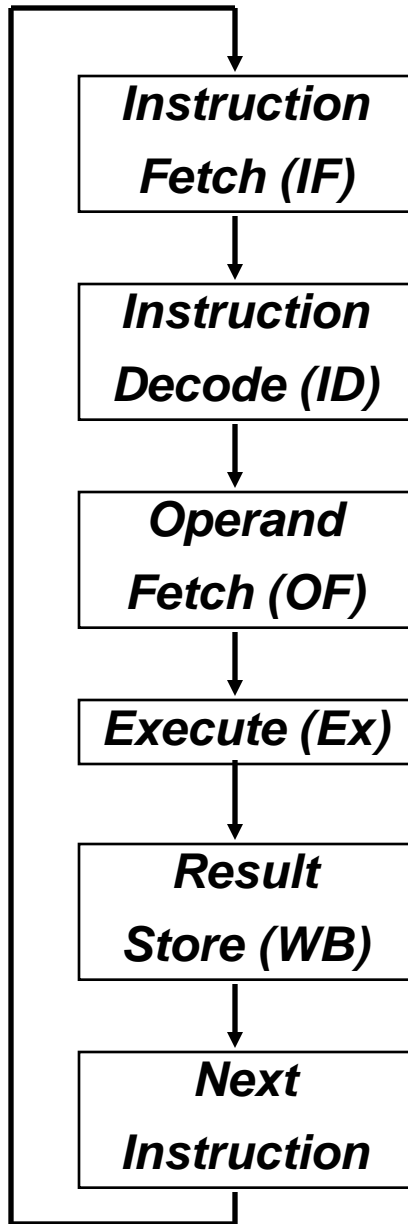


Αρχιτεκτονικές Συνόλου Εντολών



Αριθμός εντολών

Μορφή Εντολών:

μεταβλητό ή σταθερό μέγεθος bytes για κάθε εντολή; (8086 1-17 bytes, MIPS 4 bytes)

Πώς γίνεται η αποκωδικοποίηση (ID);

Που βρίσκονται τα ορίσματα (operands) και το αποτέλεσμα:

Μνήμη-καταχωρητές, πόσα ορίσματα, τι μεγέθους;

Ποια είναι στη μνήμη και ποια όχι;

Πόσοι κύκλοι για κάθε εντολή;

1. Αρχιτεκτονικές Συσσωρευτή (accumulator architectures)
(μας θυμίζει κάτι?)
2. Αρχιτεκτονικές επεκταμένου συσσωρευτή ή καταχωρητών ειδικού σκοπού (extended accumulator ή special purpose register)
3. Αρχιτεκτονικές Καταχωρητών Γενικού Σκοπού
 - 3α. register-memory
 - 3β. register-register (RISC)

Αρχιτεκτονικές Συσσωρευτή (1)

1η γενιά υπολογιστών: h/w ακριβό, μεγάλο μέγεθος καταχωρητή.

Ένας καταχωρητής για όλες τις αριθμητικές εντολές (συσσώρευε όλες τις λειτουργίες → Συσσωρευτής (*Accum*))

Σύνηθες: 1ο όρισμα είναι ο *Accum*, 2ο η μνήμη, αποτέλεσμα στον *Accum* π.χ. *add 200*

Παράδειγμα: $A = B + C$

$Accum = Memory(AddressB);$

Load AddressB

$Accum = Accum + Memory(AddressC);$

Add AddressC

$Memory(AddressA) = Accum;$

Store AddressA

Όλες οι μεταβλητές αποθηκεύονται στη μνήμη. Δεν υπάρχουν βοηθητικοί καταχωρητές

Αρχιτεκτονικές Συσσωρευτή (2)

Κατά:

Χρειάζονται πολλές εντολές για ένα πρόγραμμα

Κάθε φορά πήγαινε-φέρε από τη μνήμη

(? Κακό είναι αυτό)

Bottleneck ο Accum!

Υπέρ:

Εύκολοι compilers, κατανοητός προγραμματισμός,
εύκολη σχεδίαση h/w

Λύση; Πρόσθεση καταχωρητών για συγκεκριμένες λειτουργίες
(ISAs καταχωρητών ειδικού σκοπού)

Καταχωρητές ειδικού σκοπού π.χ. δεικτοδότηση, αριθμητικές πράξεις

Υπάρχουν εντολές που τα ορίσματα είναι όλα σε καταχωρητές

Κατά βάση (π.χ. σε αριθμητικές εντολές) το ένα όρισμα στη μνήμη.

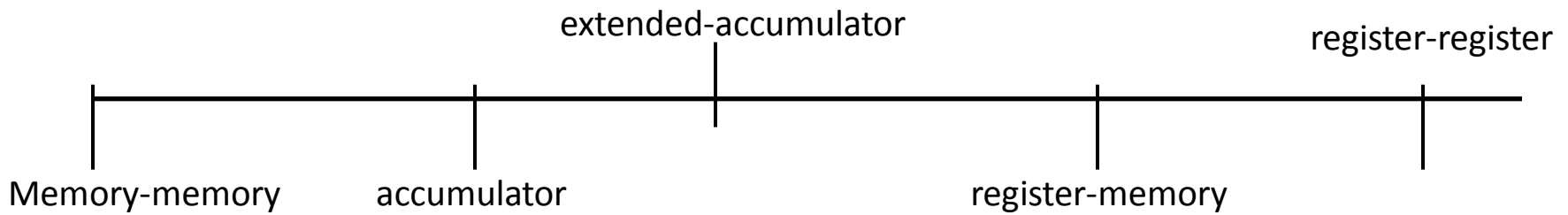
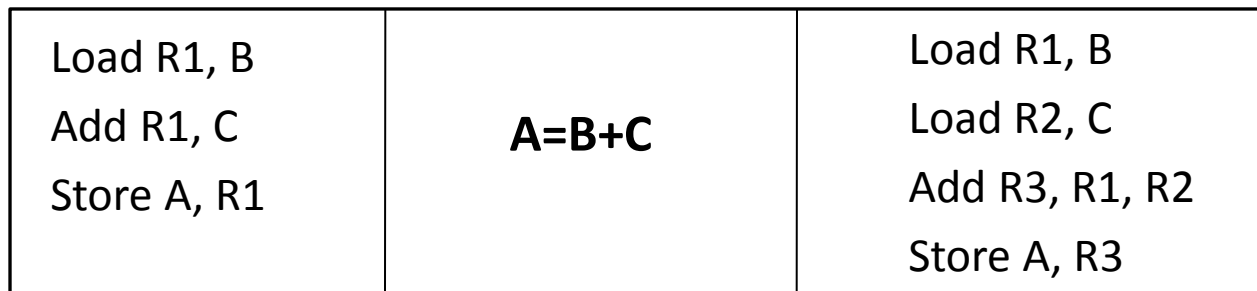
Αρχιτεκτονικές Καταχωρητών Γενικού Σκοπού

1. CISC

- Complex Instruction Set Computer
- Εντολές για πράξεις Register-Memory ή Memory-Memory
- Αφήνουν το ένα όρισμα να είναι στη μνήμη (πχ. 80386)

2. RISC

- Reduced Instruction Set Computer
- Πράξεις μόνο Register-Register (load store) (1980+)

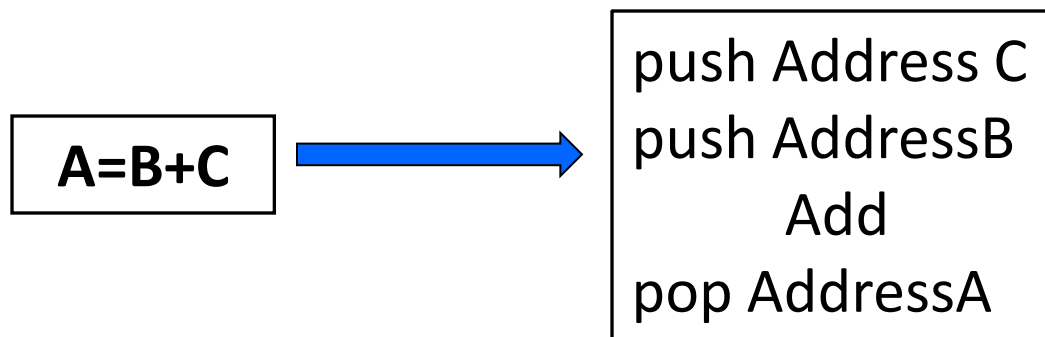


Αρχιτεκτονική Στοίβας

Καθόλου registers! Stack model ~ 1960!!!

Στοίβα που μεταφέρονται τα ορίσματα που αρχικά βρίσκονται στη μνήμη. Καθώς βγαίνουν γίνονται οι πράξεις και το αποτέλεσμα ξαναμπάινει στη στοίβα.

Θυμάστε τα HP calculators με reverse polish notation



Εντολές μεταβλητού μήκους:

- 1-17 bytes 80x86
- 1-54 bytes VAX, IBM

Γιατί??

- Instruction Memory ακριβή, οικονομία χώρου!!!!

Compilers πιο δύσκολοι!!!

Εμείς στο μάθημα: register-register ISA! (load- store). Γιατί??

1. Οι καταχωρητές είναι γρηγορότεροι από τη μνήμη
2. Μειώνεται η κίνηση με μνήμη
3. Δυνατότητα να υποστηριχθεί σταθερό μήκος εντολών
4. (τα ορίσματα είναι καταχωρητές, άρα ο αριθμός τους (πχ. 1-32 καταχωρητές) όχι δ/νσεις μνήμης

Βασικές Αρχές Σχεδίασης (Patterson-Hennessy COD2e)

1. Η ομοιομορφία των λειτουργιών συμβάλλει στην απλότητα του υλικού (Simplicity favors Regularity)
2. Όσο μικρότερο τόσο ταχύτερο! (smaller is faster)
3. Η καλή σχεδίαση απαιτεί σημαντικούς συμβιβασμούς (Good design demands good compromises)

Γενικότητες? Θα τα δούμε στη συνέχεια.....

