

## Αρχιτεκτονικές Συνόλου Εντολών (Instruction Set Architectures - ISA)

<http://di.ionio.gr/~mistralt/tp/comparch/>

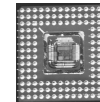
Μ.Στεφανιδάκης



## Ο (μικρο)επεξεργαστής

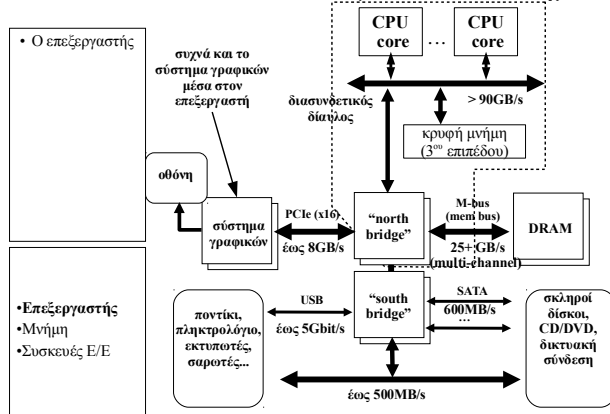
- Ο επεξεργαστής

Τι περιέχεται στη συσκευασία ενός μικροεπεξεργαστή σήμερα;



- (Micro)processor
  - Ψηφιακό σύστημα που εκτελεί υπολογισμούς σε πολλαπλά βήματα
    - Αρχικά: Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (KME)
    - Central Processing Unit (CPU)
  - Μέρος ενός ευρύτερου υπολογιστικού συστήματος (ή “υπολογιστή”)
    - γενικού ή ειδικού σκοπού
  - Περιέχει σήμερα πολλαπλές υπομονάδες επεξεργασίας

## Ένα τυπικό υπολογιστικό σύστημα



## Είδη μικροεπεξεργαστών

- Ο επεξεργαστής

- Γενικού σκοπού
  - Οι περισσότεροι γνωστοί επεξεργαστές (π.χ. για PCs)
- Συνεπεξεργαστές (co-processors)
  - Ειδικές λειτουργίες
- Μικροελεγκτές (microcontrollers)
  - Συστήματα ελέγχου
- Μέσα σε Systems-on-Chip
  - Επεξεργαστικοί πυρήνες

## Το μοντέλο von Neumann

- Ο επεξεργαστής

;

Σε ποια μορφή αποθηκεύονται οι εντολές;

- Το πρόγραμμα εκτέλεσης, όπως και τα δεδομένα, αποθηκεύονται στη μνήμη του υπολογιστή
  - **Stored-program computer**

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Αρχιτεκτονικές Συνόλου Εντολών”

5

## Εκτέλεση ακολουθίας λειτουργιών

- Ο επεξεργαστής

;

Ποιος ο ρόλος του σήματος ρολογιού;

-

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Αρχιτεκτονικές Συνόλου Εντολών”

6

## Εκτέλεση εντολών: ο κύκλος μηχανής

- Ο επεξεργαστής

;

Τι συμβαίνει με τις εξωτερικές διακοπές (interrupts);

Ο χρόνος εκτέλεσης είναι ο ίδιος για όλες τις εντολές;

-

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Αρχιτεκτονικές Συνόλου Εντολών”

7

## Εκτέλεση εντολών

- Ο επεξεργαστής

- **Επόμενη εντολή προς εκτέλεση**
  - **Program Counter (PC):** η διεύθυνση της θέσης μνήμης όπου περιέχεται η επόμενη εντολή
    - Σειριακή αύξηση διεύθυνσης μετά την εκτέλεση εντολής
    - Ή μεταπήδηση σε νέα θέση μνήμης (διακλάδωση)
- **Εκκίνηση εκτέλεσης**
  - Με την εφαρμογή τάσης ο PC παίρνει μια προκαθορισμένη τιμή
    - BIOS
- **Τερματισμός επανάληψης κύκλου μηχανής**
  - Συμβατικά, ποτέ!
  - Περιπτώσεις SLEEP για μείωση κατανάλωσης ενέργειας

;

-

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Αρχιτεκτονικές Συνόλου Εντολών”

