


Architettura degli elaboratori
Linguaggio Macchina e Register File

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Informatica
Alberto.borghese@unimi.it

Università degli Studi di Milano

Riferimento sul Patterson: capitolo 4.2 , 4.4, D1, D2.


Sommario

- Linguaggio macchina
- Formato R
- Formato I
- Formato J
- Il register file

Linguaggio Macchina

- Le istruzioni assembler sono una **rappresentazione simbolica** del **linguaggio macchina** comprensibile dall'HW.

- Rappresentazione simbolica del linguaggio macchina
  - Più comprensibile del linguaggio macchina in quanto utilizza simboli invece che sequenze di bit

- Rispetto ai linguaggi ad alto livello, l'assembler fornisce limitate forme di controllo del flusso e non prevede articolate strutture dati

- Linguaggio usato come linguaggio target nella fase di compilazione di un programma scritto in un linguaggio ad alto livello (es: C, Pascal,ecc.)

- Vero e proprio linguaggio di programmazione che fornisce la visibilità diretta sull'hardware.

Codice in linguaggio ad alto livello (C)

```
a = a + c
b = b + a
var = m[a]
```

Codice Assembler

```
add $t0,$s0,$s1
add $s2,$s2,$t0
muli $t1,$s4,4
add $t2,$s5,$t1
lw $s3,0($t2)
```

Codice in linguaggio macchina

```
011100010101010
000110101000111
000010000010000
001000100010000
```

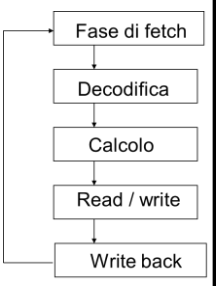

Definizione di un'ISA (Instruction Set Architecture)

ISA: definisce le istruzioni messe a disposizione dalla macchina (in linguaggio macchina).

IS = Instruction Set = Insieme delle istruzioni. Non solo elenco ma anche:

*Definizione del **funzionamento**: ISA è interfaccia verso i linguaggi ad alto livello.*

- Tipologia di istruzioni.
- Meccanismo di funzionamento delle istruzioni.



*Definizione del **formato**: codifica delle istruzioni (ISA è interfaccia verso l'HW).*

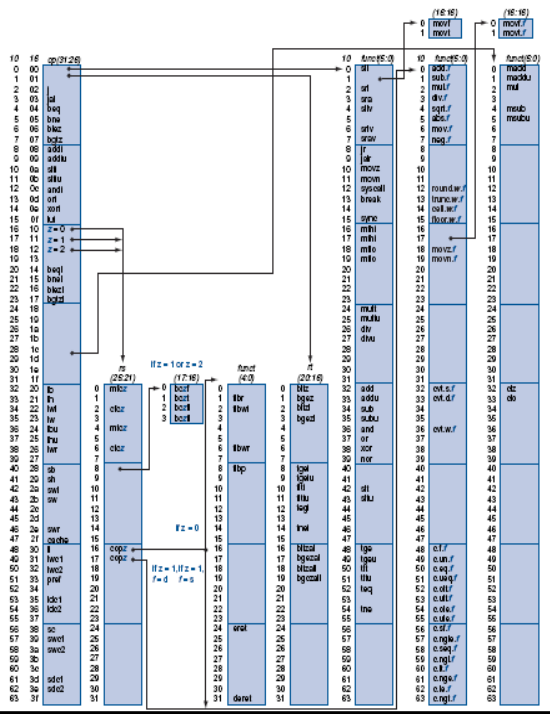
- Formato delle istruzioni.
- Suddivisione in gruppi omogenei dei bit che costituiscono l'istruzione.
- Formato dei dati.

Le istruzioni devono contenere tutte le informazioni necessarie ad eseguire il ciclo di esecuzione dell'istruzione: registri, comandi, ...