- Η MIPS Technologies έκανε εμπορικό τον Stanford MIPS
- Μεγάλο μερίδιο της αγοράς των πυρήνων ενσωματωμένων επεξεργαστών
- Εφαρμογές σε καταναλωτικά ηλεκτρονικά, εξοπλισμό δικτύων και αποθήκευσης, φωτογραφικές μηχανές, εκτυπωτές, ...
- Τυπικό πολλών σύγχρονων ISA (Instruction Set Architecture)
- Πληροφορία στην αποσπώμενη κάρτα Αναφοράς Δεδομένων MIPS (πράσινη κάρτα), και τα Παραρτήματα B και Ex

Σύνολο Εντολών MIPS

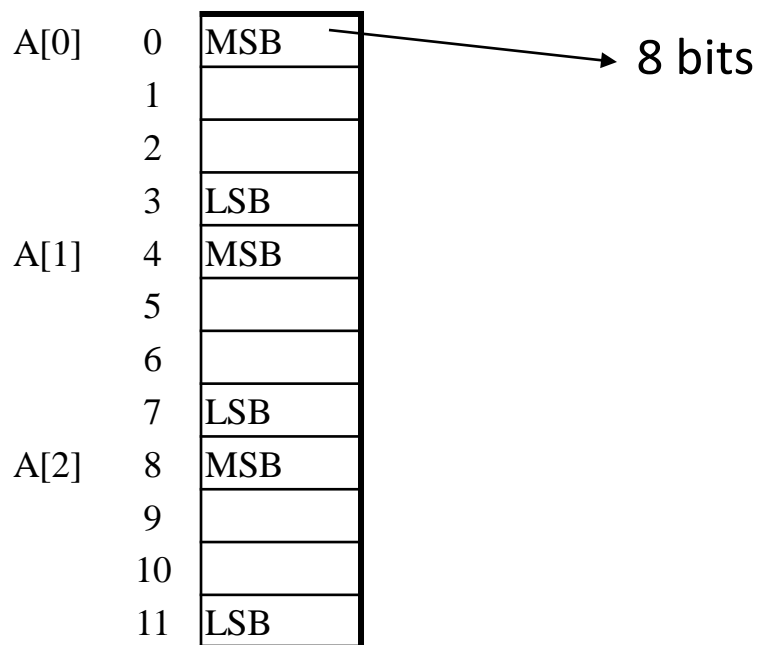
- Λέξεις των 32 bit
- Μνήμη οργανωμένη σε bytes
 - Κάθε byte είναι μια ξεχωριστή δνση
 - 2^{30} λέξεις μνήμης των 32 bits
 - Ακολουθεί το μοντέλο big Endian
- Register File
 - 32 καταχωρητές γενικού σκοπού
- Εντολές :
 - αποθήκευσης στη μνήμη (lw, sw)
 - αριθμητικές (add, sub κλπ)
 - διακλάδωσης (branch instructions)

| | |
|-------------|---------|
| Memory [0] | 32 bits |
| Memory [4] | 32 bits |
| Memory [8] | 32 bits |
| Memory [12] | 32 bits |

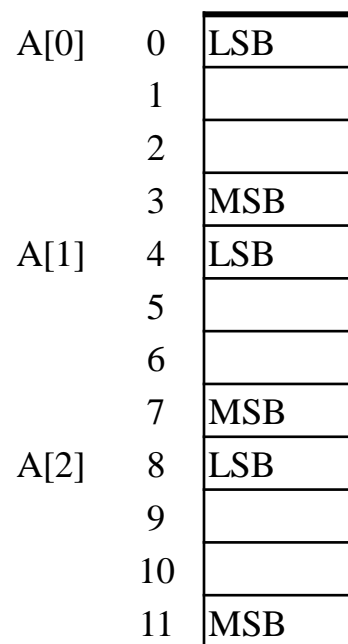
Big Endian vs Little Endian

- **Big Endian:** Η δνση του **πιο σημαντικού** byte (MSB) είναι και **δνση** της λέξης
- **Little Endian:** Η δνση του **λιγότερο σημαντικού** byte (LSB) είναι και **δνση** της λέξης
- Η λέξη αποθηκεύεται πάντα σε συνεχόμενες θέσεις:
δνση, δνση+1, δνση+2, δνση+3

BIG_ENDIAN



LITTLE_ENDIAN



- Πρόσθεση και αφαίρεση (add, sub)
 - Πάντα 3 ορίσματα – ΠΟΤΕ δνση μνήμης
 - Δύο προελεύσεις και ένας προορισμός
$$\text{add } a, b, c \# a = b + c$$
- Όλες οι αριθμητικές λειτουργίες έχουν αυτή τη μορφή
- 1^η αρχή σχεδίασης: *η απλότητα ευνοεί την κανονικότητα*
 - Η κανονικότητα κάνει την υλοποίηση απλούστερη
 - Η απλότητα επιτρέπει μεγαλύτερη απόδοση με χαμηλότερο κόστος

Τελεστές - Καταχωρητές

- Οι αριθμητικές εντολές χρησιμοποιούν καταχωρητές ως τελεστές (operands)
- Ο MIPS διαθέτει ένα αρχείο καταχωρητών (register file) με 32 καταχωρητές των 32-bit
 - Χρήση για τα δεδομένα που προσπελάζονται συχνά
 - Αρίθμηση καταχωρητών από 0 έως 31
- Ονόματα του συμβολομεταφραστή (assembler)
 - \$t0, \$t1, ..., \$t9 για προσωρινές τιμές
 - \$s0, \$s1, ..., \$s7 για αποθηκευμένες μεταβλητές
- 2^η αρχή σχεδίασης : *το μικρότερο είναι ταχύτερο*
 - παραβολή με κύρια μνήμη: εκατομμύρια θέσεων

Κώδικας σε C

$a = b + c;$

$d = a - e;$

Μετάφραση σε κώδικα MIPS

add a, b, c

sub d, a, e

Κώδικας σε C

```
f = (g + h) - (i + j);
```

Τι παράγει ο compiler?

Μετάφραση σε κώδικα MIPS

```
add $t0, $s1, $s2 # προσωρινή μεταβλητή t0
```

```
add $t1, $s3, $s4 # προσωρινή μεταβλητή t1
```

```
sub $s0, $t0, $t1
```


Οι γλώσσες προγραμματισμού έχουν:

- απλές μεταβλητές
- σύνθετες δομές (π.χ. arrays, structs)

Ο υπολογιστής τις αναπαριστά ΠΑΝΤΑ ΣΤΗ ΜΝΗΜΗ.

- Επομένως χρειαζόμαστε εντολές μεταφοράς δεδομένων από και προς τη μνήμη.

- Εντολή μεταφοράς δεδομένων από τη μνήμη
load καταχωρητής, σταθερά(καταχωρητής)
`lw $t1, 4($s2)`
- φορτώνουμε στον `$t1` την τιμή `M[$s2+4]`

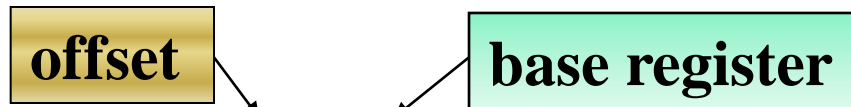
- Κώδικας C

`g = h + A[8];`

- `g` στον `$s1`, `h` στον `$s2` και η δνση βάσης του `A` στον `$s3`.

- Μεταγλωττισμένος κώδικας MIPS

- Ο δείκτης `8` απαιτεί offset 32 (4 byte ανά λέξη).

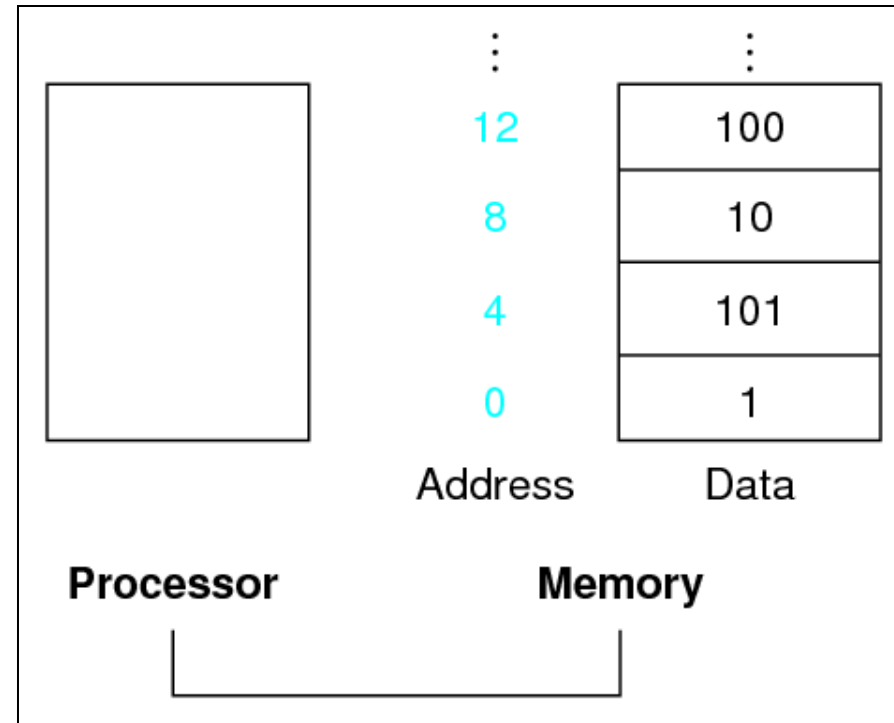


`lw $t0, 32($s3)`

`add $s1, $s2, $t0`

Οργάνωση Μνήμης

- Μνήμη είναι byte addressable
- Δύο διαδοχικές λέξεις διαφέρουν κατά 4
- alignment restriction (ευθυγράμμιση)
 - λέξεις ξεκινάνε πάντα σε διεύθυνση πολ/σιο του 4



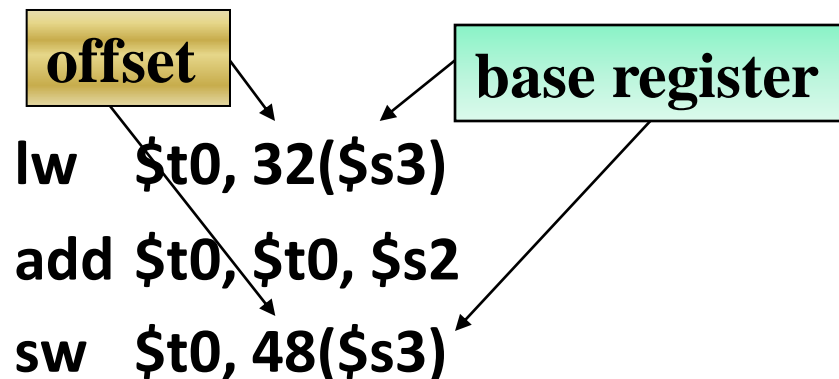
- Κώδικας C

$A[12] = h + A[8];$

- h στον $\$s2$ και η δνση βάσης του A στον $\$s3$.

- Μεταγλωττισμένος κώδικας MIPS

- Ο δείκτης 8 απαιτεί offset 32 (4 byte ανά λέξη).



