

Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής
Παράλληλος Προγραμματισμός
2025-26

Παραλληλία Δεδομένων

(και η λειτουργία map)

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

Μ.Στεφανιδάκης



Στρατηγικές παραλληλοποίησης

- Για την επεκτάσιμη (scalable) συγγραφή παράλληλων προγραμμάτων
- Παραλληλία δεδομένων
 - Data parallelism
 - Η πιο «εύκολη» και επεκτάσιμη στρατηγική παραλληλοποίησης
- Παραλληλία λειτουργιών
 - Functional decomposition (“task parallelism”)
 - Συνήθως σε συνδυασμό με την παραλληλία δεδομένων

Παραλληλία δεδομένων

- Εφαρμογή της ίδια λειτουργίας σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων
- Προσοχή: «ίδια λειτουργία» δεν σημαίνει κατ' ανάγκη «ακριβώς ίδιες εντολές»
 - Ο όρος καλύπτει διάφορες μορφές, από την απλή εφαρμογή ενός μετασχηματισμού σε κάθε στοιχείο ενός πίνακα έως πιο σύνθετες μορφές λειτουργιών
- Η παραλληλία αυξάνεται όσο αυξάνονται τα δεδομένα
 - Επεκτασιμότητα (scalability)

Διαθέσιμοι μηχανισμοί

- **Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών**
 - Η εκτέλεση της ίδιας εντολής σε ομάδες δεδομένων (vector parallelism, π.χ. streaming SIMD instructions)
- **Παραλληλισμός σε GPU (SIMT)**
 - Η μαζικά παράλληλη εκτέλεση των ίδιων λειτουργιών σε διαφορετικά δεδομένα
- **Παραλληλισμός σε επίπεδο threads**
 - Πολλές διεργασίες (διαφορετικός program counter) εκτελούνται παράλληλα
 - Κατάλληλο για παραλληλία δεδομένων και λειτουργιών

Σειριακή σημασιολογία των προγραμμάτων

- Παράδειγμα loop:

```
for (i=0; i<N; i++) {  
    a[i] = func(a[i]);  
}
```

- Κλασσικό παράδειγμα παραλληλίας δεδομένων;
 - Θεωρητικά η παραλληλοποίηση μοιάζει πολύ εύκολη
 - Αρκεί να επιτύχουμε παράλληλη εκτέλεση π.χ. κατά ομάδες δεδομένων
- Κατά πόσο αυτό όμως ισχύει;

Σειριακή σημασιολογία των προγραμμάτων

- Παράδειγμα loop:

```
for (i=0; i<N; i++) {  
    a[i] = func(a[i]);  
}
```

- Τι εννοούμε σε ένα σειριακό πρόγραμμα
 - «Θα επεξεργαστούμε τα στοιχεία του a[i] το ένα μετά το άλλο»
- Τι ισχύει για ένα παράλληλο πρόγραμμα
 - «Θα επεξεργαστούμε τα στοιχεία του a[i] το ένα ανεξάρτητα από το άλλο»

Παράλληλη σημασιολογία

- Παράδειγμα loop:

```
for (i=0; i<N; i++) {  
    a[i] = func(a[i]);  
}
```

- Μήπως ο μετασχηματισμός του $a[i]$ επηρεάζει global μεταβλητές;
- Τι θα γινόταν αν π.χ. για τον υπολογισμό του $a[i]$ χρειαζόταν και το $a[i - 1]$;
 - Πολλοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν γειτονικά στοιχεία

Σειριακές αλγοριθμικές δομές

- Ακολουθία (sequence)

f();

g();

h();

- Υπονοείται μια σειρά που πρέπει να τηρηθεί, ακόμα κι αν δεν υπάρχουν αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των f(), g() και h()
 - Για να διατηρηθούν στη σωστή σειρά αλλαγές σε global μεταβλητές (side effects)

Σειριακές αλγοριθμικές δομές

- Επιλογή (selection)

```
if (condition)
```

```
    f();
```

```
else
```

```
    g();
```

- Υπονοείται ότι, ανάλογα με τη συνθήκη, θα εκτελεστεί ή το f() ή το g()