Codifica delle istruzioni in linguaggio macchina

- Tutte le istruzioni MIPS hanno la **stessa** dimensione **(32 bit = 1 parola) – Architettura RISC.**
- I 32 bit hanno un significato diverso a seconda del formato (o tipo) di istruzione
  - il tipo di istruzione è riconosciuto in base al valore di alcuni bit **(6 bit)** più significativi **(codice operativo - *OPCODE*)**
- Le istruzioni MIPS sono di **3** tipi (formati):
  - **Tipo R (register) – Lavorano prevalentemente su 3 registri.**
    - Istruzioni aritmetico-logiche.
  - **Tipo I (immediate) – Lavorano su 2 registri. L'istruzione è suddivisa in un gruppo di 16 bit contenenti informazioni + 16 bit riservati ad una costante.**
    - Istruzioni di accesso alla memoria o operazioni con una costante.
  - **Tipo J (jump) – Lavora senza registri: codice operativo + indirizzo di salto.**
    - Istruzioni di salto incondizionato.

	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
R	op	rs	rt	rd	shamt	funct
I	op	rs	rt	Indirizzo / costante		
J	op	Indirizzo / costante				



La mappa dei codici operativi

FIGURE A.10.2 del Patterson Hennessy

Sommario

- Linguaggio macchina
- Formato R
- Formato I
- Formato J
- Il register file

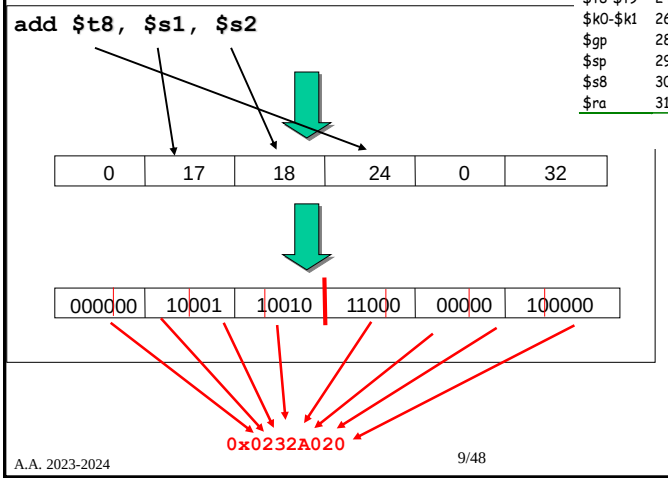
Formato delle istruzioni di tipo R

Contiene:
- Un codice operativo su 6 bit
- Un registro source, rs, su 5 bit (32 registri)
- Un registro target, rt, su 5 bit (32 registri)
- Un registro destinazione, rd, su 5 bit (32 registri)
- Un numero di posizioni di shift (shift amount, shamt), su 5 bit
- Un codice di funzione (cf. selettore ALU), su 6 bit

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

Istruzioni di tipo R: esempio

Nome	Numero	Utilizzo
$zero	0	costante zero
$at	1	riservato per l'assemblatore
$v0-$v1	2-3	valori di ritorno di una procedura
$a0-$a3	4-7	argomenti di una procedura
$t0-$t7	8-15	registri temporanei (non salvati)
$s0-$s7	16-23	registri salvati
$t8-$t9	24-25	registri temporanei (non salvati)
$k0-$k1	26-27	gestione delle eccezioni
$gp	28	puntatore alla global area (dati)
$sp	29	stack pointer
$s8	30	registro salvato (fp)
$ra	31	indirizzo di ritorno



Istruzioni di tipo R: esempi

Nome campo	Op	Rs	rt	rd	Shamt	Funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`add $t8, $s1, $s2`	000000	10001	10010	11000	00000	100000

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`sub $t8, $s1, $s2`	000000	10001	10010	11000	00000	100010

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`and $s1, $s2, $s3`	000000	10010	10011	10001	00000	100100

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`sll $s1, $s2, 3`	000000	X	10010	10001	00011	000000

$s1 = s2*2^3$ Se s2 contiene 20 (0000.....0010100) => s1 conterrà = $20*2^3 = 160$ (0000....0010100000)

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`srl $s1, $s2, 3`	000000	X	10010	10001	00011	000010