Άμεσοι Τελεστές (Immediate)

- Σταθερά δεδομένα καθορίζονται σε μια εντολή

addi \$s3, \$s3, 4

- Δεν υπάρχει εντολή άμεσης αφαίρεσης (sub immediate)
- Απλώς χρησιμοποιείται μια αρνητική σταθέρα

addi \$s2, \$s1, -1

- 3^η αρχή σχεδίασης: *Κάνε τη συνηθισμένη περίπτωση γρήγορη*

- Οι μικρές σταθερές είναι συνηθισμένες
- Ο άμεσος τελεστής αποφεύγει μια εντολή φόρτωσης (load)

Η σταθερά ΜΗΔΕΝ

- Ακολουθώντας πάλι την 3^η αρχή σχεδίασης, ο MIPS έχει στον καταχωρητή \$zero αποθηκευμένη τη σταθερά 0.
 - Δεν μπορεί να εγγραφεί άλλη τιμή

- Χρήσιμη σε πολλές λειτουργίες
 - Μετακίνηση δεδομένων μεταξύ καταχωρητών
π.χ. `add $t1, $t2, $zero`

Συνοπτικά, στον MIPS ο τελεστής κάποιας εντολής μπορεί να είναι :

1. Ένας από τους 32 καταχωρητές
2. Μία από τις 2^{30} λέξεις της μνήμης
3. Ένα από τα 2^{32} bytes της μνήμης

Κανόνες Ονοματοδοσίας και Χρήση των MIPS Registers

- Εκτός από το συνήθη συμβολισμό των καταχωρητών με \$ ακολουθούμενο από τον αριθμό του καταχωρητή, μπορούν επίσης να παρασταθούν και ως εξής :

| Αρ. Καταχωρητή | Όνομα | Χρήση | Preserved on call? |
|----------------|-----------|---|--------------------|
| 0 | \$zero | Constant value 0 | n.a. |
| 1 | \$at | Reserved for assembler | όχι |
| 2-3 | \$v0-\$v1 | Values for result and expression evaluation | όχι |
| 4-7 | \$a0-\$a3 | Arguments | ναι |
| 8-15 | \$t0-\$t7 | Temporaries | όχι |
| 16-23 | \$s0-\$s7 | Saved | ναι |
| 24-25 | \$t8-\$t9 | More temporaries | όχι |
| 26-27 | \$k0-\$k1 | Reserved for operating system | ναι |
| 28 | \$gp | Global pointer | ναι |
| 29 | \$sp | Stack pointer | ναι |
| 30 | \$fp | Frame pointer | ναι |
| 31 | \$ra | Return address | ναι |

Αναπαράσταση Εντολών (1)

- Οι εντολές κωδικοποιούνται στο δυαδικό σύστημα
 - Κώδικας μηχανής (machine code)
 - Υλικό υπολογιστών → υψηλή-χαμηλή τάση, κλπ.
- Εντολές MIPS :
 - Κωδικοποιούνται ως λέξεις εντολής των 32 bit
 - Μικρός αριθμός μορφών (formats) για τον κωδικό λειτουργίας (opcode), τους αριθμούς καταχωρητών, κλπ. ...
 - Κανονικότητα!
- Αριθμοί καταχωρητών
 - \$t0 – \$t7 είναι οι καταχωρητές 8 – 15
 - \$t8 – \$t9 είναι οι καταχωρητές 24 – 25
 - \$s0 – \$s7 είναι οι καταχωρητές 16 – 23

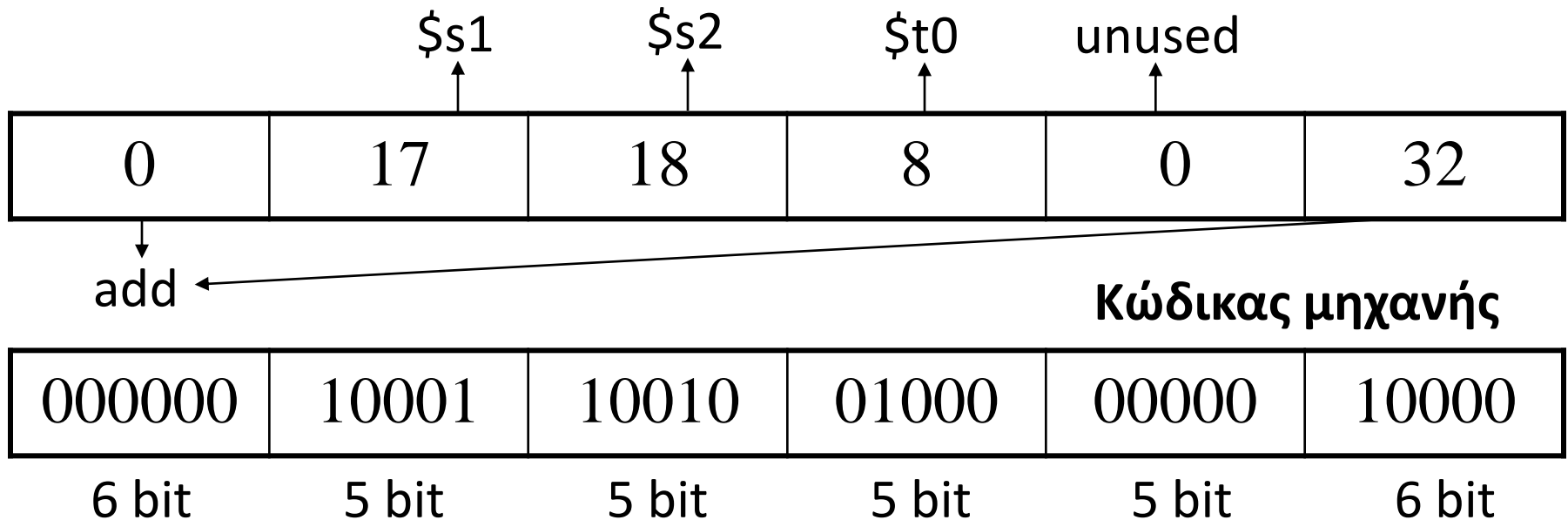
Αναπαράσταση Εντολών (2)

Συμβολική αναπαράσταση:

add \$t0, \$s1, \$s2

Assembly

Πώς την καταλαβαίνει ο MIPS?



Μορφή Εντολής – Instruction Format

Θυμηθείτε την 1^η αρχή σχεδίασης: Η ομοιομορφία των λειτουργιών συμβάλλει στην απλότητα του υλικού

R-Type

(register type)

| | | | | | |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| op | rs | rt | rd | shamt | funct |
| <i>6 bits</i> | <i>5bits</i> | <i>5bits</i> | <i>5bits</i> | <i>5bits</i> | <i>6bits</i> |

Op: opcode

rs,rt: register source operands

Rd: register destination operand

Shamt: shift amount

Funct: op specific (function code)

add \$rd, \$rs, \$rt

MIPS R-Type (ALU)

R-Type: Όλες οι εντολές της ALU που χρησιμοποιούν 3 καταχωρητές

| | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| OP | rs | rt | rd | shamt | funct |
| 6 bits | 5 bits | 5 bits | 5 bits | 5 bits | 6 bits |

- Παραδείγματα :

- add \$1,\$2,\$3

- and \$1,\$2,\$3

- sub \$1,\$2,\$3

- or \$1,\$2,\$3

Destination register in rd

Operand register in rt

Operand register in rs

Αναπαράσταση Εντολών στον Υπολογιστή (R-Type)

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| op | rs | rt | rd | shamt | funct |
| 6 bit | 5 bit | 5 bit | 5 bit | 5 bit | 6 bit |

Τι γίνεται με τη load?

Πώς χωράνε οι τελεστές της στα παραπάνω πεδία? Π.χ. η σταθερά της lw.

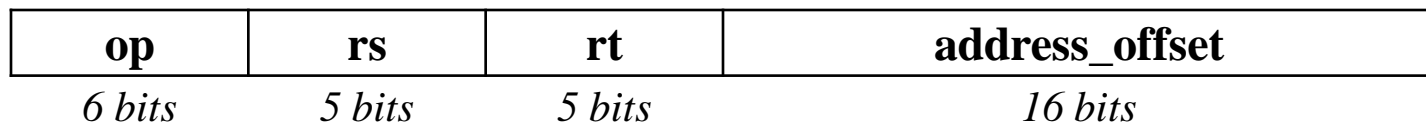
lw \$t1, 8000(\$s3)

σε ποιο πεδίο χωράει;

MIPS I-Type

- Δεν μας αρκεί το R-Type
 - Τι γίνεται με εντολές που θέλουν ορίσματα διευθύνσεις ή σταθερές?
 - Θυμηθείτε, θέλουμε σταθερό μέγεθος κάθε εντολής (32 bit)
- *Η καλή σχεδίαση απαιτεί σημαντικούς συμβιβασμούς (3η αρχή)*

I-Type:



lw \$rt, address_offset(\$rs)

Τα 3 πρώτα πεδία (op,rs, rt) έχουν το ίδιο όνομα και μέγεθος όπως και πριν

Αναπαράσταση Εντολών στον Υπολογιστή (I-Type)

Παράδειγμα:

`lw $t0, 32($s3)`

Καταχωρητές (σκονάκι 😊)

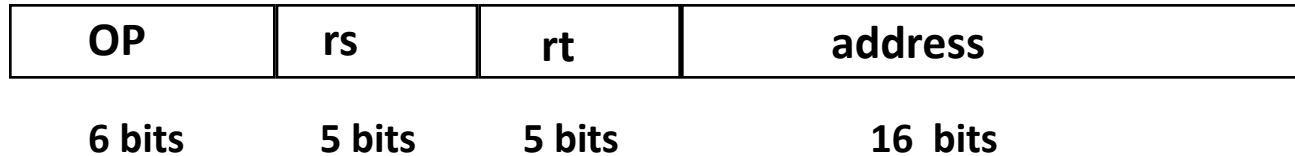
`$s0, ..., $s7` αντιστοιχίζονται στους 16 - 23

`$t0, ..., $t7` αντιστοιχίζονται στους 8 - 15

I-format

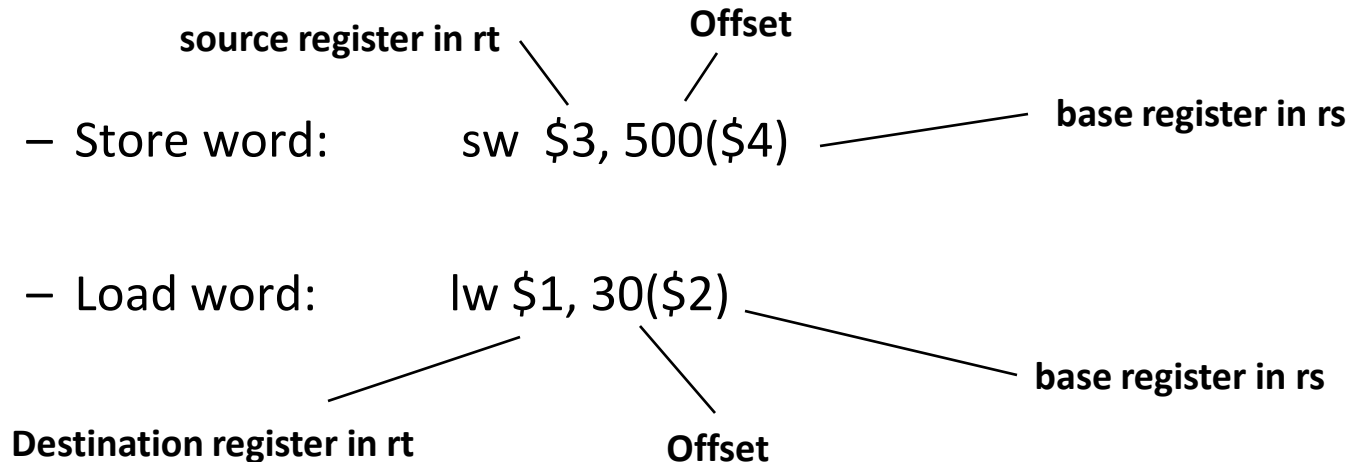
| | | | |
|--------|-------|-------|---------------------|
| op | rs | rt | σταθερά ή διεύθυνση |
| 6 bit | 5 bit | 5 bit | 16 bit |
| XXXXXX | 19 | 8 | 32 |

MIPS I-Type : Load/Store



- *address: 16-bit memory address offset in bytes added to base register.*

- **Παραδείγματα :**



MIPS I-Type : ALU

Οι I-Type εντολές της ALU χρησιμοποιούν 2 καταχωρητές και μία σταθερή τιμή
I-Type είναι και οι εντολές Loads/stores, conditional branches.

| | | | |
|-----------|-----------|-----------|------------------|
| OP | rs | rt | immediate |
| 6 bits | 5 bits | 5 bits | 16 bits |

– *immediate*: Constant second operand for ALU instruction.