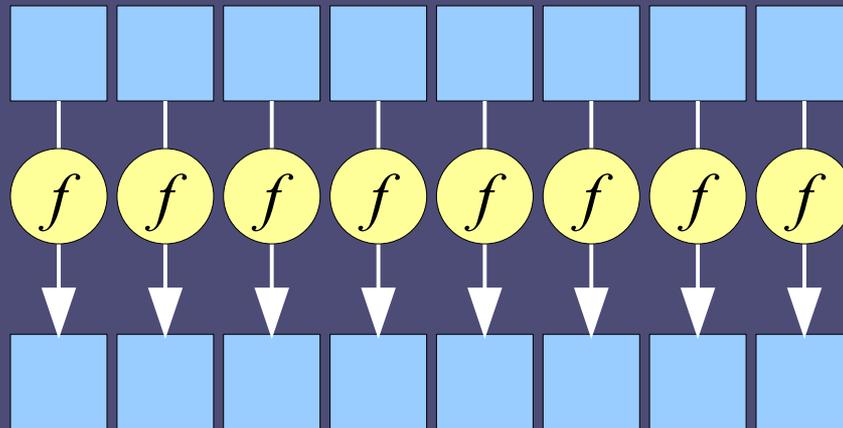
- Και ποτέ πριν τον υπολογισμό της συνθήκης

Σειριακές αλγοριθμικές δομές

- Επανάληψη (iteration)
- Όπως είδαμε, είναι δύσκολο στη γενική μορφή να ξέρουμε αν μπορεί να παραλληλοποιηθεί
 - Εξάρτηση από προηγούμενες επαναλήψεις
 - Μη γνωστά/σταθερά όρια εκτέλεσης
 - Επικάλυψη στοιχείων, π.χ. μέσω δεικτών
- Το κυριότερο εμπόδιο είναι ότι μία και μόνο σειριακή αλγοριθμική δομή (η επανάληψη) αντιστοιχεί κατά περίπτωση σε διαφορετικές παράλληλες υλοποιήσεις

Map: μια απλή περίπτωση παραλληλίας δεδομένων

- Εφαρμογή μιας συνάρτησης σε κάθε στοιχείο μιας ακολουθίας δεδομένων
 - Ανεξάρτητες επαναλήψεις
 - Γνωστά όρια εκτέλεσης
 - Εξαρτάται μόνο από το i (index) και τα $data[i]$
 - Δεν επηρεάζει global μεταβλητές



Map: μια απλή περίπτωση παραλληλίας δεδομένων

- **Σημαντική μορφή παραλληλίας**
 - “Embarrassing parallelism”
 - Μπορεί να εκτελεστεί τόσο με vectors, GPUs όσο και με threads
- **Streaming SIMD Instructions**
 - Single Instruction Multiple Data
 - Θα εξετάσουμε αρχικά την υλοποίηση του map μέσω εντολών SIMD στην αρχιτεκτονική x86
 - Εντολές που εκτελούν την ίδια πράξη σε μια ομάδα «πακεταρισμένων» (**packed**) δεδομένων
 - ALU και καταχωρητές **μεγάλου εύρους** (128 – 512 bits)

Προγραμματισμός εντολών SSE/AVX

- **Include headers**
 - `#include <immintrin.h>`
 - Ορίζονται οι τύποι δεδομένων και οι διαθέσιμες λειτουργίες
- **Compiler flags**
 - Προσδιορίζουμε ποιο/ποια σετ εντολών χρησιμοποιούμε
 - Π.χ. `-mavx -mavx2 -mfma`
 - Ο εκτελέσιμος κώδικας που παράγεται πρέπει να υποστηρίζεται από το σύστημα εκτέλεσης

Προγραμματισμός εντολών SSE/AVX

- **Τύποι δεδομένων**

- Κάθε τέτοια ποσότητα ανατίθεται σε έναν από 16 καταχωρητές
 - **xmm** (128-bit) ή **ymm** (256-bit)
- **__m128** 4 πακεταρισμένοι floats
- **__m128d** 2 πακεταρισμένοι doubles
- **__m128i** πακεταρισμένοι ints
 - 8, 16, 32, 64 ή 128 bits ο καθένας, το ακριβές σχήμα εξαρτάται από την εντολή
- **__m256** 8 πακεταρισμένοι floats
- **__m256d** 4 πακεταρισμένοι doubles
- **__m256i** πακεταρισμένοι ints
 - 8, 16, 32, 64 ή 128 bits ο καθένας, το ακριβές σχήμα εξαρτάται από την εντολή

