

Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής
Παράλληλος Προγραμματισμός
2025-26

Το framework παράλληλης επεξεργασίας OpenMP

(Εισαγωγή)

<https://mixstef.github.io/courses/parprog/>

Μ.Στεφανιδάκης



Το framework OpenMP

- **Καθορίζει ένα API παράλληλης επεξεργασίας**
 - Στην αρχική μορφή του ήταν προσανατολισμένο στη διαχείριση threads με το **στατικό μοντέλο fork – join**
 - Αργότερα προστέθηκαν δυνατότητες χρήσης **tasks**
 - Καθώς και εντολών **SIMD** και προγραμματισμού σε **GPU**
- **Επιτρέπει τον παράλληλο προγραμματισμό σε υψηλότερο επίπεδο**
 - Απ' ό,τι τα POSIX threads
- **Υλοποιείται από τον μεταγλωττιστή**
 - Για τις γλώσσες C, C++ και Fortran (HPC programming)
 - Εγγενής υποστήριξη από όλους τους «εμπορικούς» μεταγλωττιστές

Προγραμματισμός με το OpenMP

- Χρήση C pragmas
 - Οδηγίες (**directives**) για τον μεταγλωττιστή πέρα από τη γλώσσα C
 - Συχνά χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση **extensions** του μεταγλωττιστή
 - Ο κάθε μεταγλωττιστής αποφασίζει πώς θα τις χειριστεί
 - Στην περίπτωση του OpenMP **τροποποιούν τον κώδικα**

```
#pragma omp parallel
```

- Συμπληρωματικές συναρτήσεις (βιβλιοθήκη) για διαχείριση του OpenMP
 - Λήψη πληροφορίας για το περιβάλλον εκτέλεσης ή τροποποίηση ρυθμίσεων του OpenMP

Προγραμματισμός με το OpenMP

- **Include headers**
 - `#include <omp.h>`
 - Ορισμοί του OpenMP API
- **Compiler flags**
 - Π.χ. `gcc -O2 -Wall -fopenmp hello-omp.c -o hello-omp`
 - Ειδοποιεί τον μεταγλωττιστή για τα pragmas του OpenMP που θα συναντήσει και για να συνδέσει το εκτελέσιμο πρόγραμμά μας με αναφορές στην κοινή βιβλιοθήκη του συστήματος που υλοποιεί τις λειτουργίες του OpenMP
 - Αν δεν προστεθεί το `-fopenmp` θα αγνοηθούν τα `#pragma omp` ή/και θα δημιουργηθεί σφάλμα σύνδεσης με τη βιβλιοθήκη

Παραλληλισμός με threads

- Δημιουργία μιας ομάδας threads που μπορούν να εκτελούνται παράλληλα
 - Για την εκτέλεση ενός (του ίδιου!) τμήματος κώδικα που ονομάζεται παράλληλη περιοχή (parallel region)
 - Το thread που δημιουργεί την παράλληλη περιοχή (master ή primary thread) συνεχίζει και αυτό με την εκτέλεση της παράλληλης περιοχής
 - Στο τέλος της παράλληλης περιοχής εισάγεται ένα έμμεσο (implicit) barrier συγχρονισμού των threads
- Αντιστοιχία με το μοντέλο fork – join που ήδη γνωρίζουμε
 - Προσοχή: η παράλληλη περιοχή δεν υλοποιεί καταμερισμό εργασίας (work sharing)

Παράλληλη περιοχή threads

- `#pragma omp parallel`

```
#pragma omp parallel
{
    printf("Hello world!\n");
} // NOTE: implicit barrier sync here
```

- Το `printf()` θα εκτελεστεί από έναν συγκεκριμένο αριθμό threads

- Εδώ ο αριθμός δεν προσδιορίζεται οπότε το OpenMP θα διαλέξει έναν «κατάλληλο» αριθμό (π.χ. τον αριθμό των hardware threads του συστήματος εκτέλεσης)