- Παραδείγματα :

– add immediate: `addi $1,$2,100`

– and immediate `andi $1,$2,10`

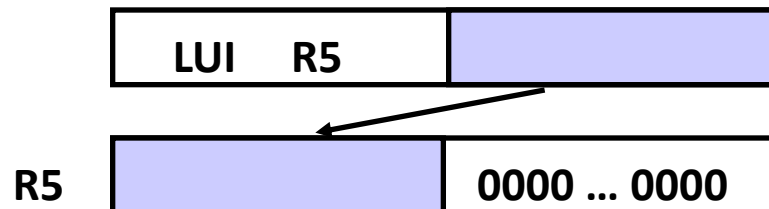
Result register in rt

Source operand register in rs

Constant operand
in immediate

MIPS data transfer instructions : Παραδείγματα (1)

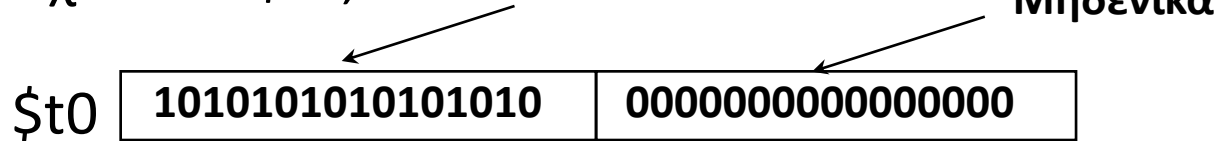
| <i>Instruction</i> | <i>Σχόλια</i> |
|--------------------|---|
| sw \$3, 500(\$4) | Store word |
| sh \$3, 502(\$2), | Store half |
| sb \$2, 41(\$3) | Store byte |
| lw \$1, 30(\$2) | Load word |
| lh \$1, 40(\$3) | Load halfword |
| lhu \$1, 40(\$3) | Load halfword unsigned |
| lb \$1, 40(\$3) | Load byte |
| lbu \$1, 40(\$3) | Load byte unsigned |
| lui \$1, 40 | Load Upper Immediate (16 bits shifted left by 16) |



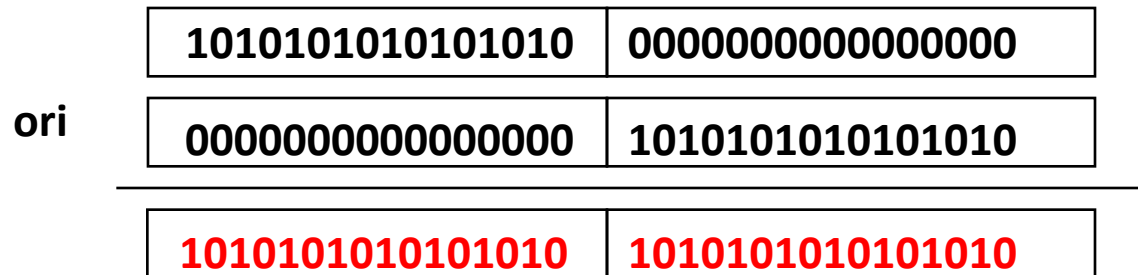
MIPS data transfer instructions : Παραδείγματα (2)

Τι γίνεται με τις μεγαλύτερες σταθερές;

- Έστω ότι θέλουμε να φορτώσουμε μια 32-bit σταθερά σε κάποιο καταχωρητή, π.χ. **1010101010101010 1010101010101010**
- Θα χρησιμοποιήσουμε την “Load Upper Immediate” εντολή π.χ. `lui $t0, 1010101010101010`



- Στη συνέχεια πρέπει να θέσουμε σωστά τα lower order bits π.χ. `ori $t0, 1010101010101010`



Αναπαράσταση Εντολών στον Υπολογιστή

| εντολή | μορφή | op | rs | rt | rd | shamt | funct | address |
|--------|-------|-------------------|-----|-----|------|-------|-------------------|---------|
| add | R | 0 | reg | reg | reg | 0 | 32 _{ten} | δ.ε. |
| sub | R | 0 | reg | reg | reg | 0 | 34 _{ten} | δ.ε. |
| addi | I | 8 _{ten} | reg | reg | δ.ε. | δ.ε. | δ.ε. | σταθ. |
| lw | I | 35 _{ten} | reg | reg | δ.ε. | δ.ε. | δ.ε. | διευθ. |
| sw | I | 43 _{ten} | reg | reg | δ.ε. | δ.ε. | δ.ε. | διευθ. |

Αναπαράσταση Εντολών στον Υπολογιστή

Παράδειγμα: Μεταγλωττίστε το $A[300] = h + A[300]$

\$t1 δνση βάσης πίνακα A (32 bit/στοιχείο A[i]), \$s2 μεταβλητή h

lw \$t0, 1200(\$t1)

add \$t0, \$s2, \$t0

sw \$t0, 1200(\$t1)

| op | rs | rt | rd | shamt | funct |
|----|----|----|------|-------|-------|
| 35 | 9 | 8 | 1200 | | |
| 0 | 18 | 8 | 8 | 0 | 32 |
| 43 | 9 | 8 | 1200 | | |

| op | rs | rt | rd | shamt | funct |
|-----------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|
| 10 <u>0</u> 11 | 01001 | 01000 | 0000 0100 1011 0000 | | |
| 000000 | 10010 | 01000 | 8 | 0 | 32 |
| 10 <u>1</u> 011 | 01001 | 01000 | 0000 0100 1011 0000 | | |

Λογικές Λειτουργίες (Πράξεις) (1)

| Λογικές Λειτουργίες | Τελεστές C | Εντολές MIPS |
|---------------------|------------|---------------------------|
| Shift left | << | Sll (shift left logical) |
| Shift right | >> | Srl (shift right logical) |
| AND | & | and, andi |
| OR | | or, ori |
| NOT | ~ | nor |

SHIFT

\$s0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 1001 = 9_{ten} 😊

sll \$t2, \$s0, 4

Κάνουμε shift αριστερά το περιεχόμενο του \$s0 κατά 4 θέσεις

0000 0000 0000 0000 0000 0000 1001 0000 = 144_{ten}

και τοποθετούμε το αποτέλεσμα στον \$t2.

!!Το περιεχόμενο του \$s0 μένει αμετάβλητο!!

Λογικές Λειτουργίες (Πράξεις) (3)

SHIFT

`sll $t2, $s0, 4`

Καταχωρητές (σκονάκι ☺)

`$s0, ..., $s7` αντιστοιχίζονται στους 16 - 23

`$t0, ..., $t7` αντιστοιχίζονται στους 8 - 15

| 6 bit | 5 bit | 5 bit | 5 bit | 5 bit | 6 bit |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| op | rs | rt | rd | shamt | funct |
| 0 | 0 | 16 | 10 | 4 | 0 |
| 000000 | 00000 | 10000 | 01010 | 00100 | 000000 |

sll: opcode=0, funct=0

AND, OR

\$t2: 0000 0000 0000 0000 0000 1101 0000 0000

\$t1: 0000 0000 0000 0000 0011 1100 0000 0000

and \$t0, \$t1, \$t2

Μάσκα

\$t0: 0000 0000 0000 0000 0000 1100 0000 0000

or \$t0, \$t1, \$t2

\$t0: 0000 0000 0000 0000 0011 1101 0000 0000

NOT, NOR

\$t1: 0000 0000 0000 0000 0011 1100 0000 0000

\$t3: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000

`not $t0, $t1` **δεν υπάρχει** γιατί θέλουμε πάντα 2 καταχωρητές source. Άρα χρησιμοποιούμε τη **`nor`**:

A NOR 0 = NOT (A OR 0) = NOT A

`nor $t0, $t1, $t3`

\$t0: 1111 1111 1111 1111 1100 0011 1111 1111

MIPS Arithmetic Instructions : Παραδείγματα

| <i>Instruction</i> | <i>Παράδειγμα</i> | <i>Έννοια</i> | <i>Σχόλια</i> |
|--------------------|-------------------|---|---------------------------------------|
| add | add \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \$2 + \$3$ | 3 operands; <u>exception possible</u> |
| subtract | sub \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \$2 - \$3$ | 3 operands; <u>exception possible</u> |
| add immediate | addi \$1,\$2,100 | $\$1 = \$2 + 100$ | + constant; exception possible |
| add unsigned | addu \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \$2 + \$3$ | 3 operands; no exceptions |
| subtract unsigned | subu \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \$2 - \$3$ | 3 operands; no exceptions |
| add imm. unsign. | addiu \$1,\$2,100 | $\$1 = \$2 + 100$ | + constant; no exceptions |
| multiply | mult \$2,\$3 | Hi, Lo = $\$2 \times \3 | 64-bit signed product |
| multiply unsigned | multu \$2,\$3 | Hi, Lo = $\$2 \times \3 | 64-bit unsigned product |
| divide | div \$2,\$3 | Lo = $\$2 \div \3 , Hi = $\$2 \bmod \3 | Lo = quotient, Hi = remainder |
| divide unsigned | divu \$2,\$3 | Lo = $\$2 \div \3 , Hi = $\$2 \bmod \3 | Unsigned quotient & remainder |
| Move from Hi | mfhi \$1 | $\$1 = \text{Hi}$ | Used to get copy of Hi |
| Move from Lo | mflo \$1 | $\$1 = \text{Lo}$ | Used to get copy of Lo |

MIPS Logic/Shift Instructions : Παραδείγματα

| <i>Instruction</i> | <i>Παράδειγμα</i> | <i>Έννοια</i> | <i>Σχόλια</i> |
|---------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------|
| and | and \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \$2 \& \$3$ | 3 reg. operands; Logical AND |
| or | or \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \$2 \$3$ | 3 reg. operands; Logical OR |
| xor | xor \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \$2 \oplus \$3$ | 3 reg. operands; Logical XOR |
| nor | nor \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \sim(\$2 \$3)$ | 3 reg. operands; Logical NOR |
| and immediate | andi \$1,\$2,10 | $\$1 = \$2 \& 10$ | Logical AND reg, constant |
| or immediate | ori \$1,\$2,10 | $\$1 = \$2 10$ | Logical OR reg, constant |
| xor immediate | xori \$1, \$2,10 | $\$1 = \sim\$2 \& \sim 10$ | Logical XOR reg, constant |
| shift left logical | sll \$1,\$2,10 | $\$1 = \$2 \ll 10$ | Shift left by constant |
| shift right logical | srl \$1,\$2,10 | $\$1 = \$2 \gg 10$ | Shift right by constant |
| shift right arithm. | sra \$1,\$2,10 | $\$1 = \$2 \gg 10$ | Shift right (sign extend) |
| shift left logical | sllv \$1,\$2,\$3 | $\$1 = \$2 \ll \$3$ | Shift left by variable |
| shift right logical | srlv \$1,\$2, \$3 | $\$1 = \$2 \gg \$3$ | Shift right by variable |
| shift right arithm. | srav \$1,\$2, \$3 | $\$1 = \$2 \gg \$3$ | Shift right arith. by variable |

beq, bne

beq reg1, reg2, L1 #branch if equal

Αν οι καταχωρητές reg1 και reg2 **είναι ίσοι**,
πήγαινε στην ετικέτα L1

bne reg1, reg2, L1 #branch if not equal

Αν οι καταχωρητές reg1 και reg2 **δεν είναι ίσοι**,
πήγαινε στην ετικέτα L1

Εντολές Λήψης Αποφάσεων (2)

Παράδειγμα:

if(i == j) f = g + h; else f = g - h;

με f, g, h, i, j αντιστοιχούνται σε \$s0, ..., \$s4

version 1

bne \$s3, \$s4, Else

add \$s0, \$s1, \$s2

j Exit

Else: sub \$s0, \$s1, \$s2

Exit:

version 2

beq \$s3, \$s4, Then

sub \$s0, \$s1, \$s2

j Exit

Then: add \$s0, \$s1, \$s2

Exit:

Εντολές Λήψης Αποφάσεων (3)

Βρόχοι (Loops)

while (save[i] == k) i += 1;

με i = \$s3, k = \$s5, save base addr = \$s6

```
Loop:      sll    $t1, $s3, 2 #πολ/ζω i επί 4
           add    $t1, $t1, $s6
           lw     $t0, 0($t1)
           bne   $t0, $s5, Exit
           addi  $s3, $s3, 1
           j     Loop
```

Exit:

Εντολές Λήψης Αποφάσεων (4)

Συγκρίσεις

`slt $t0, $s3, $s4` # set on less than

Ο καταχωρητής `$t0` τίθεται με 1 αν η τιμή στον `$s3` είναι μικρότερη από την τιμή στο `$s4`.