Προγραμματισμός εντολών SSE/AVX

- **Intrinsics**

- Μοιάζουν με κλήσεις συναρτήσεων και χρησιμοποιούν μεταβλητές για ορίσματα αλλά στην πραγματικότητα είναι οδηγίες προς τον μεταγλωττιστή να εισάγει συγκεκριμένες εντολές sse/avx
 - **Παράδειγμα:** `*pc = _mm256_add_ps(*pa, *pb);`
 - `_mm256` επιστρέφεται 256-bit ποσότητα (`_mm` για 128-bit)
 - `add` κάνει παράλληλη πρόσθεση
 - `ps` σε πακεταρισμένους floats (`pd` για doubles, `epi8`, `epi16`, `epi32`, `epi64`, `epi128` για ints, `epu..` για unsigned ints)

Προγραμματισμός εντολών SSE/AVX

• Χρήση

- Μεταβλητές τύπου `__m128`, `__m256` κλπ: θα ανατεθούν σε καταχωρητές `xmm` ή `ymm`
 - Υπάρχουν «ψευδο»intrinsic που **αρχικοποιούν** στις επιθυμητές τιμές
 - Υπάρχουν intrinsic που **φορτώνουν** ένα «πακέτο» αριθμών από τη μνήμη και τα αντίστοιχα intrinsic για **εγγραφή**
 - Για να γίνονται αποδοτικά αναγνώσεις και εγγραφές θα πρέπει τα δεδομένα στη μνήμη να είναι **ευθυγραμμισμένα (aligned)** ως προς 16 (για 128-bit) ή 32 (για 256-bit): η διεύθυνση του πρώτου byte του «πακέτου» θα πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του 16 (ή του 32)

Προγραμματισμός εντολών SSE/AVX

- Χρήση

- Μεταβλητές τύπου δείκτη σε `__mm256` κλπ: χρησιμοποιούνται για να δείξουν σε θέσεις στη μνήμη για ανάγνωση ή εγγραφή «πακέτων» δεδομένων

- Η μνήμη αυτή θα πρέπει να έχει τη σωστή ευθυγράμμιση
`float *a;`

```
i = posix_memalign((void **)&a, 32, 8*sizeof(float));
```

- Οι μεταβλητές τύπου δείκτη αρχικοποιούνται να δείχνουν το δεσμευμένο χώρο και χρησιμοποιούνται στα intrinsics

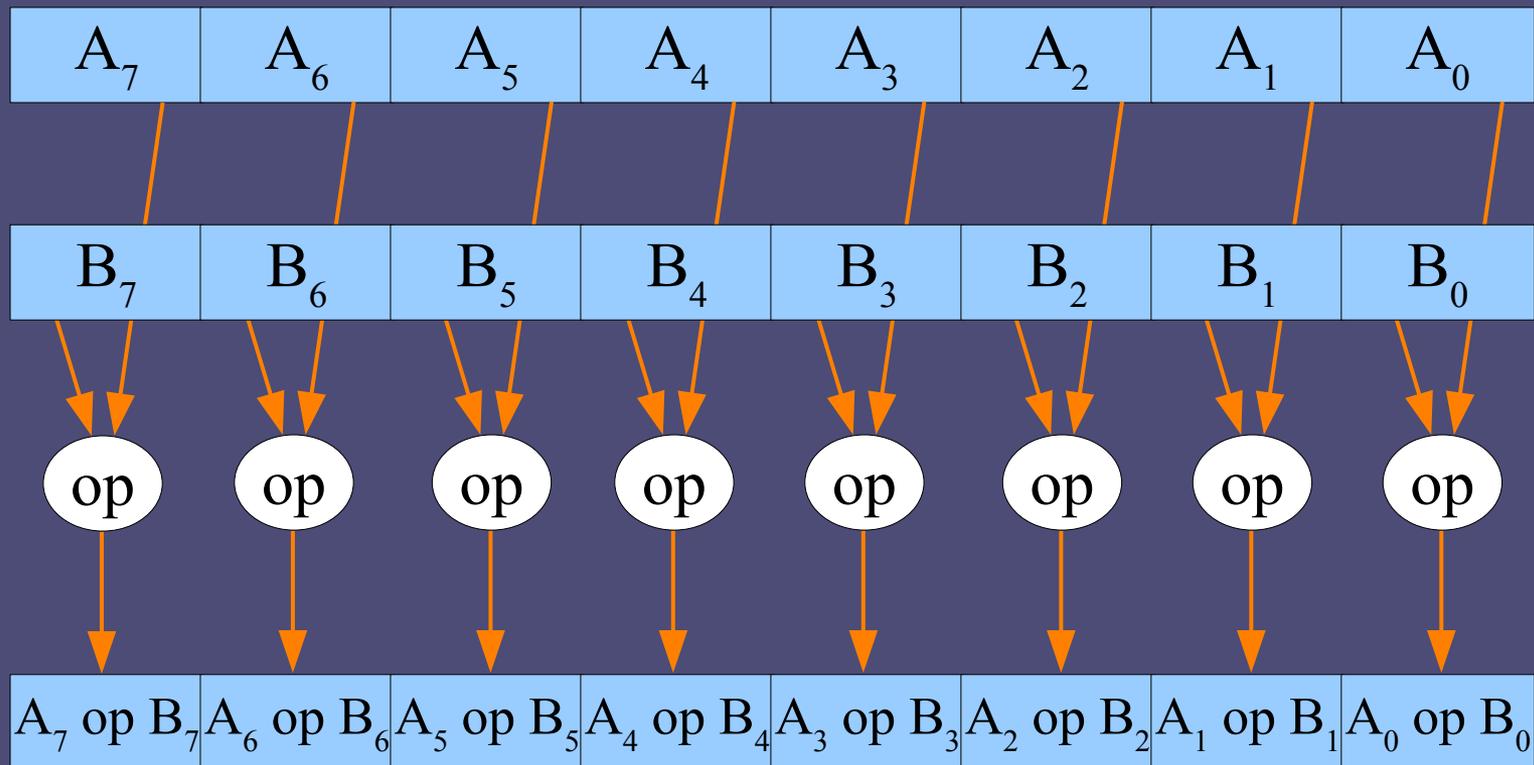
```
__m256 *pa;
```

```
pa = (__m256 *)a;
```

```
*pc = _mm256_add_ps(*pa, *pb);
```