$s1 = s2 * 2^{-3}$

Sommario

- Linguaggio macchina
- Formato R
- Formato I
- Formato J
- Il register file

Formato istruzioni di tipo I

I

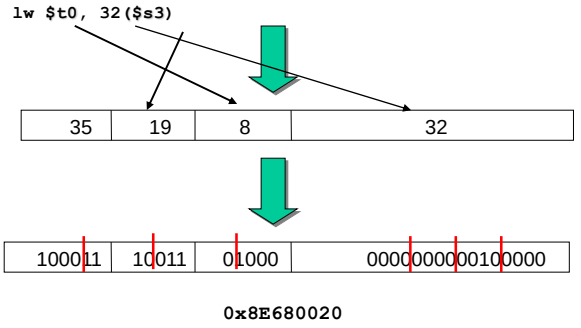
op	rs	rt	costante / indirizzo
6 bit	5 bit	5 bit	16 bit

- In questo caso, i campi hanno il seguente significato:
  - **`op`** identifica il tipo di istruzione;
  - `rs` indica il registro sorgente. Nel caso di una lw contiene il registro base;
  - **`rt`** indica il registro target. Nel caso di una lw, contiene il registro destinazione dell'istruzione di caricamento;
  - **`Costante / indirizzo`**. Nel caso di una lw riporta lo spiazzamento (offset) nel segmento dati, nel caso di una beq riporta lo spiazzamento nel segmento testo.

Istruzioni di tipo I: accesso a memoria

Con questo formato una istruzione **lw (sw)** può indirizzare byte nell'intervallo **-2^{15}** (-32K) ÷ **$+2^{15}$**-1 (32K -1) **rispetto all'indirizzo base:**

indirizzo = indirizzo_base + offset (= costante)

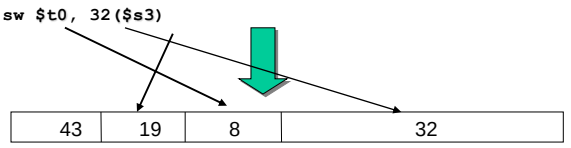


La costante può essere positiva o negativa

Istruzioni di tipo I: accesso memoria

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`lw $t0, 32($s3)`	100011	10011	01000	0000 0000 0010 0000

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`sw $t0, 32($s3)`	101011	10011	01000	0000 0000 0010 0000



Differenza di 1 bit (distanza di Manhattan pari a 1) ->
cambia la direzione del trasferimento con la memoria.

Istruzioni di tipo I: aritmetico-logiche

Nome campo	op	rs	rt	costante
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`addi $t0, $s3, 64`	001000	10011	01000	0000 0000 0100 0000

Nome campo	op	rs	rt	costante
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`andi $t0, $s3, 64`	001100	10011	01000	0000 0000 0100 0000

Nome campo	op	rs	rt	costante
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`slti $t0, $s2, 8`	001010	10010	01000	0000 0000 0000 1000

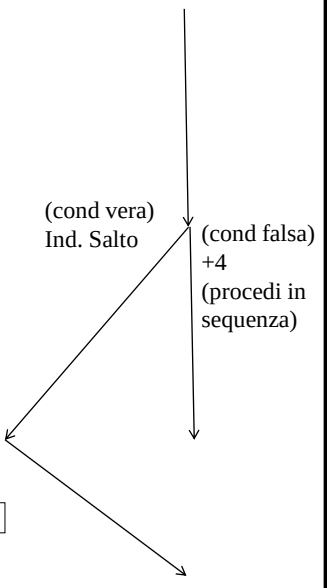
```
# $t0 = 1 if $s2 < 8
```

NB ruolo del registro target: nelle istruzioni di addi e di lw rappresenta **dove nel register file vado a scrivere.** Nelle istruzioni di tipo R e di sw contiene **uno dei dati sorgente.**

Istruzioni di tipo I: salto condizionato

- Salti condizionati relativi:
  - **`beq r1, r2, L1`** (*branch on equal*)
  - **`bne r1, r2, L1`** (*branch on not equal*)

- Salti condizionati relativi:
  - Il flusso sequenziale di controllo cambia solo se la condizione è vera (`beq`)
  - Il calcolo del valore dell'etichetta **`L1`** (**indirizzo di destinazione del salto**) avviene a partire dal Program Counter (PC).
  - Indirizzamento del tipo Base (PC) + Spiazzamento.