- Σταθερές ως τελεστές είναι δημοφιλείς στις συγκρίσεις

`slti $t0, $s2, 10` # set on less than immediate

Ο καταχωρητής `$t0` τίθεται με 1 αν η τιμή στον `$s2` είναι μικρότερη από την τιμή 10.

Εντολές Λήψης Αποφάσεων (5)

- Γιατί όχι `blt`, `bge` κτλ;
- Το υλικό για τις `<`, `≥`, ... είναι πιο αργό από αυτό για τις `=`, `≠`
 - Ο συνδυασμός συνθηκών για μια διακλάδωση περιλαμβάνει περισσότερη δουλειά ανά εντολή.
 - Πιο αργό ρολόι
 - Επιβαρύνονται όλες οι εντολές!
- Οι `beq`, `bne` είναι η συνήθης περίπτωση
- Καλός σχεδιαστικός συμβιβασμός.

MIPS Branch, Compare, Jump : Παραδείγματα

| <i>Instruction</i> | <i>Παράδειγμα</i> | <i>Έννοια</i> |
|---------------------|-------------------|--|
| branch on equal | beq \$1,\$2,100 | if ($\$1 == \2) go to PC+4+10 <i>Equal test; PC relative branch</i> |
| branch on not eq. | bne \$1,\$2,100 | if ($\$1 \neq \2) go to PC+4+100 <i>Not equal test; PC relative branch</i> |
| set on less than | slt \$1,\$2,\$3 | if ($\$2 < \3) $\$1=1$; else $\$1=0$ <i>Compare less than; 2's comp.</i> |
| set less than imm. | slti \$1,\$2,100 | if ($\$2 < 100$) $\$1=1$; else $\$1=0$ <i>Compare < constant; 2's comp.</i> |
| set less than uns. | sltu \$1,\$2,\$3 | if ($\$2 < \3) $\$1=1$; else $\$1=0$ <i>Compare less than; natural numbers</i> |
| set l. t. imm. uns. | sltiu \$1,\$2,100 | if ($\$2 < 100$) $\$1=1$; else $\$1=0$ <i>Compare < constant; natural numbers</i> |
| jump | j 10000 | go to 10000 <i>Jump to target address</i> |
| jump register | jr \$31 | go to \$31 <i>For switch, procedure return</i> |
| jump and link | jal 10000 | $\$31 = PC + 4$; go to 10000 <i>For procedure call</i> |

Εντολές διακλάδωσης – branching instructions

branch if
equal `beq $s3, $s4, L1 # goto L1 if $s3 equals $s4`

branch if
!equal `bne $s3, $s4, L1 # goto L1 if $s3 not equals $s4`

unconditional
Jump `jr $t1 # goto $t1`

..... είναι I-Type εντολές

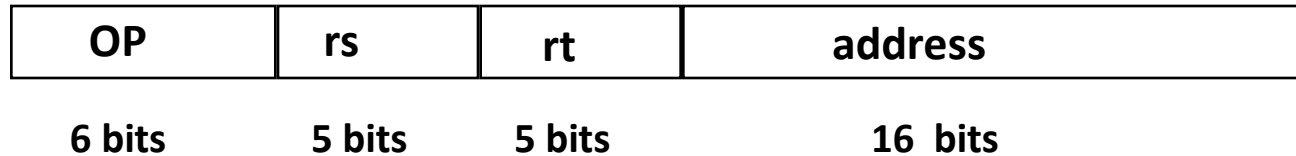
`slt $t0, $s3, $s4 #set $t0 to 1 if $s3 is less than $s4;else set $t0 to 0`

Όμως: `j L1 # goto L1`

Πόσο μεγάλο είναι το μήκος του address L1;

Πόσο «μεγάλο» μπορεί να είναι το άλμα;

MIPS Branch I-Type



- *address: 16-bit memory address branch target offset in words added to PC to form branch address.*

- Παραδείγματα :

- Branch on equal

beq \$1,\$2,100

- Branch on not equal

bne \$1,\$2,100

Register in rs

Register in rt

Final offset is calculated in bytes, equals to $\{\text{instruction field address}\} \times 4$, e.g. new PC = PC + 400

MIPS J-Type

J-Type: jump j, jump and link jal



– *jump target: jump memory address in words.*

- Παραδείγματα :

– Jump

j 10000

– Jump and Link

jal 10000

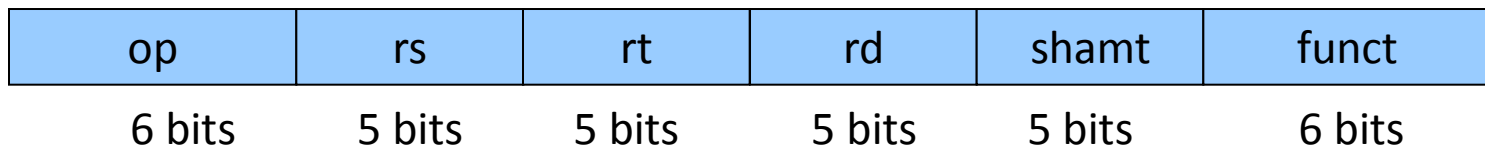
final jump memory address in bytes is calculated from {jump target} x 4

Εντολές Jump

- Jump (*J-type*):
 - `j 10000` # jump to address 10000
- Jump Register (*R-type*):
 - `jr rs` # jump to 32 bit address in register `rs`
- Jump and Link (*J-type*):
 - `jal 10000` # jump to 10000 and save PC in R31
 - Χρήση για κλήση διαδικασιών/μεθόδων.
 - Αποθηκεύει τη διεύθυνση επιστροφής (PC+4) στον καταχωρητή 31 (`$ra`)
 - Η επιστροφή από τη διαδικασία επιτυγχάνεται με χρήση “`jr $ra`”
 - Οι εμφωλιασμένες διαδικασίες θα πρέπει να αποθηκεύουν τον `$ra` στη στοίβα και να χρησιμοποιούν τους καταχωρητές `$sp` (stack pointer) και `$fp` (frame pointer) για να χειρίζονται τη στοίβα.

Σύνοψη – MIPS Instruction Formats

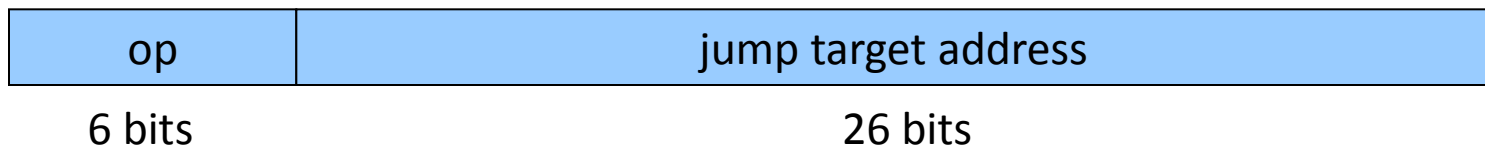
- R-type (add, sub, slt, jr)



- I-type (beq, bne + addi, lui + lw, sw)



- J-type (j, jal)

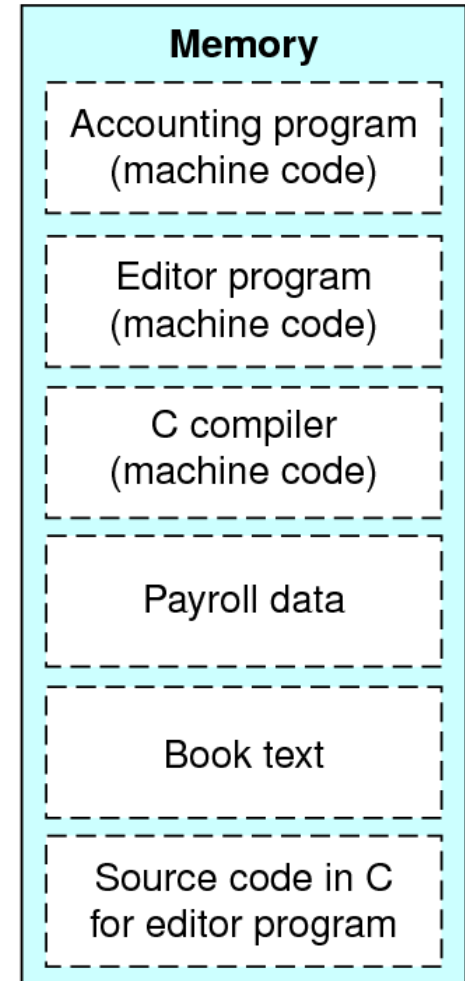
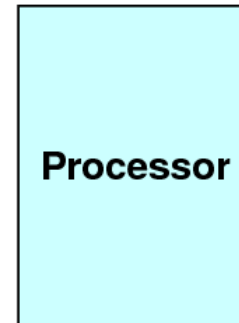


Έννοια αποθηκευμένου προγράμματος

Ο υπολογιστής κάνει πολλές εργασίες φορτώνοντας δεδομένα στο μνήμη.

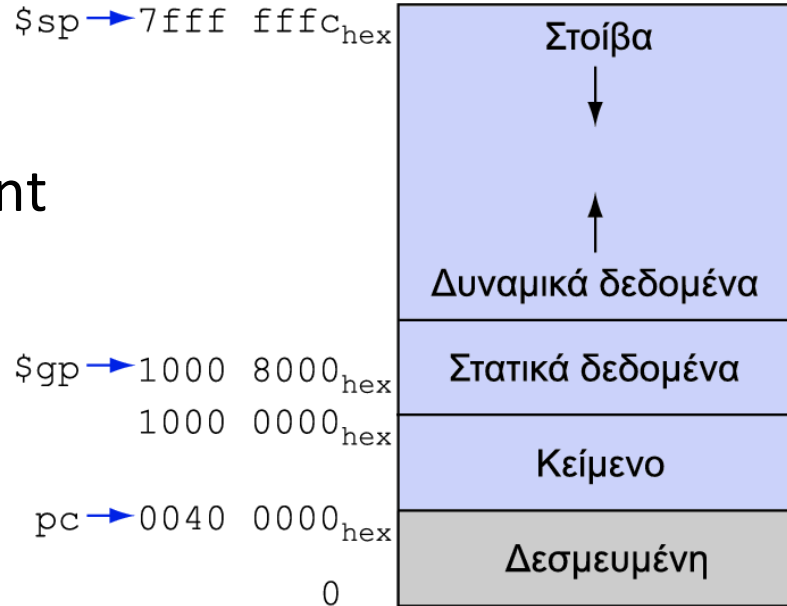
Δεδομένα και εντολές είναι στοιχεία στη μνήμη.