«Κάθετες» εντολές SSE/AVX

- $dst[i] = a[i] \text{ op } b[i]$



«Κάθετες» εντολές SSE/AVX

- **Αριθμητικές πράξεις**
 - add, sub, addsub, mul, div, max, min
 - π.χ. `__m256 _mm256_add_ps (__m256 a, __m256 b)`
 - π.χ. `__m256i _mm256_max_epi32 (__m256i a, __m256i b)` αλλά και `__m256i _mm256_max_epu32 (__m256i a, __m256i b)`
 - sqrt, rsqrt, rcp, ceil, floor, round
 - π.χ. `__m256d _mm256_sqrt_pd (__m256d a)`
 - fmadd, fmsub, fmaddsub, fnmadd, fnmsub (-mfma flag)
 - π.χ. `__m256 _mm256_fmadd_ps (__m256 a, __m256 b, __m256 c)`
- **Λογικές πράξεις**
 - and, or, xor, andnot
 - π.χ. `__m256 _mm256_and_ps (__m256 a, __m256 b)`
 - π.χ. `__m256i _mm256_and_si256 (__m256i a, __m256i b)`

Αρχικοποιήσεις «πακέτων» 256 (και 128) bits

- **Πρόκειται για «ψευδο»-intrinsics**
 - Δεν αντιστοιχούν σε μία μοναδική εντολή μηχανής, ο μεταγλωττιστής θα προσθέσει μια ακολουθία εντολών για την αρχικοποίηση ενός «πακέτου» δεδομένων 256/128 bits
 - Πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή σε σημεία κώδικα κρίσιμα για την απόδοση
 - π.χ. `__m256 _mm256_set1_ps` (float a)
 - π.χ. `__m256 _mm256_set_ps` (float e7, float e6, float e5, float e4, float e3, float e2, float e1, float e0)
 - π.χ. `__m256 _mm256_setr_ps` (float e7, float e6, float e5, float e4, float e3, float e2, float e1, float e0) (ανάποδη σειρά αρχικοποίησης)
- **Μοναδική εξαίρεση: η ανάθεση του 0**
 - Υλοποιείται πολύ αποδοτικά με εντολή xor
 - π.χ. `__m256 _mm256_setzero_ps` (void)