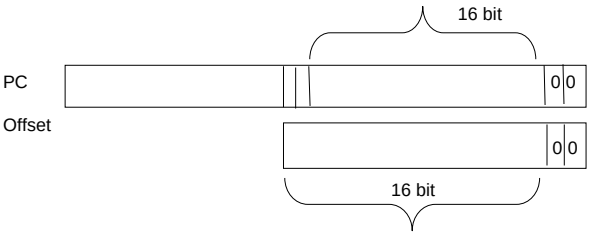
I

op	rs	rt	indirizzo
6 bit	5 bit	5 bit	16 bit

Allargamento dello spazio di indirizzamento relativo

0000	0	0
0100	1	4
1000	2	8
1100	3	12

Gli offset in Byte avranno sempre **00 come ultimi 2 bit** perché gli indirizzi sono multipli di 4.
Calcolo lo spiazzamento in numero di parole invece che di Byte.
Considero 64 Kword (64K istruzioni) invece di 64Kbyte. Lo spazio indirizzabile all'interno del segmento di testo è di 64Kword * 4 = 256Kbyte.
Moltiplicare per 4 vuol dire operare uno shift a sinistra di due posizioni dell'offset



La costante su 16 bit, contenuta nel codice, rappresenta l'offset in termini di numero di istruzioni

Calcolo dell'indirizzo di salto

```
t1 = 10; t0 = 0;          0x0000          addi $t1, $zero, 10   # t1=10
                          0x0004          addi $t0,$zero,0      # t0 =0;

Repeat                    0x0008  loop:    addi $t0, $t0,1       # t0++
{    t0++;                0x000C          ....
     ...                                  .

} until (t0 == t1)        0x0020          bne $t0, $t1, loop
```

Quanto vale il campo costante da inserire nella stringa dell'istruzione bne?

Calcolo dell'indirizzo di salto

Ind Dec	Ind Exadec		Istruzione	# istruzione
000	0x0000		addi $t1, $zero, 10 # N=10	1
004	0x0004		addi $t0,$zero,0 # i =0;	2
008	0x0008	loop:	addi $t0, $t0,1 # i++	3
012	0x000C		....	4
036	0x0024		bne $t0, $t1, loop	
040	0x0028			9

L'indirizzo di destinazione è 0x8 (indirizzo dell'etichetta loop)

Lo spiazzamento del salto in byte è pari a: (0x8 - 0x24) = (8-36) = -28 Byte
Lo spiazzamento del salto in numero di istruzioni è pari a -7 istruzioni

Prova: Indirizzo di salto = Indirizzo PC+4 + Offset (#istruzioni) * 4
loop = 8 → costante = 36 + -7 * 4

5	8	9	-7 = 1111 1111 1111 1001

Istruzioni di tipo I – Branch (esempi)

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`beq $s1, $s2, L1`	000100	10001	10010	0000 0000 0001 1001

L1 = **PC+4 + 100 (**byte) Codifica su 18 bit: 0000 0000 0001 1001(00) in binario.

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`beq $s1, $s2, L1`	000100	10001	10010	1111 1111 1110 0111

L1 = **PC+4 - 100 (**byte) Codifica su 18 bit: 1111 1111 1110 0111(00) in binario.

Osservazioni

Nome campo	op	rs	rt	Indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`beq $s1, $s2, Label`	000100	10001	10010	0000 0000 0001 1000

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`lw $s2, 24($s1)`	100011	10001	10010	0000 0000 0001 1000

Nome campo	op	rs	rt	costante
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`addi $s2,$s1,24`	001000	10001	10010	0000 0000 0001 1000

Salto di 24 istruzioni in avanti.