8

## Αρχιτεκτονική Συνόλου Εντολών

- Ο επεξεργαστής
- ISA

### • Instruction Set Architecture (ISA)

- Το ορατό μέρος ενός υπολογιστικού συστήματος για τον προγραμματιστή (και τον μεταγλωττιστή)
- Δεκαετία 60-70: συνώνυμο του όρου “αρχιτεκτονική Η/Υ”
  - « η δομή ενός υπολογιστή, την οποία ο προγραμματιστής πρέπει να γνωρίζει για να γράψει ένα σωστό (χρονικά ανεξάρτητο) πρόγραμμα σε γλώσσα μηχανής για τον υπολογιστή αυτόν» (IBM)

## Η διεπαφή ISA στην ιεραρχία επιπέδων

- Ο επεξεργαστής
- ISA

;

Τι ακριβώς περιγράφει η διεπαφή ISA;



- Αρχιτεκτονική Εντολών (ISA)
  - Η διεπαφή υλικού-λογισμικού

## Αρχιτεκτονική Συνόλου Εντολών

- Ο επεξεργαστής
- ISA

### • Τι περιγράφει;

- Διαθέσιμες πράξεις/λειτουργίες
  - Κωδικοποίηση λειτουργιών
- Μορφή των δεδομένων εισόδου-εξόδου
  - Operands
- Μέθοδοι προσπέλασης μνήμης
  - Προέλευση των δεδομένων
- Χώροι προσωρινής αποθήκευσης
  - Καταχωρητές
- Διακοπές και καταστάσεις σφάλματος
  - Ποια η “αντίδραση” του επεξεργαστή

## Σχεδιασμός Συνόλου Εντολών

- Ο επεξεργαστής
- ISA

### • Συμβιβασμός μεταξύ:

- Κόστους και απόδοσης υλικού
- Βαθμού υποστήριξης λογισμικού
- Άλλων παραγόντων όπως η κατανάλωση ενέργειας
  - Το υλικό καταναλώνει ενέργεια, υπό τον έλεγχο του λογισμικού όμως!
- Μη επικάλυψης λειτουργιών εντολών (orthogonality)

## Κωδικοποίηση Εντολών

- Ο επεξεργαστής
- ISA

opcode	operand1	operand2	..	operandN
--------	----------	----------	----	----------

- Σειρά δυαδικών ψηφίων
  - Μεταβλητού μήκους
    - Περισσότερο συμπαγή προγράμματα
    - Πολυπλοκότερο υλικό!
  - Σταθερού μήκους
    - Απλούστερη και ταχύτερη λήψη-αποκωδικοποίηση
    - Μεγαλύτερα προγράμματα
    - Μέθοδοι συμπίεσης

;

Γιατί είναι ταχύτερη η λήψη και αποκωδικοποίηση των εντολών σταθερού μήκους;

## Κωδικοποίηση Εντολών

- Ο επεξεργαστής
- ISA

opcode	operand1	operand2	..	operandN
--------	----------	----------	----	----------

Περιγράφει το είδος της πράξης που θα εκτελεστεί

Περιγράφουν την προέλευση των δεδομένων εισόδου (αριθμό καταχωρητή, διεύθυνση μνήμης κλπ) και τον προορισμό των δεδομένων εξόδου (αποτελέσματος πράξης)

Το είδος της πράξης προσδιορίζει τον τύπο, την προέλευση και τον αριθμό των δεδομένων που συμμετέχουν στην πράξη!

## Εντολές: κατηγορίες λειτουργιών

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών

- Βασικές κατηγορίες
  - Αριθμητικές και λογικές πράξεις
  - Μεταφορά δεδομένων
    - Από-πρός Καταχωρητές και Μνήμη
  - Έλεγχος ροής εκτέλεσης
    - Διακλαδώσεις και κλήσεις ρουτινών
- Άλλες κατηγορίες
  - Ειδικές εντολές συστήματος
    - ΛΣ, ιδεατή μνήμη
  - Επεξεργασία πολλαπλών δεδομένων
    - Χρήσιμο για γραφικά, σειρές χαρακτήρων, multimedia

## Αριθμητικές εντολές και μεταφορά δεδομένων

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών

- Αριθμητικές-λογικές πράξεις
  - Πηγές δεδομένων και προορισμός
    - add R1, R2, R3 // R3 = R1+R2

add	R1	R2	R3
-----	----	----	----

- Μεταφορά δεδομένων
  - Πηγή δεδομένων και προορισμός
  - Μήκος μεταφερόμενης λέξης (ενδεχομένως)
    - load R1, 0x7FF0 // R1 = mem[0x7FF0]

load	R1	0x7FF0
------	----	--------

;