Τι συμβαίνει;

```
.LC0:  
    .string "Hello world!"  
main._omp_fn.0:  
    .cfi_startproc  
    endbr64  
    lea    rdi, .LC0[rip]  
    jmp    puts@PLT  
    .cfi_endproc
```

η παράλληλη περιοχή έγινε η
συνάρτηση main._omp_fn.0

```
main:  
    .cfi_startproc  
    endbr64  
    sub    rsp, 8  
    .cfi_def_cfa_offset 16  
    xor    ecx, ecx  
    xor    edx, edx  
    xor    esi, esi  
    lea    rdi, main._omp_fn.0[rip]  
    call   GOMP_parallel@PLT  
    xor    eax, eax  
    add    rsp, 8  
    .cfi_def_cfa_offset 8  
    ret  
    .cfi_endproc
```

η διεύθυνση της main._omp_fn.0
περνάει ως παράμετρος στη
συνάρτηση GOMP_parallel του
OpenMP

Αναγνωριστικός αριθμός thread

- Κάθε thread έχει έναν μοναδικό αριθμό
 - Λήψη με τη συνάρτηση `omp_get_thread_num()`
 - Χρησιμοποιείται για να διαφοροποιηθεί η δουλειά κάθε thread μέσα στην ίδια παράλληλη περιοχή
 - Ο τρόπος αυτός εργασίας ακολουθεί το μοντέλο “single program multiple data” (SPMD)
- Πόσα threads εκτελούν την παράλληλη περιοχή;
 - Λήψη με τη συνάρτηση `omp_get_num_threads()`
- Δοκιμάστε να τα προσθέσετε στο OpenMP “hello” πρόγραμμα

Ελέγχοντας τον αριθμό των threads

- Ο αριθμός των threads σε μια παράλληλη περιοχή μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορους τρόπους
 - Μεταβλητή περιβάλλοντος `OMP_NUM_THREADS`
 - Θα χρησιμοποιηθεί αν δεν ορίζεται αλλιώς μέσα στον κώδικα
 - Συνάρτηση `omp_set_num_threads()`
 - Από το σημείο κλήσης και μετά
 - Ως πρόσθετο στοιχείο (clause) στο `#pragma omp parallel`
 - Όσο διαρκεί η κρίσιμη περιοχή

```
#pragma omp parallel num_threads(16)
```

- Δοκιμάστε τα στο OpenMP “hello” πρόγραμμα

Εισαγωγή στην εμφάνιση μεταβλητών

- **Data Scope**
 - Πολύ σημαντική έννοια στον προγραμματισμό με το OpenMP
 - Τι συμβαίνει με τις μεταβλητές του σειριακού προγράμματος; τι βλέπει κάθε thread;
- **Δύο βασικές κατηγορίες μεταβλητών**
 - **Private**: κάθε thread βλέπει διαφορετική «κόπια» της μεταβλητής
 - **Shared**: όλα τα threads βλέπουν την ίδια μεταβλητή
 - **Κοινός πόρος**, πρέπει να υπάρχει **έλεγχος πρόσβασης**
 - Όταν δεν δηλώνεται ρητά το είδος μιας μεταβλητής, το OpenMP έχει **default** κανόνες για αυτό

Παράλληλη περιοχή και εμβέλεια μεταβλητών

- Μέσα στην παράλληλη περιοχή
 - Οποιαδήποτε μεταβλητή δηλώνεται μέσα στην παράλληλη περιοχή θεωρείται **private**
 - Το ίδιο ισχύει για μεταβλητές συναρτήσεων που καλούνται μέσα από την παράλληλη περιοχή
 - Οι global μεταβλητές είναι **shared**
 - Μεταβλητές που δεν έχει προσδιοριστεί το είδος τους χρησιμοποιούν το default (εξ' ορισμού **shared**)
- Ρητός προσδιορισμός είδους εμβέλειας
 - Το `#pragma omp parallel` (όπως και άλλα pragmas) παίρνουν προαιρετικά **clauses** προσδιορισμού εμβέλειας για λίστες μεταβλητών
 - **private()** και **shared()**

```
#pragma omp parallel private(id)
```