Istruzioni molto diverse possono distare pochi bit una dall'altra.

Formato R e operazioni logico-matematiche

Non tutte le operazioni logico-matematico, sono di tipo R.

Le operazioni logico-matematiche di tipo R hanno codice operativo 0.

Non tutte le operazioni con codice operativo 0 sono logico-matematiche (ad esempio ci sono le istruzioni di *jr, syscall…*).

Occorre distinguere il funzionamento dell'istruzione elementare dalla sua codifica.

- Codifiche simili (e.g. Tipo R) possono essere condivise da istruzioni di tipo diverso (e.g. aritmetico-logiche, salto).
- Codifiche diverse (e.g. Tipo I e Tipo R) possono essere condivise da istruzioni dello stesso tipo (e.g. add ed addi)

Non c'è corrispondenza 1 a 1, tra tipi strutturali e tipi funzionali.

Sommario

- Linguaggio macchina
- Formato R
- Formato I
- Formato J
- Il register file

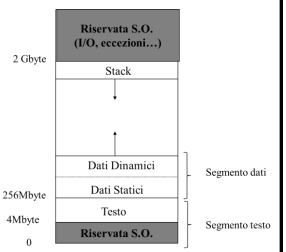
Formato istruzioni di tipo J

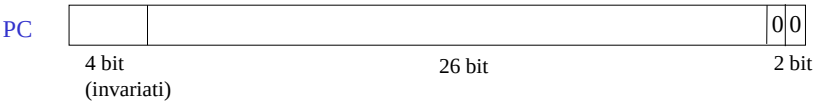
- E' il formato usato per le istruzioni di salto incondizionato *(jump)*:

j	indirizzo
op	indirizzo

6 bit 26 bit

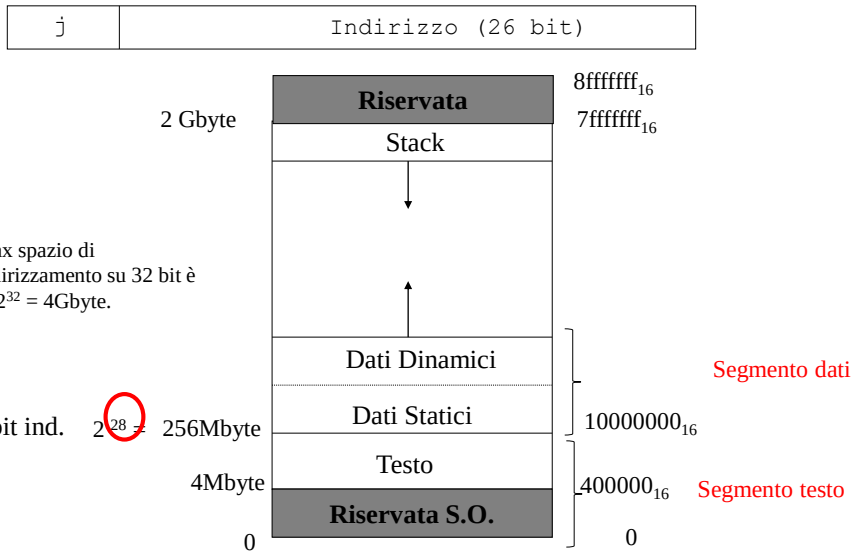
- In questo caso, i campi hanno il seguente significato:
  - **op** indica il tipo di operazione**;**
  - **indirizzo** (composto da **26-bit**) riporta una parte (26 bit su 32) dell'indirizzo **assoluto** di destinazione del salto.
- I 26-bit del campo **indirizzo** rappresentano un indirizzo di parola **(word address)** 2^{26} parole = 256 Mbyte (segmento testo).



