

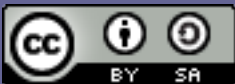
Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής
Παράλληλος Προγραμματισμός
2023-24

Εισαγωγή

(Βασικές έννοιες παράλληλου υπολογισμού)

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

Μ.Στεφανιδάκης



Παράλληλη επεξεργασία

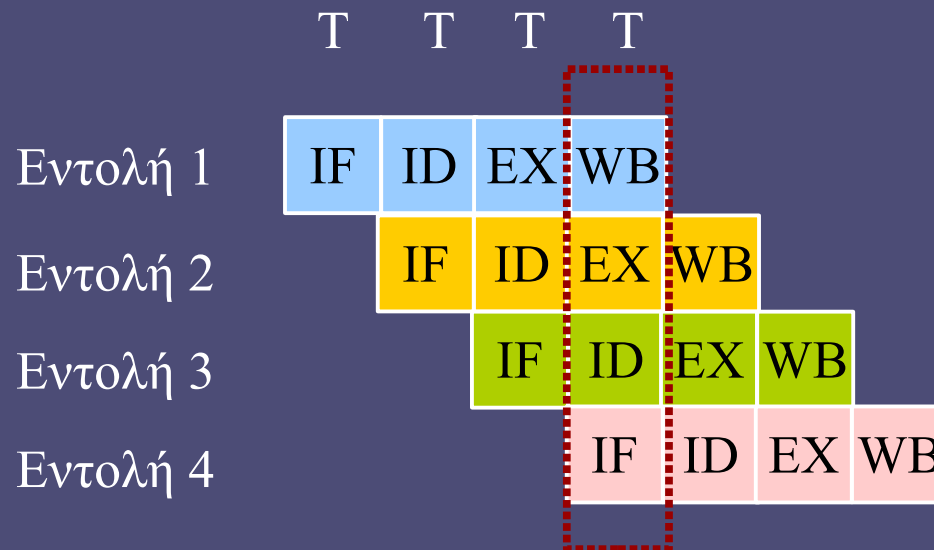
- Ταυτόχρονη εκτέλεση διεργασιών
 - Κώδικας που εκτελείται την ίδια στιγμή σε διαφορετικές υπολογιστικές μονάδες (πόρους επεξεργασίας)
- Γιατί είναι επιθυμητή;
 - Επίλυση υπολογιστικά δύσκολων προβλημάτων
 - Αλλά και απλούστερων προβλημάτων με **πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων εισόδου**
 - Μοντελοποίηση φυσικών φαινομένων
 - Τεχνητή νοημοσύνη
 - Βιοιατρική
 - κ.λ.π.

Η αναγκαιότητα της παράλληλης επεξεργασίας

- Το τέλος της «κούρσας των GHz»
 - Στις αρχές της δεκαετίας του 2000
 - Εμπόδια στα οφέλη από την αύξηση της συχνότητας του ρολογιού
 - Υπέρμετρη κατανάλωση ενέργειας – αδυναμία απαγωγής θερμότητας
 - Οι αλληλοεξαρτήσεις μεταξύ εντολών τονίζονται – μείωση της προσδοκώμενης αύξησης της απόδοσης
 - Το σειριακό πρόγραμμα δεν γίνεται πλέον γρηγορότερο «αυτόματα» με την πάροδο του χρόνου
 - “Free ride is over!”
- Πώς θα χρησιμοποιηθεί η αφθονία τρανζίστορ;
 - Παράλληλη επεξεργασία σε χαμηλότερες συχνότητες

Παρεχόμενη παραλληλία: pipelines

- **Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών (ILP)**
 - Μια βασική τεχνική παράλληλης επεξεργασίας
 - Την ίδια στιγμή εκτελούνται λειτουργίες πολλαπλών εντολών μηχανής
 - Ιδανικά, σε κάθε κύκλο ρολογιού (περίοδος T) ολοκληρώνεται μια εντολή