Π.χ. compilers μεταφράζουν στοιχεία σε κάποια άλλα στοιχεία.



Διάταξη της Μνήμης

- Κείμενο (Text)
 - Κώδικας προγράμματος
- Στατικά Δεδομένα (Static data)
 - Καθολικές Μεταβλητές (π.χ. στατικές μεταβλητές της C, constant arrays και συμβολοσειρές (strings))
- Δυναμικά Δεδομένα
 - Σωρός (Heap)
 - π.χ. malloc στη C
- Στοίβα (stack)
 - Αυτόματη αποθήκευση



- Applications / HLL

- Integer
- Floating point
- Character
- String
- Date
- Currency
- Text,
- Objects (ADT)
- Blob
- double precision
- Signed, unsigned

- Hardware support

- Numeric data types
 - Integers
 - 8 / 16 / 32 / 64 bits
 - Signed or unsigned
 - Binary coded decimal (COBOL, Y2K!)
 - Floating point
 - 32 / 64 / 128 bits
- Nonnumeric data types
 - Characters
 - Strings
 - Boolean (bit maps)
 - Pointers

Τύποι Δεδομένων : MIPS (1)

- Βασικός τύπος δεδομένων: 32-bit word
 - 0100 0011 0100 1001 0101 0011 0100 0101
 - Integers (signed or unsigned)
 - 1,128,878,917
 - Floating point numbers
 - 201.32421875
 - 4 ASCII χαρακτήρες
 - C I S E
 - Διευθύνσεις μνήμης (pointers)
 - 0x43495345
 - Εντολές

Τύποι Δεδομένων : MIPS (2)

- 16-bit σταθερές (immediates)
 - `addi $s0, $s1, 0x8020`
 - `lw $t0, 20($s0)`
- Half word (16 bits)
 - **lh** (**lhu**): load half word `lh $t0, 20($s0)`
 - **sh**: save half word `sh $t0, 20($s0)`
- Byte (8 bits)
 - **lb** (**lbu**): load byte `sh $t0, 20($s0)`
 - **sb**: save byte `sh $t0, 20($s0)`

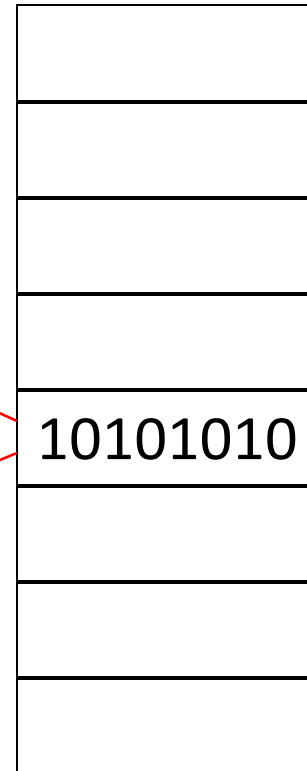
Εντολές λειτουργίας Byte

lb \$s1, 4(\$s0)

| | |
|-------|----------------------|
| \$s0: | 0x10000000 |
| \$s1: | 0xFFFFFFFF AA |

Address Memory Bytes

0x10000000



lbu \$s1, 4(\$s0)

| | |
|-------|----------------------|
| \$s0: | 0x10000000 |
| \$s1: | 0x00000000 AA |

Παράδειγμα : Αντιγραφή String

```
Void strcpy (char[], char y[]) {  
    int i;  
    i = 0;  
    while ((x[i]=y[i]) != 0)  
        i = i + 1;  
}
```

C convention:

Null byte (00000000)
represents end of the string

Importance of comments in MIPS!

```
strcpy:  
    subi $sp, $sp, 4  
    sw   $s0, 0($sp)  
    add  $s0, $zero, $zero  
L1:  add  $t1, $a1, $s0 ←  
     lb   $t2, 0($t1)  
     add  $t3, $a0, $s0  
     sb   $t2, 0($t3)  
     beq  $t2, $zero, L2  
     addi $s0, $s0, 1  
     j    L1  
L2:  lw   $s0, 0($sp)  
     addi $sp, $sp, 4  
     jr   $ra
```

Σταθερές

- Συχνά χρησιμοποιούνται μικρές σταθερές (50% των τελεστών)
 - e.g., $A = A + 5;$
- Λύση
 - Αποθήκευση ‘τυπικών σταθερών’ στη μνήμη και φόρτωση τους.
 - Δημιουργία hard-wired καταχωρητών (π.χ. \$zero) για σταθερές όπως 0, 1 κτλ.
- MIPS Instructions:
 - slti \$8, \$18, 10
 - andi \$29, \$29, 6
 - ori \$29, \$29, 0x4a
 - addi \$29, \$29, 4

| | | | |
|---|----|----|---|
| 8 | 29 | 29 | 4 |
|---|----|----|---|

Τρόποι Διευθυνσιοδότησης

- Διευθύνσεις για δεδομένα και εντολές
- Δεδομένα (τελεστές / αποτελέσματα)
 - Καταχωρητές
 - Θέσεις μνήμης
 - Σταθερές
- Αποδοτική κωδικοποίηση διευθύνσεων (χώρος: 32 bits)
 - Καταχωρητές (32) => 5 bits κωδικοποιούν 1 32-bit δνση
 - *Destructive* instructions: $\text{reg2} = \text{reg2} + \text{reg1}$
 - Accumulator
 - Stack
- Τα opcodes μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους διευθυνσιοδότησης
 - **Orthogonality** of opcodes and addressing modes

Διευθυνσιοδότηση Δεδομένων

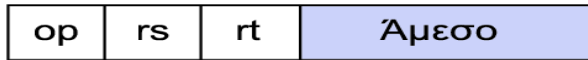
- Διευθυνσιοδότηση μέσω καταχωρητή (Register addressing)
 - Η πιο συνηθισμένη (σύντομη και ταχύτατη)
 - `add $3, $2, $1`
- Διευθυνσιοδότηση βάσης (Base addressing)
 - Ο τελεστέος είναι σε μια θέση μνήμης με κάποιο **offset**
 - `lw $t0, 20($t1)`
- Άμεση διευθυνσιοδότηση (Immediate addressing)
 - Ο τελεστέος είναι μια μικρή σταθερά και περιέχεται στην εντολή
 - `addi $t0, $t1, 4` (signed 16-bit integer)

Διευθυνσιοδότηση Εντολών

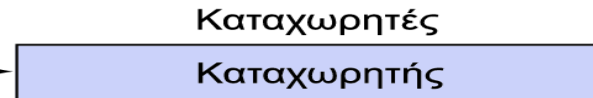
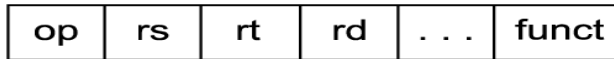
- Οι διευθύνσεις έχουν μήκος 32 bits
- Καταχωρητής ειδικού σκοπού : **PC (program counter)**
 - Αποθηκεύει τη διεύθυνση της εντολής που εκτελείται εκείνη τη στιγμή
- Διευθυνσιοδότηση με χρήση PC (PC-relative addressing)
 - **Branches**
 - Νέα διεύθυνση: $PC + (\text{constant in the instruction}) * 4$
 - `beq $t0, $t1, 20`
- Ψεύδοαμεση διευθυνσιοδότηση (Pseudodirect addressing)
 - **Jumps**
 - Νέα διεύθυνση: $PC[31:28] : (\text{constant in the instruction}) * 4$

Περίληψη Τρόπων Διευθυνσιοδότησης

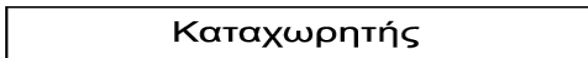
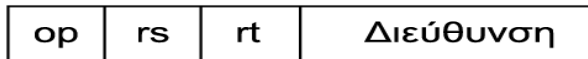
1. Άμεση διευθυνσιοδότηση



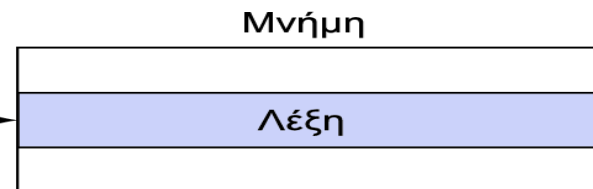
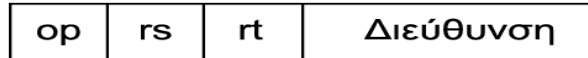
2. Διευθυνσιοδότηση μέσω καταχωρητή



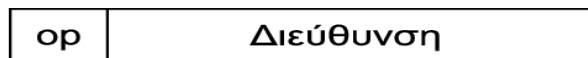
3. Διευθυνσιοδότηση βάσης



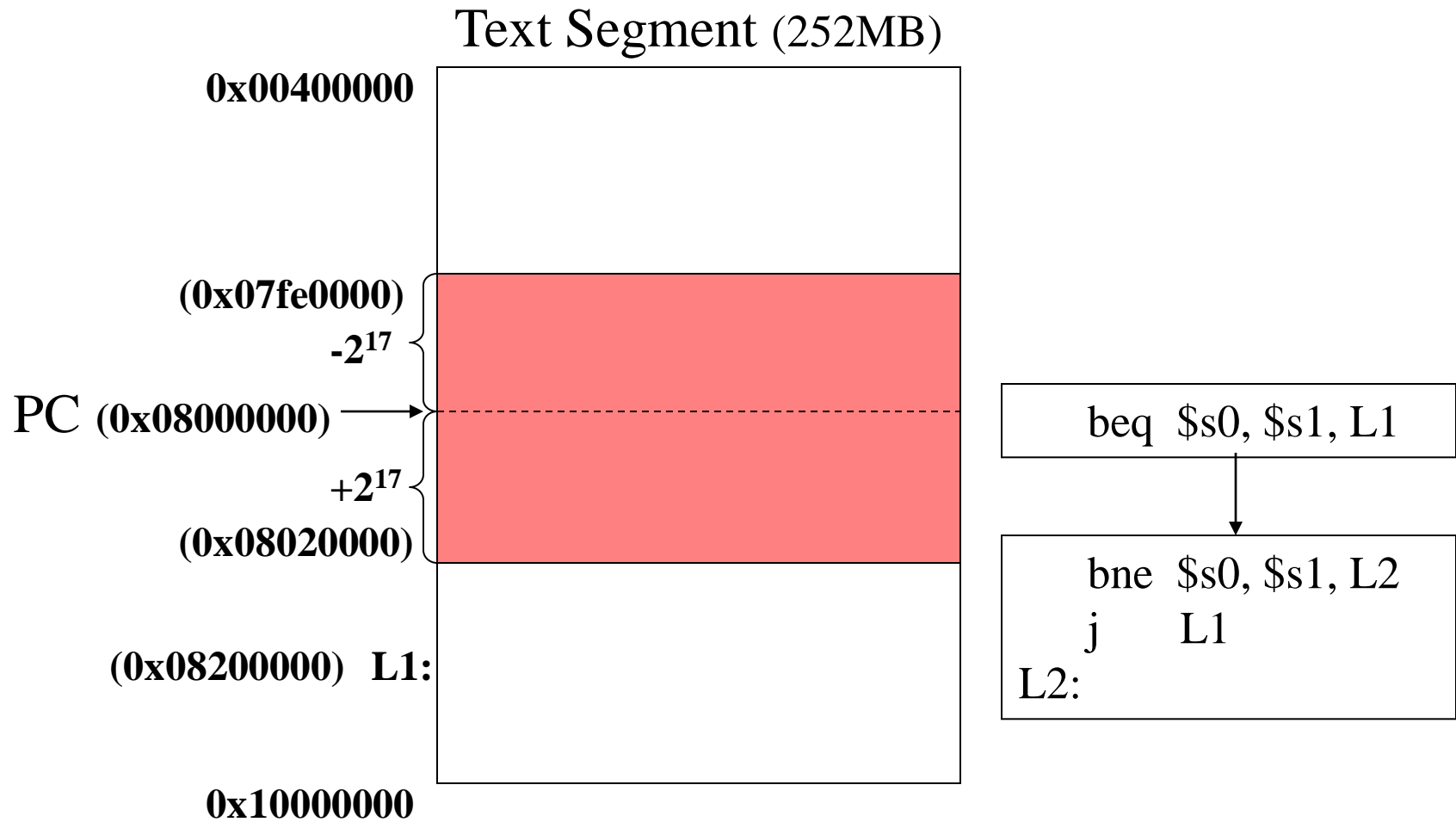
4. Σχετική διευθυνσιοδότηση ως προς PC



5. Ψευδο-απευθείας διευθυνσιοδότηση



Παράδειγμα : Απομακρυσμένες Διευθύνσεις



Δείκτες (Pointers)

