalne sume */
```

- Да би програм био потпуно функционалан, потребно је посабирати парцијалне суме које срачунају нити.

Редукције

- Може да се уради овако:

```
int sum = 0;
#pragma omp parallel for
{
        for (int i = 0; i < N; i++) {
                #pragma omp critical
                sum += A[i];
        }
}
```

- И у дељеној променљивој `sum` ће бити коначан резултат. Али ово је **ВЕОМА** неефикасно!

Редукције

- А може и овако:

```
int sum = 0;
#pragma omp parallel for reduction(+:sum)
{
    for (int i = 0; i < N; i++) {
        sum += A[i];
    }
}
```

- Шта заправо значи `reduction(+:sum)`?

Редукције

- За сваку нит у паралелном региону направи по једну приватну инстанцу променљиве `sum` и иницијализуј је на вредност неутралну за наведени редукциони оператор (у случају сабирања је то 0).
- Свака нит мења своју копију променљиве `sum`.
- На крају петље, резултати се комбинују употребом редукционог оператора у дељену променљиву `sum`.

Редукције

Општи формат редукције:

```
reduction(redukcioni_operator : lista_promenljivih)
```

Уграђени редукциони оператори за C/C++:

+	0
*	1
-	0
min	највећи позитивни број
max	највећи негативни број
&	~ 0
|	0
^	0
&&	1
||	0

Задатак 5: Рачунање вредности броја π

- Имплементирати паралелно решење рачунања вредности броја *pi* уз коришћење `for` директиве и `reduction` клаузуле.
- *Пример решења:* функција `parallel_code_for_construct`, датотека
- `pi.c`, директоријум `resenja`.

Имплицитна vs. експлицитна баријера

- **Експлицитна баријера** је задата *#pragma omp barrier* директивом.
- **Имплицитна баријера** је баријера већ укључена у неку конструкцију (нпр. `for` конструкцију).

Имплицитна vs. експлицитна баријера

- У којем делу кода ће се нити синхронизовати?

```
#pragma omp parallel
{
        /* prvi blok naredbi */
        #pragma omp barrier
        /* drugi blok naredbi */
}
```

Имплицитна vs. експлицитна баријера

- У којем делу кода ће се нити синхронизовати?

```
#pragma omp parallel
{
        /* prvi blok naredbi */
        #pragma omp barrier
        /* drugi blok naredbi */
}
```

- **Одговор:** На `barrier` директиви (експлицитна баријерна синхронизација).

Имплицитна vs. експлицитна баријера

- У којем делу кода ће се нити синхронизовати?

```
#pragma omp parallel for
for (i = 0; i < N; i++)
        /* prvi blok naredbi */
/* drugi blok naredbi */
```

Имплицитна vs. експлицитна баријера

- У којем делу кода ће се нити синхронизовати?

```
#pragma omp parallel for
for (i = 0; i < N; i++)
        /* prvi blok naredbi */
/* drugi blok naredbi */
```

- **Одговор:** На крају првог блока наредби. Све нити морају да заврше своје итерације петље да би могле да наставе са другим блоком наредби, јер подразумевано `loop` конструкција има уграђену имплицитну баријеру.

Имплицитна vs. експлицитна баријера

- У којем делу кода ће се нити синхронизовати?

```
#pragma omp parallel for nowait
for (i = 0; i < N; i++)
        /* prvi blok naredbi */
/* drugi blok naredbi */
```

Имплицитна vs. експлицитна баријера

- У којем делу кода ће се нити синхронизовати?

```
#pragma omp parallel for nowait
for (i = 0; i < N; i++)
        /* prvi blok naredbi */
/* drugi blok naredbi */
```

- **Одговор:** На крају паралелног региона. Имплицитна баријера `loop` конструкције је онемогућена употребом `nowait` клаузуле.

sections/section конструкција

Свака нит унутар `sections` конструкције извршава један блок кода који припада секцији.

Синтакса:

```
#pragma omp sections [klauzule]
{
        [ #pragma omp section ]
                strukturirani-blok
        [ #pragma omp section
                strukturirani-blok ]
        ...
}
```

Пример 3: sections/section конструкција

```
#pragma omp parallel
{
        #pragma omp sections
        {
        #pragma omp section
                x_calculation();
        #pragma omp section
                y_calculation();
        #pragma omp section
                z_calculation();
        }
}
```

`single` конструкција

- Синтакса:

```
#pragma omp single [klauzule]
                    strukturirani-blok
```

- Блок наредби извршава само нит која прва уђе у структурирани блок.