Παρεχόμενη παραλληλία: superscalar CPUs

- Εκκίνηση περισσότερων από μια εντολή σε κάθε κύκλο ρολογιού
 - Την εποχή της «κούρσας των GHz»
 - Υπάρχουν πολλαπλά pipelines
 - Η επιλογή γίνεται αυτόματα από την ΚΜΕ που παρακολουθεί τις εντολές σε ορισμένο βάθος χρόνου (“window”)
 - Τεχνικές για την αύξηση των εντολών που μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα
 - Εκτέλεση εκτός σειράς (out of order execution)
 - Μετονομασίες καταχωρητών (register renaming)
 - Πρόβλεψη διακλαδώσεων (branch prediction)

Παρεχόμενη παραλληλία: vector instructions

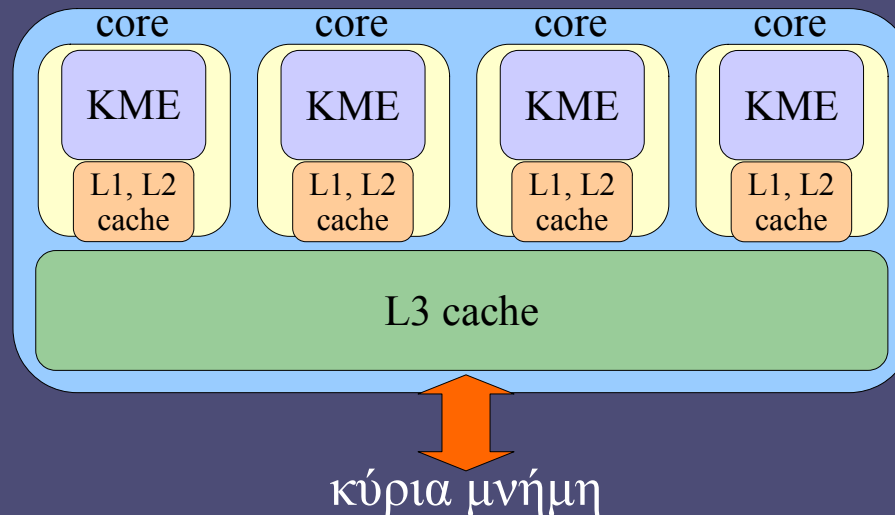
- **Εντολές με πολύ μεγάλο εύρος δεδομένων**
 - Την εποχή της «κούρσας των GHz»
 - Η ίδια λειτουργία σε πολλαπλά δεδομένα (SIMD)
 - Μονάδες εκτέλεσης πράξεων μεγάλου εύρους (π.χ. 512 bits)
 - “Streaming instructions”
 - Αρχικά για δεδομένα multimedia

Παρεχόμενη παραλληλία: SMT

- **Simultaneous Multithreading**
 - Το ξέρουμε καλύτερα με τον όρο marketing: “hyperthreading”
 - **Παραλληλισμός σε επίπεδο thread (TLP)**
 - Η «κούρσα των GHz» φτάνει στο τέλος της
 - Η ΚΜΕ μοιράζει τις μονάδες εκτέλεσης μεταξύ 2 (ή 4 ή 8..) διεργασιών
 - Κρατώντας ξεχωριστή κατάσταση (καταχωρητές) ανά διεργασία
 - Στο λειτουργικό σύστημα φαίνονται ως ανεξάρτητοι «λογικοί» πυρήνες

Παρεχόμενη παραλληλία: multicore

- Περισσότεροι πυρήνες (cores) στον επεξεργαστή
 - Η «κούρσα των GHz» έχει τελειώσει οριστικά
 - Παραλληλισμός σε επίπεδο thread (TLP)
 - Αυξάνεται η πίεση στη σύνδεση με την κύρια μνήμη – προσθήκη μεγαλύτερης ιεραρχίας κρυφών μνημών επεξεργαστής