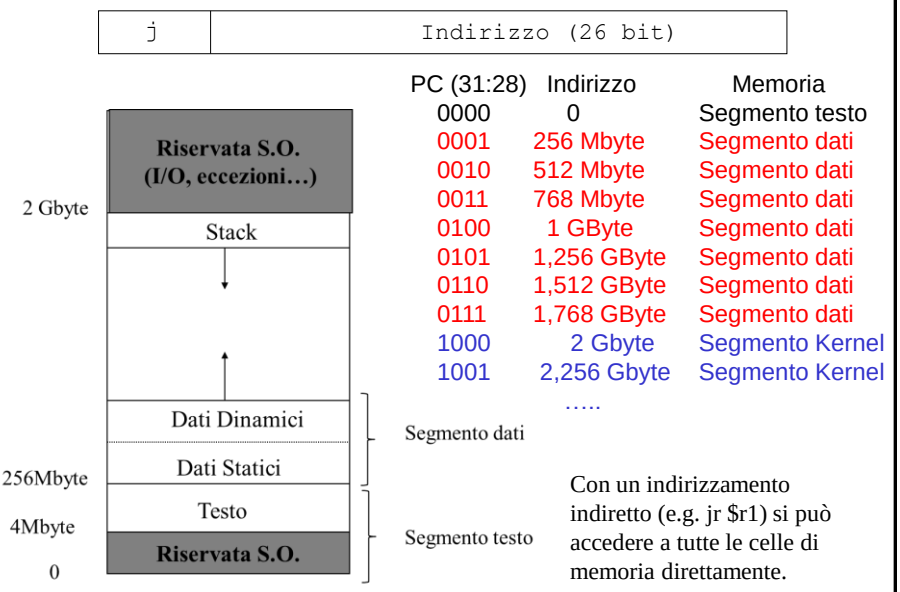


$0 \le$ indirizzo $< 2^{28} = 256$ Mbyte **(segmento testo!)**

Organizzazione logica della memoria



Accesso alla memoria



PC (31:28)	Indirizzo	Memoria
0000	0	Segmento testo
0001	256 Mbyte	Segmento dati
0010	512 Mbyte	Segmento dati
0011	768 Mbyte	Segmento dati
0100	1 GByte	Segmento dati
0101	1,256 GByte	Segmento dati
0110	1,512 GByte	Segmento dati
0111	1,768 GByte	Segmento dati
1000	2 Gbyte	Segmento Kernel
1001	2,256 Gbyte	Segmento Kernel
…..		

Con un indirizzamento indiretto (e.g. jr $r1) si può accedere a tutte le celle di memoria direttamente.

Codifica delle istruzioni

- Tutte le istruzioni MIPS hanno la **stessa** dimensione **(32 bit) – Architettura RISC.**
- I 32 bit hanno un significato diverso a seconda del formato (o tipo) di istruzione
  - il tipo di istruzione è riconosciuto in base al valore di alcuni bit **(6 bit)** più significativi **(codice operativo - *OPCODE*)**
- Le istruzioni MIPS sono di **3** tipi (formati):
  - **Tipo R (register) – Lavorano su 3 registri.**
    - Istruzioni aritmetico-logiche.
  - **Tipo I (immediate) – Lavorano su 2 registri. L'istruzione è suddivisa in un gruppo di 16 bit contenenti informazioni + 16 bit riservati ad una costante.**
    - Istruzioni di accesso alla memoria o operazioni contenenti delle costanti.
  - **Tipo J (jump) – Lavora senza registri: codice operativo + indirizzo di salto.**
    - Istruzioni di salto incondizionato.

	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
R	op	rs	rt	rd	shamt	funct
I	op	rs	rt	Indirizzo / costante		
J	op	Indirizzo / costante				

Formati e tipi di istruzioni

Tipi di istruzioni di un'ISA
- Istruzioni aritmetiche
- Istruzioni di accesso a memoria
- Istruzioni di controllo di flusso
- (Istruzioni di I/O)

Formati
- R - Registro
- I – Immediato
- J - Jump (salto)