```
#pragma omp parallel
{
        do_many_things();
        #pragma omp single
                { exchange_boundaries(); }
        #pragma omp barrier
                do_many_other_things();
}
```

master конструкција

- Синтакса:

```
#pragma omp master
        strukturirani-blok
```

- Блок наредби извршава само мастер нит.

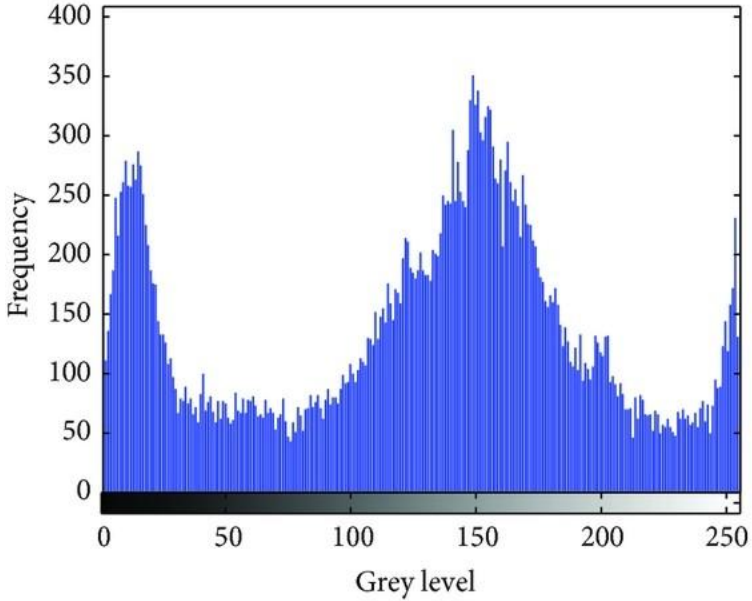
```
#pragma omp parallel
{
        do_many_things();
        #pragma omp master
                { exchange_boundaries(); }
        #pragma omp barrier
                do_many_other_things();
}
```

- **Нема имплицитне синхронизације.**

Сихронизациони механизми: `lock`

- Припада механизмима ниског нивоа синхронизације.
- Аналогни појам пропусници из C++11 вишенитног окружења.
- `critical` директива у позадини користи `lock`. Зашто бисте онда икада желели да директно користите ову директиву?
- Нема проблема, ако на пример, ограничавате приступ једној целобројној променљивој кроз критичну секцију. Али шта ће се десити ако кроз критичну секцију ограничите приступ елементима неког низа?

Пример 4: Хистограм




```
int histogram[255];
```

Пример 4: Хистограм

```
#pragma omp parallel for
for (i = 0; i < NBUCKETS; i+) {
        omp_init_lock(&hist_locks[i]);
        hist[i] = 0;
}
#pragma omp parallel for
for (i = 0; i < NVALS; i++) {
        ival = (int) sample(arr[i]);
        omp_set_lock(&hist_locks[ival]);
                hist[ival]++;
        omp_unset_lock(&hist_locks[ival]);
}

for (i = 0; i < NBUCKETS; i++) {
        omp_destroy_lock(&hist_locks[i]);
}
```

Клаузуле за рад са подацима

- `shared(<lista-promenljivih>)`
- `private(<lista-promenljivih>)`
- `firstprivate(<lista-promenljivih>)`
- `lastprivate(<lista-promenljivih>)`
- `default( private | shared | none )` — Ако се ништа не наведе за ову клаузулу, подразумевана вредност у C и C++ програмским језицима је `shared`.

Пример 5: Клаузуле за рад са подацима

```
void dummy() {
        int tmp = 0;
        #pragma omp parallel for private(tmp)
        for (int j = 0; j < 5; j++)
            tmp += j;
        printf("%d\n", tmp);
}
```

- Која вредност ће бити исписана на стандардни излаз?

Пример 6: Клаузуле за рад са подацима

```
void dummy() {
        int tmp = 0;
        #pragma omp parallel for private(tmp)
        for (int j = 0; j < 5; j++)
            tmp += j;
        printf("%d\n", tmp);
}
```

- Која вредност ће бити исписана на стандардни излаз?
- **Одговор:** На стандардни излаз ће бити исписана вредност 0.
- **Објашњење:** Како је променљива `tmp` проглашена приватном, свака нит ће имати своју инстанцу ове променљиве. По завршетку петље, локалне променљиве ће бити уништене, а дељена променљива `tmp` ће задржати свој у иницијалну вредност.

Пример 6: Клаузуле за рад са подацима