Παρεχόμενη παραλληλία: accelerators

- Μονάδες υπολογισμού πέρα από τον τυπικό επεξεργαστή
 - GPUs (παράλληλοι υπολογισμοί)
 - Tensor cores (εφαρμογές AI)
 - και λοιπές μονάδες επιτάχυνσης υπολογισμών
- Διασύνδεση μέσω διαύλων μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας
- Πληθώρα εξειδικευμένων αρχιτεκτονικών

Η ταξινόμηση κατά Flynn (1972)

- **Single Instruction Single Data (SISD)**
 - Ο παραδοσιακός υπολογιστής χωρίς κανένα είδος παραλληλίας
 - Το κλασσικό «μοντέλο von Neumann»
 - Κάθε εντολή εκτελείται σειριακά σε μια μοναδιαία ποσότητα δεδομένων
 - Μία και μοναδική λειτουργία σε κάθε χρονική στιγμή
 - Η απόδοση των εφαρμογών εξαρτάται από την ταχύτητα της επεξεργασίας

Η ταξινόμηση κατά Flynn (συνέχεια)

- **Single Instruction Multiple Data (SIMD)**
 - Η ίδια λειτουργία (εντολή) εκτελείται σε πολλαπλά δεδομένα παράλληλα
 - Το υλικό διαθέτει έναν και μοναδικό Program Counter και πολλαπλές μονάδες εκτέλεσης πράξεων
 - Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα σήμερα διαθέτουν κάποια χαρακτηριστικά SIMD (αλλά όχι μόνον)
 - 4, 8 ή 16 μονάδες εκτέλεσης (εντολές streaming σε συμβατικές ΚΜΕ)
 - Χιλιάδες μονάδες εκτέλεσης (streaming cores σε GPUs)
 - Υπερυπολογιστές (υψηλό κόστος)
 - Εξειδικευμένοι vector processors (ευρείς αγωγοί δεδομένων, από τη μνήμη έως τους καταχωρητές και τις μονάδες υπολογισμού)

Η ταξινόμηση κατά Flynn (συνέχεια)

- **Multiple Instruction Multiple Data (MIMD)**
 - Ξεχωριστές ακολουθίες εντολών εκτελούνται σε ξεχωριστές ομάδες δεδομένων
 - Πολλαπλές ΚΜΕ που εκτελούν ανεξάρτητα προγράμματα
 - Πολλαπλοί επεξεργαστικοί κόμβοι
 - Επεξεργαστές πολλών πυρήνων (Multicores)
 - Συνδυασμοί CPU + GPU/άλλων συνεπεξεργαστών στο ίδιο σύστημα
 - Κατανεμημένα συστήματα, συνδεδεμένα με κάποιο είδος δικτύου

Συστήματα κοινής μνήμης

- **Shared Memory Systems**

- Συστήματα MIMD όπου όλοι οι επεξεργαστικοί κόμβοι «βλέπουν» μια κοινή και ενιαία μνήμη
 - Οι επεξεργαστές βρίσκονται μέσα σε μοναδικό ενιαίο σύστημα
- Οι εκτελούμενες παράλληλες διεργασίες
 - Έχουν πρόσβαση στα διαμοιραζόμενα δεδομένα
 - Και χρησιμοποιούν την κοινή μνήμη για **συγχρονισμό**
- Οι κρυφές μνήμες μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα στη συνοχή των δεδομένων
 - Όταν διαφορετικοί επεξεργαστικοί κόμβοι (με διαφορετικές κρυφές μνήμες) τροποποιούν τα ίδια δεδομένα

Είδη κοινής μνήμης

- **Uniform Memory Access (UMA)**
 - Η κοινή μνήμη είναι φυσικά ενιαία
 - Όλοι οι επεξεργαστικοί κόμβοι την προσπελάνουν με το ίδιο κόστος (σχήμα Symmetric Multiprocessor, SMP)
 - Η σύνδεση με την κύρια μνήμη αποτελεί σημείο συνωστισμού
- **Non-Uniform Memory Access (NUMA)**
 - Κάθε επεξεργαστής του συστήματος έχει τη δική του τοπική μνήμη
 - Για τις υπόλοιπες μνήμες βασίζεται στην ενδο-επικοινωνία μεταξύ επεξεργαστών
 - Υπάρχει και εδώ θέμα διατήρησης της συνοχής των δεδομένων μεταξύ κρυφών μνημών
 - Όσο κάθε επεξεργαστής επικοινωνεί με τη «δική» του μόνο τοπική μνήμη, ο συνωστισμός είναι ελάχιστος