- **Pointer**: Μια μεταβλητή, η οποία περιέχει τη διεύθυνση μιας άλλης μεταβλητής
 - Αποτελεί τη HLL έκφραση της διεύθυνσης μνήμης σε γλώσσα μηχανής
- Γιατί χρησιμοποιούμε δείκτες;
 - Κάποιες φορές είναι ο μοναδικός τρόπος για να εκφράσουμε κάποιο υπολογισμό
 - Πιο αποδοτικός και συμπυκνμένος κώδικας
- Γιατί να *ΜΗ* χρησιμοποιούμε δείκτες;
 - Πιθανώς η μεγαλύτερη πηγή bugs
 - 1) Dangling reference (λόγω πρόιμης απελευθέρωσης)
 - 2) Memory leaks (tardy free):
 - Αποτρέπουν την ύπαρξη διεργασιών που τρέχουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα μιας και απαιτούν την επανέναρξη τους

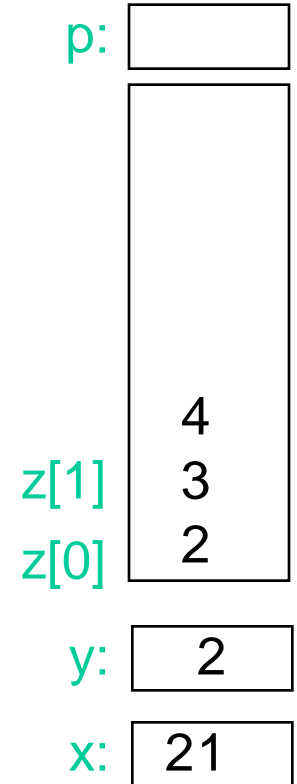
C Pointer Operators

- Έστω ότι η μεταβλητή c έχει την τιμή 100 και βρίσκεται στη θέση μνήμης 0x10000000
- Unary operator $\&$ \rightarrow δίνει τη διεύθυνση:
 $p = \&c$; gives address of c to p ;
 - p “points to” c ($p == 0x10000000$)
- Unary operator $*$ \rightarrow δίνει την τιμή στην οποία δείχνει ο pointer
 - if $p = \&c \Rightarrow *p == 100$ (Dereferencing a pointer)
- Dereferencing \rightarrow data transfer in assembler
 - $\dots = \dots *p \dots$; \rightarrow **load**
(get value from location pointed to by p)
 - $*p = \dots$; \rightarrow **store**
(put value into location pointed to by p)

Pointer Arithmetic

```
int x = 1, y = 2;    /* x and y are integer variables */
int z[10];          /* an array of 10 ints, z points to start */
int *p;             /* p is a pointer to an int */

x = 21;             /* assigns x the new value 21 */
z[0] = 2; z[1] = 3 /* assigns 2 to the first, 3 to the next */
p = &z[0];          /* p refers to the first element of z */
p = z;              /* same thing; p[ i ] == z[ i ]*/
p = p+1;           /* now it points to the next element, z[1] */
p++;               /* now it points to the one after that, z[2] */
*p = 4;            /* assigns 4 to there, z[2] == 4*/
p = 3;             /* bad idea! Absolute address!!! */
p = &x;            /* p points to x, *p == 21 */
z = &y             illegal!!!! array name is not a variable
```



Assembly Code : Παράδειγμα (1)

Έστω ακέραιος c με τιμή 100 που βρίσκεται στη θέση μνήμης $0x10000000$, p στον $\$a0$ και x στον $\$s0$

1. $p = \&c;$; /* p gets $0x10000000$ */

`lui $a0,0x1000 # p = 0x10000000`

2. $x = *p;$; /* x gets 100 */

`lw $s0, 0($a0) # dereferencing p`

3. $*p = 200;$; /* c gets 200 */

`addi $t0,$0,200`

`sw $t0, 0($a0) # dereferencing p`

Assembly Code : Παράδειγμα (2)

```
int strlen(char *s) {  
    char *p = s;          /* p points to chars */  
    while (*p != '\0')  
        p++;              /* points to next char */  
    return p - s;        /* end - start */  
}
```

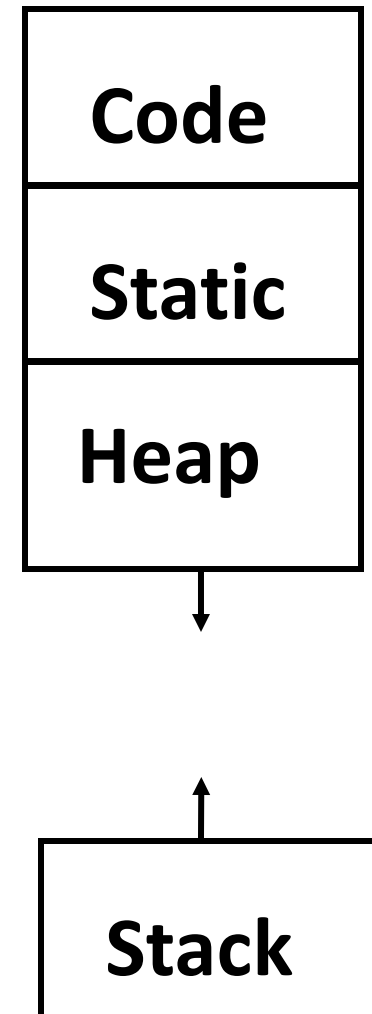
```
    mov $t0,$a0  
    lbu $t1,0($t0) /* derefence p */  
    beq $t1,$zero, Exit  
Loop: addi $t0,$t0,1 /* p++ */  
    lbu $t1,0($t0) /* derefence p */  
    bne $t1,$zero, Loop  
Exit: sub $v0,$t0,$a0  
    jr $ra
```

Επικοινωνία Ορισμάτων (Argument Passing Options)

- 2 μέθοδοι
 - Κλήση κατά τιμή (Call by Value): Ένα αντίγραφο στέλνεται του αντικειμένου στέλνεται στη μέθοδο/διαδικασία
 - Κλήση κατά αναφορά (Call by Reference): Ένας pointer στο αντικείμενο στέλνεται στη μέθοδο/διαδικασία
- Οι μεταβλητές μήκους 1 λέξης στέλνονται κατά τιμή
- Τι γίνεται στην περίπτωση ενός πίνακα; π.χ. `a[100]`
 - Pascal (call by value): Αντιγράφει 100 λέξεις του `a[]` στη στοίβα
 - C (call by reference) : Περνά ένα pointer (1 word) που δείχνει στο `a[]` σε ένα καταχωρητή

Lifetime of Storage and Scope

- Αυτόματα (stack allocated)
 - Τοπικές μεταβλητές μιας μεθόδου/διαδικασίας
 - Δημιουργούνται κατά την κλήση και απελευθερώνονται κατά την επιστροφή
 - Scope = η μέθοδος/διαδικασία
- Heap allocated
 - Δημιουργούνται με malloc
 - Απελευθερώνονται με free
 - Αναφορές μέσω pointers
- External / static
 - Επιζούν για ολόκληρη την εκτέλεση του προγράμματος



- 4 εκδόσεις μιας μεθόδου/διαδικασίας η οποία προσθέτει 2 πίνακες και αποθηκεύει το άθροισμα σε ένα 3^ο πίνακα (*sumarray*)
 1. Ο 3^{ος} πίνακας στέλνεται στη μέθοδο
 2. Χρήση ενός τοπικού πίνακα (στη στοίβα) για το αποτέλεσμα και πέρασμα ενός δείκτη σε αυτόν
 3. Ο 3^{ος} πίνακας τοποθετείται στο heap
 4. Ο 3^{ος} πίνακας ορίζεται ως static
- Σκοπός του παραδείγματος είναι να δείξουμε τη χρήση των C statements, των pointers και της αντίστοιχης memory allocation.

```
int x[100], y[100], z[100];
```

```
sumarray(x, y, z);
```

- C calling convention :

```
sumarray(&x[0], &y[0], &z[0]);
```

- Στην πραγματικότητα περνάμε pointers στους πίνακες

```
addi $a0,$gp,0    # x[0] starts at $gp
```

```
addi $a1,$gp,400  # y[0] above x[100]
```

```
addi $a2,$gp,800  # z[0] above y[100]
```

```
jal sumarray
```

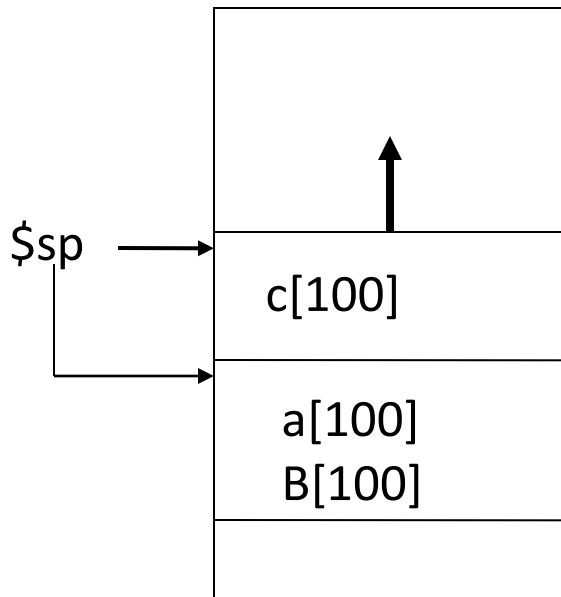
Πίνακες, Δείκτες και Μέθοδοι/Διαδικασίες : Version 1

```
void sumarray(int a[], int b[], int c[]) {  
    int i;  
    for(i = 0; i < 100; i = i + 1)  
        c[i] = a[i] + b[i];  
}
```

```
Loop:    addi    $t0,$a0,400    # beyond end of a[]  
        beq    $a0,$t0,Exit  
        lw     $t1, 0($a0)    # $t1=a[i]  
        lw     $t2, 0($a1)    # $t2=b[i]  
        add   $t1,$t1,$t2    # $t1=a[i] + b[i]  
        sw     $t1, 0($a2)    # c[i]=a[i] + b[i]  
        addi   $a0,$a0,4      # $a0++  
        addi   $a1,$a1,4      # $a1++  
        addi   $a2,$a2,4      # $a2++  
        j     Loop  
Exit:    jr     $ra
```