```
void dummy() {
        int tmp = 0;
        #pragma omp parallel for private(tmp)
        for (int j = 0; j < 5; j++)
            tmp += j;
        printf("%d\n", tmp);
}
```

- Која је иницијална вредност приватних верзија променљиве `tmp`?

Пример 6: Клаузуле за рад са подацима

```
void dummy() {
        int tmp = 0;
        #pragma omp parallel for private(tmp)
        for (int j = 0; j < 5; j++)
            tmp += j;
        printf("%d\n", tmp);
}
```

- Која је иницијална вредност приватних верзија променљиве `tmp`?
- **Одговор:** Иницијална вредност приватних променљивих `tmp` је непозната.
- **Објашњење:** Клаузула `private(tmp)` каже компајлеру да треба да алоцира простор за променљиву `tmp` на стеку. Компајлер не мора иницијализовати заузету локацију.

Пример 6: Клаузуле за рад са подацима

```
void dummy() {
        int tmp = 0;
        #pragma omp parallel for private(tmp)
        for (int j = 0; j < 5; j++)
            tmp += j;
        printf("%d\n", tmp);
}
```

- Којом клаузулом је потребно заменити `private` клаузулу да би локалне инстанце променљиве `tmp` добиле иницијалну вредност глобалне променљиве `tmp`?

Пример 6: Клаузуле за рад са подацима

```
void dummy() {
        int tmp = 0;
        #pragma omp parallel for private(tmp)
        for (int j = 0; j < 5; j++)
            tmp += j;
        printf("%d\n", tmp);
}
```

- Којом клаузулом је потребно заменити `private` клаузулу да би локалне инстанце променљиве `tmp` добиле иницијалну вредност глобалне променљиве `tmp`?
- **Одговор:** `firstprivate`

Задатак 6: Манделбротов сет

- Дата је датотека `mandelbrot.c`. Датотека садржи паралелно OpenMP решење које одређује Манделбротов сет. Решење има пар проблема везаних за коришћење клаузула за рад са подацима и понеко штетно преплитање. Пронађите и исправите грешке.
- *Решење:* датотека `mandelbrot.c`, директоријум `resenja`

Како паралелизовати `while` и рекурзију?

- Иницијално, OpenMP је замишљен тако да је могуће паралелизовати проблеме за које се унапред зна број потребних итерација за њихово решавање!
- **Проблем!** Како применити OpenMP у другим типовима петљи у којима се не зна унапред број итерација? Или у случају рекурзије?

Како паралелизовати `while` и рекурзију?

- Иницијално, OpenMP је замишљен тако да је могуће паралелизовати проблеме за које се унапред зна број потребних итерација за њихово решавање!
- **Проблем!** Како применити OpenMP у другим типовима петљи у којима се не зна унапред број итерација? Или у случају рекурзије?
- Опције:
  - Проблем трансформисати у форму for петље ако је то могуће
  - Користити `task` конструкцију (од OpenMP 3.0)

Пример 7: Паралелизација обраде чворова листе

```
// petlja koju
// treba paralelizovati
while (p != NULL) {
        processwork(p);
        p = p->next;
}
```

```
// 1. odrediti broj cvorova
while (p != NULL) {
        nelems++; p = p->next;
}
...
// 2. zapamtiti adrese cvorova
p = head;
for (i = 0; i < nelems; i++) {
        ptrs[i] = p;
        p = p->next;
}
...
// 3. pokrenuti paralelnu obradu #pragma
omp parallel for
for (i = 0; i < nelems; i++)
        processwork(ptrs[i]);
```

`task` конструкција

- Синтакса:

```
#pragma omp task [klauzule]
        strukturirani-blok
```

- Може се посматрати као независна јединица посла. Чине је:
  - Код који задатак извршава
  - Подаци (приватне и дељене променљиве)
  - Internal Control Variables (ICV) (нпр. индикатор да ли задатак може да буде додељен различитим нитима, врста распоређивања, број нити у паралелном региону итд.)

Пример 8: Креирање задатака

- `task` и `single` конструкције се често користе заједно: једна нит прави задатке који се увезују у ред задатака одакле све нити могу да узимају задатке.

```
#pragma omp parallel
{
        #pragma omp single
        {
                #pragma omp task
                y = f(x)
                #pragma omp task
                z = g(x)
        }
}
```

Задатак 7: Модификација листе

- Дата је секвенцијална имплементација листе (`linked.c`) у којој сваки елемент садржи по један Фибоначијев број добијен функцијом `processwork`. Направити OpenMP паралелни програм коришћењем `task` конструкције.
- *Решење:* датотека `linkedlist.c`, директоријум `resenja`.