Συστήματα κατανεμημένης μνήμης

- **Distributed memory systems**
 - Αποτελούνται από ανεξάρτητα επεξεργαστικά συστήματα διασυνδεδεμένα μέσω ενός δικτύου
- **Δεν υπάρχει η έννοια της «ενιαίας» και «κοινής» μνήμης**
 - Τα διαμοιραζόμενα δεδομένα πρέπει να μεταφέρονται ανάμεσα στους κόμβους μέσω μηνυμάτων
 - Message passing APIs

Ο ρόλος του λογισμικού

- Η αποδοτική παράλληλη επεξεργασία βασίζεται στη **συνεργασία**
 - Λειτουργικού συστήματος
 - Μεταγλωττιστή
 - Αλγορίθμων και Δομών δεδομένων
 - Και του κώδικά μας ☺
- Και τη γνώση των **χαρακτηριστικών του υλικού (hardware)**
 - Εγκαταλείπουμε την αρχή «αποσύνδεσης του προγράμματος από το υλικό εκτέλεσης»;
 - Χρειαζόμαστε νέα frameworks που θα κρύβουν τις λεπτομέρειες του παραλληλισμού;

Εμπόδια στη διαδικασία παραλληλισμού

- Μπορούμε πάντα να μετατρέψουμε αποδοτικά ένα σειριακό πρόγραμμα στο αντίστοιχο παράλληλο;
 - Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων
 - Τα διάφορα στάδια εξαρτώνται από τιμές προηγούμενου υπολογισμού
 - Αναμονή για υπολογισμό εισόδων
 - Προσπέλαση μνήμης
 - Πολλά προγράμματα (και αλγόριθμοι) έχουν απόδοση που εξαρτάται από την επικοινωνία με τη μνήμη
 - Ο χρόνος μεταφοράς δεδομένων επισκιάζει κάθε όφελος παραλληλισμού
 - Ο τρόπος προσπέλασης μνήμης επηρεάζει τον χρόνο μεταφοράς

Απόδοση παράλληλων προγραμμάτων

$$\text{Speedup } S_p = \frac{\text{χρόνος σειριακής εκτέλεσης}}{\text{χρόνος παράλληλης εκτέλεσης}}$$

- S_p : επιτάχυνση (speedup) με p επεξεργαστικούς κόμβους
 - Στην καλύτερη περίπτωση $S_p = p$
 - Μερικές φορές, για ανεξάρτητους λόγους (περισσότεροι πόροι μνήμης, διαφορετικός αλγόριθμος...) προκύπτει $S_p > p$ (superlinear speedup) → δεν μοντελοποιούμε σωστά το σύστημα
- Επίσης: αποδοτικότητα (efficiency) $E_p = S_p / p$

Παράγοντες περιορισμού του speedup

$$\text{Speedup } S_P = \frac{t_s}{f \times t_s + (1-f)t_s/p} = \frac{1}{f + (1-f)/p}$$

- Κάθε αλγόριθμος περιέχει ένα ποσοστό εργασίας f που πρέπει να εκτελεστεί σειριακά
 - Επιβάρυνση παραλληλισμού (overhead)
 - Επικοινωνία και συγχρονισμός επεξεργαστικών κόμβων για την ανταλλαγή δεδομένων
 - $S_P \rightarrow 1/f$ όταν $p \rightarrow \infty$ («νόμος» του Amdahl)

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.
- Peter Pacheco. 2011. *An Introduction to Parallel Programming* (1st ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- John L. Hennessy and David A. Patterson. 2003. *Computer Architecture: A Quantitative Approach* (3 ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.