Τι συμβολίζουν τα R1, R2 ...; Πώς αναπαρίστανται μέσα στην εντολή;

## Εντολές διακλάδωσης

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών

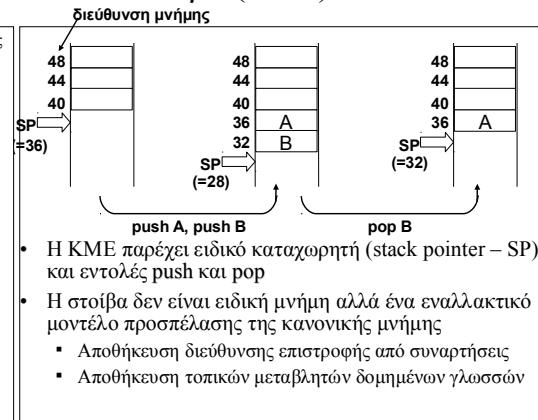
### • Διακλάδωση

- Με ή χωρίς συνθήκη
  - `bne R1, R2, +8` // branch if not  $R1=R2$
- Σε απόλυτη διεύθυνση
  - `jump 0xFF97DE00`
- Σχετικά ως προς την τρέχουσα θέση (offset)
  - `jump +130` // offset = +130
  - Ο παραγόμενος κώδικας μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε στη μνήμη

bne	R1	R2	+8
-----	----	----	----

## Η στοίβα (stack)

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών



## Εντολές διακλάδωσης (2)

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών

### • Κλήση συνάρτησης (call)

- Αποθήκευση της επόμενης διεύθυνσης εκτέλεσης (καταχωρητή PC) στη στοίβα (push)
- Μετάβαση στη διεύθυνση της συνάρτησης

### • και επιστροφή (return)

- Χρήση αποθηκευμένης τιμής από στοίβα (pop)
  - Τοποθετείται στον καταχωρητή PC
- Η εκτέλεση επιστρέφει στην επόμενη εντολή μετά το call

## Προέλευση και αποθήκευση δεδομένων

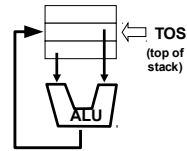
- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων

### • Προέλευση δεδομένων – αποθήκευση αποτελεσμάτων μιας πράξης

- Operand addressing
- Εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του επεξεργαστή
- Στους πρώτους επεξεργαστές
  - Stack (σωρός-στοίβα)
  - Accumulator (συσσωρευτής)
- Μεταγενέστεροι υπολογιστές
  - Δεδομένα από Καταχωρητές – Μνήμη
  - Δεδομένα από Καταχωρητές μόνο (load-store)

## Αρχιτεκτονική σωρού (stack)

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων

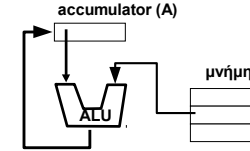


push A  
push B  
add  
pop A

- Οι πηγές προσδιορίζονται έμμεσα
  - Δεν περιγράφονται στην εντολή!
  - 0-address architecture
  - Δημοφιλές σχήμα κατά τη δεκαετία του 60
  - Δύσκολη προσπέλαση σωρού, απαιτούνται πολλαπλές αντιμεταθέσεις και αντιγραφές
  - Το σχήμα επιζεί στην αρχιτεκτονική της Java VM

## Αρχιτεκτονική συσσωρευτή (accumulator)

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων

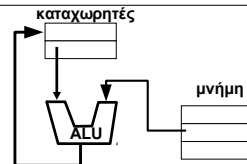


add X  
(A = A + X)

- Μια πηγή δεδομένων και ταυτόχρονα θέση αποθήκευσης του αποτελέσματος είναι πάντα ο συσσωρευτής
  - 1-address architecture
  - Αρχιτεκτονική των πρώτων υπολογιστών!

## Αρχιτεκτονικές με καταχωρητές (registers)

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων



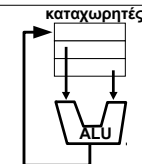
add R2, R1, mem(100)  
(R2 = R1 + mem[100])

- Memory-register
  - Οποιαδήποτε εντολή μπορεί να προσπελάσει τη μνήμη
- Όμως:
  - Πολλαπλές προσπελάσεις μνήμης
  - Λήψη εντολής – Λήψη δεδομένων εντολής
  - Πολύπλοκη εκτέλεση εντολής σε στάδια
  - Συνωστισμός στον δίαυλο επικοινωνίας με μνήμη

! Καταχωρητές: προσωρινές θέσεις αποθήκευσης αποτελεσμάτων, η γενίκευση της ιδέας του συσσωρευτή.