Intrinsics για ανάγνωση/εγγραφή στη μνήμη

- **Μεταφορά ενός «πακέτου» από/προς τη μνήμη**
 - Μη ευθυγραμμισμένες μεταφορές
 - Από/προς οποιαδήποτε διεύθυνση μνήμης
 - π.χ. `__m256 _mm256_loadu_ps (float const * mem_addr)`
 - π.χ. `void _mm256_storeu_ps (float * mem_addr, __m256 a)`
 - Ευθυγραμμισμένες μεταφορές (πιο αποδοτικές!)
 - Στα 32 bytes (για 256 bits) και 16 bytes (για 128 bits)
 - Πιθανό σφάλμα αν η διεύθυνση που θα δοθεί δεν είναι ευθυγραμμισμένη
 - π.χ. `__m256 _mm256_load_ps (float const * mem_addr)`
 - π.χ. `void _mm256_store_ps (float * mem_addr, __m256 a)`
- **Πρακτικά δεν χρειάζονται αν χρησιμοποιούμε δείκτες**
 - Ο μεταγλωττιστής θα προσθέσει αυτόματα τις κατάλληλες εντολές load/store π.χ. στο `*pc = _mm256_add_ps(*pa, *pb);`

Παράδειγμα παραγόμενου κώδικα assembly

```
for (int j=0;j<R;j++) { // R = 10000
    for (int i=0;i<N/8;i++) { // N = 10000
        pa[i] = _mm256_add_ps(pb[i],pc[i]);
    }
}
```

```
mov    edx, 10000    ; j = R = 10000
```

```
.L14:
```

```
xor    eax, eax     ; i = 0
```

```
.L15:
```

```
vmovaps ymm7, YMMWORD PTR 0[r13+rax] ; ymm7 = *(pb+i)
vaddps  ymm0, ymm7, YMMWORD PTR [r12+rax] ; ymm0 = ymm7 + *(pc+i)
vmovaps YMMWORD PTR [rbx+rax], ymm0 ; *(pa+i) = ymm0
add     rax, 32     ; i += 32 bytes (for next __m256 address)
cmp     rax, 40000 ; N/8*32 = 10000/8*32
jne     .L15       ; if (i!=40000) goto .L15 (N/8 loop)
sub     edx, 1     ; j -= 1
jne     .L14       ; if (j!=0) goto .L14 (R loop)
```

Συγκρίσεις SSE/AVX

- Είναι και αυτές «κάθετες» πράξεις
 - Ανάλογα με το αποτέλεσμα αποθηκεύουν όλο άσσους (αληθές) ή όλο μηδενικά (ψευδές) στο αντίστοιχο τμήμα
 - π.χ. `__m256i _mm256_cmpgt_epi64 (__m256i a, __m256i b)`
 - π.χ. `__m256d _mm256_cmp_pd (__m256d a, __m256d b, const int imm8)` με τα 5 λιγότερο σημαντικά bits του `imm8` να προσδιορίζουν τη συνθήκη `imm8 = _CMP_xxx_yz`
 - `xxx`: EQ, NEQ, LT, LE, GT κλπ
 - `y`: O (ordered, σύγκρ. με NaNs false), U (unordered, συγκρ. με NaNs true)
 - `z`: Q (quiet), S (signalling) (δημιουργία exceptions με διάφορα είδη NaNs)
 - Προσοχή: η ποσότητα «όλο άσσοι» σε floats αντιστοιχεί σε NaN (Not a Number) – δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως «κανονικός» αριθμός float!
 - Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί ως μάσκα που ελέγχει τη λειτουργία της επόμενης πράξης

Συγκρίσεις SSE/AVX

- Χρήση του αποτελέσματος της σύγκρισης
 - Είναι μια «μάσκα» για εκτέλεση επόμενων πράξεων υπό συνθήκη (if ...)
 - Μπορεί να χρησιμοποιηθούν λογικές πράξεις (and/andnot, or) για να βάλουμε σε επιλεγμένα τμήματα μιας 256- (ή 128-)bit ποσότητας κάποια τιμή
 - Ή να χρησιμοποιήσουμε το intrinsic `blendv`
 - π.χ. `__m256 _mm256_blendv_ps` (`__m256 a`, `__m256 b`, `__m256 mask`) που επιστρέφει ένα «πακέτο» 256-bit με 8 floats: όπου η μάσκα (mask) είναι 0 (ψευδής) η έξοδος έχει το αντίστοιχο τμήμα του a, αλλιώς το αντίστοιχο τμήμα του b

Βιβλιογραφία

- Michael McCool, James Reinders, and Arch Robison. 2012. *Structured Parallel Programming: Patterns for Efficient Computation* (1st ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- Intel® Intrinsic Guide
(<https://software.intel.com/sites/landingpage/IntrinsicGuide/>)