Διαμοιρασμός εργασίας ενός loop

- **Loop worksharing construct**
 - Η εργασία ενός loop διαμοιράζεται στα threads μιας παράλληλης περιοχής
 - **Δεν παρέχει παραλληλισμό threads**, πρέπει να έχει προηγηθεί ένα `#pragma omp parallel`
 - Εφαρμόζεται σε ένα for loop της C
- **Περιορισμοί στο είδος του for loop**
 - Η μεταβλητή επανάληψης θα πρέπει να είναι **ακέραια**
 - Θα πρέπει να είναι **γνωστά** και **σταθερά** η αρχή και το τέλος της επανάληψης
 - Η σύγκριση θα πρέπει να είναι `<`, `<=`, `>`, `>=` με **σταθερή τιμή**
 - Η αύξηση/μείωση της μεταβλητής επανάληψης θα πρέπει να γίνεται κατά ένα **σταθερό βήμα**

Διαμοιρασμός εργασίας ενός loop

- `#pragma omp for`

```
#pragma omp parallel
{

    #pragma omp for
    for (int i=0;i<N;i++) {

        printf("Thread %d working on element %d\n",
            omp_get_thread_num(),i);

    } // implicit barrier here - use nowait clause to
avoid

} // implicit barrier here
```

- Στο τέλος του `#pragma omp for` υπάρχει ένα έμμεσο barrier – αν δεν το θέλουμε χρησιμοποιούμε το προαιρετικό clause `nowait`

Διαμοιρασμός εργασίας ενός loop

- `#pragma omp parallel for`

```
#pragma omp parallel for
for (int i=0;i<N;i++) {

    printf("Thread %d working on element %d\n",
           omp_get_thread_num(),i);

}
```

- Συνήθης **συνδυασμός** του `#pragma omp parallel` με το `#pragma omp for` σε μία directive
 - Μόνο αν θέλουμε να κάνουμε και κάτι άλλο **εκτός του for** μέσα στην παράλληλη περιοχή χρησιμοποιούμε ξεχωριστά pragmas
- Η μεταβλητή επανάληψης του loop είναι πάντα **private**

Μέθοδοι διαμοιρασμού

- **Static**

- Η default μέθοδος, χωρίζει σε **ισόποσα** μέρη (ή σε προαιρετικό chunk-size) την εργασία
 - Κατάλληλη όταν **κάθε επανάληψη έχει τον ίδιο φόρτο**

- **Dynamic**

```
#pragma omp parallel for schedule(dynamic,3)
```

- Ανάθεση μιας επανάληψης (ή προαιρετικά chunk-size επαναλήψεων) ανά thread και μόλις ολοκληρωθεί, νέα ανάθεση
 - Κατάλληλο όταν το φορτίο **διαφέρει σημαντικά ανά επανάληψη**

- **Guided**

- Όπως το dynamic, η ανάθεση όμως γίνεται σε chunks επαναλήψεων που υπολογίζονται δυναμικά διαιρώντας τις επαναλήψεις που απομένουν δια του αριθμού των threads (προαιρετικά με ελάχιστο chunk-size)

Προσοχή: τι είναι λάθος εδώ;

```
double *a,*b,*c,*d;
int i,j;

//...a,b,c,d array alloc & init here...

#pragma omp parallel
{

    for (j=0;j<R;j++) {

        #pragma omp for nowait
        for (i=0;i<N;i++) {
            a[i] = b[i]*c[i]+d[i];
        }
    }
}
```

Τι είναι λάθος εδώ;

```
double *a,*b,*c,*d;
int i,j;

//...a,b,c,d array alloc & init here...

#pragma omp parallel
{
    for (j=0;j<R;j++) {
        #pragma omp for nowait
        for (i=0;i<N;i++) {
            a[i] = b[i]*c[i]+d[i];
        }
    }
}
```

το j είναι shared (!!!) → ΛΑΘΟΣ!

το i είναι private (loop index) → OK