## Αρχιτεκτονικές με καταχωρητές (registers)

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων



add R1, R2, R3  
(R1 = R2 + R3)

- Register-register (load-store)
  - Μόνο εντολές load-store μπορούν να προσπελάσουν τη μνήμη
- Η αρχιτεκτονική των σύγχρονων επεξεργαστών
  - Οι καταχωρητές προσπελαίνονται πολύ γρήγορα
  - Χρειάζονται λιγότερα bits για να επιλεγούν
  - Οι μεταγωγιστές αναθέτουν μεταβλητές σε καταχωρητές

; Είναι επιθυμητός ένα πολύ μεγάλος αριθμός καταχωρητών;

## Μέθοδοι προσπέλασης μνήμης

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων
- Προσπέλαση μνήμης

- Τουλάχιστον κάποιες εντολές προσπελαύνουν τη μνήμη
  - για ανάγνωση ή εγγραφή δεδομένων
  - Πώς σχηματίζεται η διεύθυνση προσπέλασης;
  - Η γενική ιδέα: υποβοήθηση του λογισμικού
  - Διαφορετικός σχηματισμός διεύθυνσης για
    - Τοπικές μεταβλητές
    - Δείκτες (έμμεση προσπέλαση)
    - Στατικά δεδομένα
    - Διάσχιση πινάκων
    - (Σταθερές τιμές)
- Υποστήριξη ανάλογα με αρχιτεκτονική

## Μέθοδοι προσπέλασης μνήμης

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων
- Προσπέλαση μνήμης

- Στο σχηματισμό της διεύθυνσης μνήμης μπορούν να συμμετέχουν:
  - Απόλυτες τιμές διεύθυνσης
  - Καταχωρητές
  - Σταθερές τιμές μετατόπισης (offsets)

πιθανή  
χρήση

<i>displacement</i>	<code>mem[offs+reg]</code>	τοπικές
<i>register indirect</i>	<code>mem[reg]</code>	δείκτες
<i>indexed</i>	<code>mem[reg1+reg2]</code>	πίνακες
<i>direct</i>	<code>mem[addr]</code>	στατικές
<i>memory indirect</i>	<code>mem[mem[reg]]</code>	*δείκτες
<i>auto-increment</i>	<code>mem[reg++]</code>	πίνακες
<i>scaled</i>	<code>mem[offs+reg1+reg2*d]</code>	πίνακες

;

Πώς κωδικοποιούνται οι μέθοδοι προσπέλασης μνήμης μέσα στην εντολή;

## Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής εντολών

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων
- Προσπέλαση μνήμης
- Εξέλιξη αρχιτεκτονικής

- Οι πρώτοι υπολογιστές (.. - '60)
  - Αρχιτεκτονική συσσωρευτή και αργότερα σωρού
    - Ικανοποιητική λύση λόγω της απλής τεχνολογίας των μεταγωγιστών
- Πολύπλοκες αρχιτεκτονικές ('70 - ..)
  - Ενσωμάτωση σύνθετων μορφών εντολών και μεθόδων προσπέλασης μνήμης
    - Προσπάθεια υποστήριξης υψηλών γλωσσών προγραμματισμού – μείωσης κόστους λογισμικού
    - Πολλά χαρακτηριστικά μένουν αχρησιμοποίητα!
  - Complex Instruction Set Computers (CISC)

## Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής εντολών

- Ο επεξεργαστής
- ISA
- Κατηγορίες εντολών
- Προέλευση δεδομένων
- Προσπέλαση μνήμης
- Εξέλιξη αρχιτεκτονικής

- Reduced Instruction Set Computers (RISC) ('80 - ...)
- Απλούστερες και φθηνότερες load-store αρχιτεκτονικές με σταθερό μήκος εντολών
- Μεγαλύτερη απόδοση – ταχύτερη εκτέλεση εντολών
- Ευνοείται από την αφθονία υλικού χαμηλού κόστους και την προηγμένη τεχνολογία των μεταγωγιστών
- Ακόμα και ο μοναδικός επιζών επεξεργαστής με εντολές CISC (αρχιτεκτονική x86), μεταφράζει εσωτερικά σε εντολές RISC...