Πίνακες, Δείκτες και Μέθοδοι/Διαδικασίες : **Version 2**

```
int *sumarray(int a[],int b[]) {  
    int i, c[100];  
    for(i=0;i<100;i=i+1)  
        c[i] = a[i] + b[i];  
    return c;  
}
```

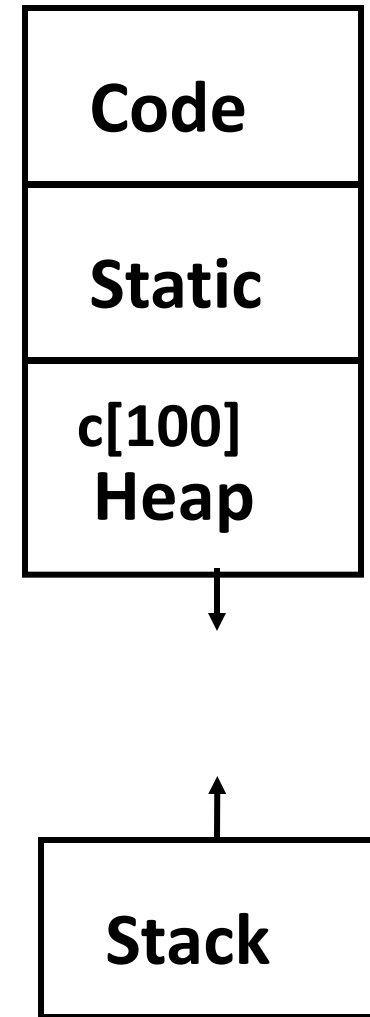


```
    addi $t0,$a0,400 # beyond end of a[]  
    addi $sp,$sp,-400 # space for c  
    addi $t3,$sp,0    # ptr for c  
    addi $v0,$t3,0    # $v0 = &c[0]  
Loop: beq $a0,$t0,Exit  
    lw  $t1, 0($a0)   # $t1=a[i]  
    lw  $t2, 0($a1)   # $t2=b[i]  
    add $t1,$t1,$t2   # $t1=a[i] + b[i]  
    sw  $t1, 0($t3)   # c[i]=a[i] + b[i]  
    addi $a0,$a0,4    # $a0++  
    addi $a1,$a1,4    # $a1++  
    addi $t3,$t3,4    # $t3++  
    j   Loop  
Exit: addi $sp,$sp, 400 # pop stack  
    jr  $ra
```



```
int * sumarray(int a[],int b[]) {  
    int i;  
    int *c;  
    c = (int *) malloc(100);  
    for(i=0;i<100;i=i+1)  
        c[i] = a[i] + b[i];  
    return c;  
}
```

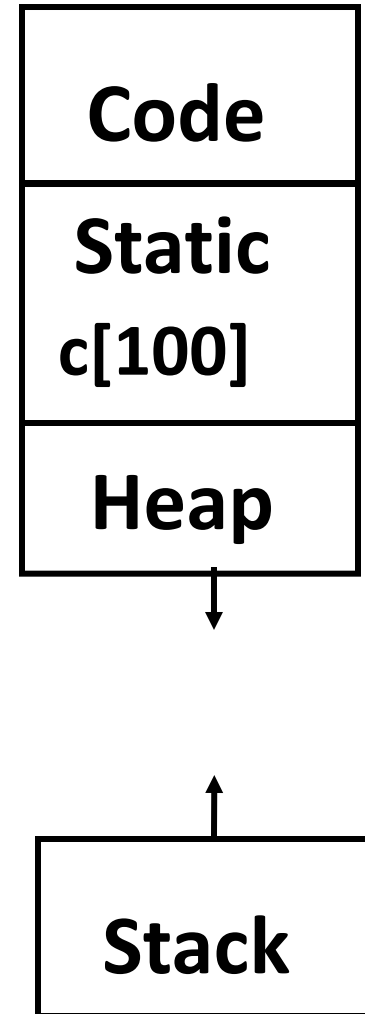
- Ο χώρος που δεσμεύτηκε δεν επαναχρησιμοποιείται, εκτός αν απελευθερωθεί (freed)
 - Είναι πιθανό να οδηγήσει σε memory leaks
 - Java, Scheme διαθέτουν garbage collectors για να επανακτούν ελεύθερο χώρο



```
addi    $t0,$a0,400    # beyond end of a[]
addi    $sp,$sp,-12    # space for regs
sw      $ra, 0($sp)    # save $ra
sw      $a0, 4($sp)    # save 1st arg.
sw      $a1, 8($sp)    # save 2nd arg.
addi    $a0,$zero,400
jal     malloc
addi    $t3,$v0,0      # ptr for c
lw      $a0, 4($sp)    # restore 1st arg.
lw      $a1, 8($sp)    # restore 2nd arg.
Loop:   beq $a0,$t0,Exit
        ... (loop as before on prior slide )
        j      Loop
Exit:   lw  $ra, 0($sp)    # restore $ra
        addi $sp, $sp, 12  # pop stack
        jr    $ra
```

```
int * sumarray(int a[],int b[]) {  
    int i;  
    static int c[100];  
  
    for(i=0;i<100;i=i+1)  
        c[i] = a[i] + b[i];  
    return c;  
}
```

- Ο compiler δεσμεύει χώρο μια φορά για τη μέθοδο και ο χώρος επαναχρησιμοποιείται
 - Θα μεταβληθεί την επόμενη φορά που θα κληθεί η sumarray
 - Γιατί την αναφέρουμε; Χρησιμοποιείται στις C libraries!



Επανάληψη (1)

| MIPS operands | | |
|------------------------------------|---|---|
| Name | Example | Comments |
| 32 registers | <code>\$s0-\$s7, \$t0-\$t9, \$zero,</code> <code>\$a0-\$a3, \$v0-\$v1, \$gp,</code> <code>\$fp, \$sp, \$ra, \$at</code> | Fast locations for data. In MIPS, data must be in registers to perform arithmetic. MIPS register <code>\$zero</code> always equals 0. Register <code>\$at</code> is reserved for the assembler to handle large constants. |
| 2³⁰ memory words | <code>Memory[0],</code> <code>Memory[4], ...,</code> <code>Memory[4294967292]</code> | Accessed only by data transfer instructions. MIPS uses byte addresses, so sequential words differ by 4. Memory holds data structures, such as arrays, and spilled registers, such as those saved on procedure calls. |

Επανάληψη (2)

MIPS assembly language

| Category | Instruction | Example | Meaning | Comments |
|--------------------|-------------------------|----------------------|--|-----------------------------------|
| Arithmetic | add | add \$s1, \$s2, \$s3 | $\$s1 = \$s2 + \$s3$ | Three operands; data in registers |
| | subtract | sub \$s1, \$s2, \$s3 | $\$s1 = \$s2 - \$s3$ | Three operands; data in registers |
| | add immediate | addi \$s1, \$s2, 100 | $\$s1 = \$s2 + 100$ | Used to add constants |
| Data transfer | load word | lw \$s1, 100(\$s2) | $\$s1 = \text{Memory}[\$s2 + 100]$ | Word from memory to register |
| | store word | sw \$s1, 100(\$s2) | $\text{Memory}[\$s2 + 100] = \$s1$ | Word from register to memory |
| | load byte | lb \$s1, 100(\$s2) | $\$s1 = \text{Memory}[\$s2 + 100]$ | Byte from memory to register |
| | store byte | sb \$s1, 100(\$s2) | $\text{Memory}[\$s2 + 100] = \$s1$ | Byte from register to memory |
| | load upper immediate | lui \$s1, 100 | $\$s1 = 100 * 2^{16}$ | Loads constant in upper 16 bits |
| Conditional branch | branch on equal | beq \$s1, \$s2, 25 | if ($\$s1 == \$s2$) go to PC + 4 + 100 | Equal test; PC-relative branch |
| | branch on not equal | bne \$s1, \$s2, 25 | if ($\$s1 != \$s2$) go to PC + 4 + 100 | Not equal test; PC-relative |
| | set on less than | slt \$s1, \$s2, \$s3 | if ($\$s2 < \$s3$) $\$s1 = 1$; else $\$s1 = 0$ | Compare less than; for beq, bne |
| | set less than immediate | slti \$s1, \$s2, 100 | if ($\$s2 < 100$) $\$s1 = 1$; else $\$s1 = 0$ | Compare less than constant |
| Unconditional jump | jump | j 2500 | go to 10000 | Jump to target address |
| | jump register | jr \$ra | go to \$ra | For switch, procedure return |
| | jump and link | jal 2500 | $\$ra = \text{PC} + 4$; go to 10000 | For procedure call |

Συμπεράσματα

- Τα δεδομένα μπορεί να είναι οτιδήποτε
 - Datatyping περιορίζει τις μορφές των δεδομένων (data representations)
 - Οι εφαρμογές περιορίζουν το datatyping
- MIPS Datatypes: Number, String, Boolean
- Addressing: Pointers, Values
 - Πολλαπλοί τρόποι διευθυνσιοδότησης (direct, indirect,...)
 - Memory-based address storage (**jr** instruction)
- Πίνακες : *μεγάλα κομμάτια μνήμης*
 - Pointers vs stack storage
 - Προσοχή στα memory leaks!

Επανάληψη : Τρόποι Διευθυνσιοδότησης

| <i>Addr. mode</i> | <i>Παράδειγμα</i> | <i>Έννοια</i> | <i>χρήση</i> |
|-------------------|--------------------|--|---|
| Register | add r4,r3 | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Regs}[r3]$ | a value is in register |
| Immediate | add r4,#3 | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + 3$ | for constants |
| Displacement | add r4,100(r1) | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Mem}[100 + \text{Regs}[r1]]$ | local variables |
| Reg. indirect | add r4,(r1) | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Mem}[\text{Regs}[r1]]$ | accessing using a pointer or comp. address |
| Indexed | add r4,(r1+r2) | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Mem}[\text{Regs}[r1] + \text{Regs}[r2]]$ | array addressing (base +offset) |
| Direct | add r4,(1001) | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Mem}[1001]$ | addr. static data |
| Mem. Indirect | add r4,@(r3) | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Mem}[\text{Mem}[\text{Regs}[r3]]]$ | if R3 keeps the address of a pointer p, this yields *p |
| Autoincrement | add r4,(r3)+ | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Mem}[\text{Regs}[r3]]$ $\text{Regs}[r3] \leftarrow \text{Regs}[r3] + d$ | stepping through arrays within a loop; d defines size of an element |
| Autodecrement | add r4,-(r3) | $\text{Regs}[r3] \leftarrow \text{Regs}[r3] - d$ $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Mem}[\text{Regs}[r3]]$ | similar as previous |
| Scaled | add r4,100(r2)[r3] | $\text{Regs}[r4] \leftarrow \text{Regs}[r4] + \text{Mem}[100 + \text{Regs}[r2] + \text{Regs}[r3] * d]$ | to index arrays |