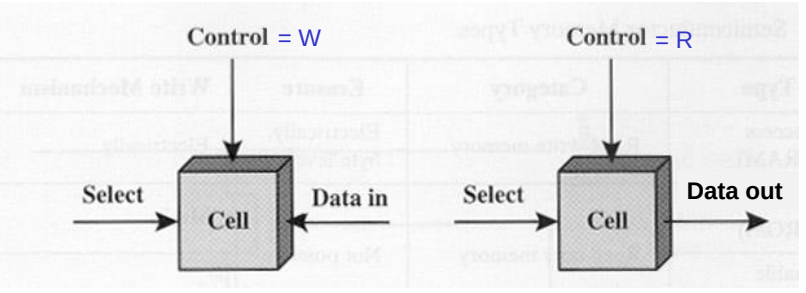
Non c'è corrispondenza 1 a 1 tra tipi di istruzioni e formati

Sommario

- Linguaggio macchina
- Formato R
- Formato I
- Formato J
- Il register file

Cella di memoria

La memoria è suddivisa in celle, ciascuna delle quali assume un valore binario stabile.
Si può scrivere il valore 0/1 in una cella.
Si può leggere il valore di ciascuna cella.



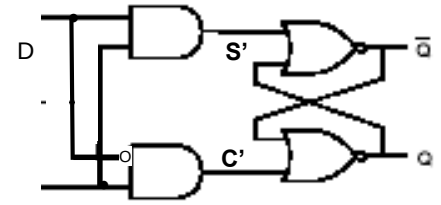
Control (lettura – scrittura)
Select (selezione)
Data in oppure Data out (sense)

Base

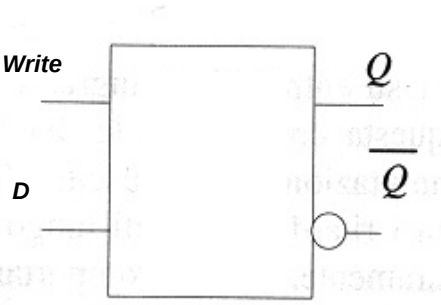
Latch sincrono come elemento di memoria

L'ingresso "clock" del bistabile viene utilizzato come segnale di write

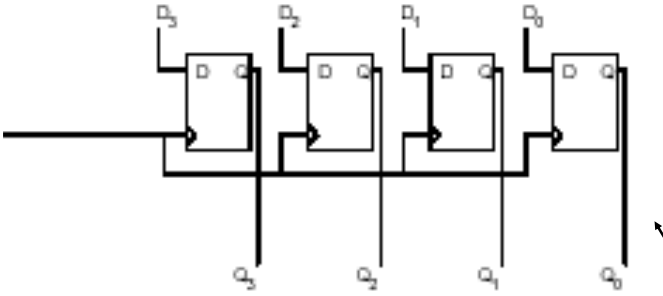
E' trasparente quando Write = 1
Se Write = 1 $Q_{t+1} = D$
Se Write = 0 $Q_{t+1} = Q_t$



Clk = Write



Registri

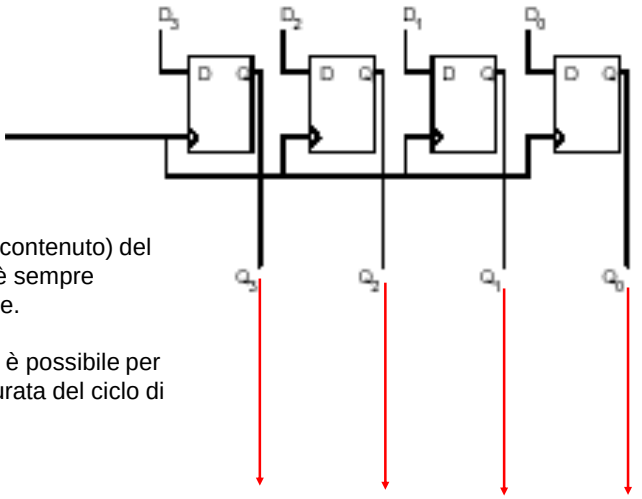


Un registro a 4 bit.
Memorizza 4 bit.
Tutti gli elementi di memoria ricevono lo stesso segnale di write

NB Non è un registro a scorrimento (shift register!)

Latch o flip-flop di tipo D

Lettura di un registro

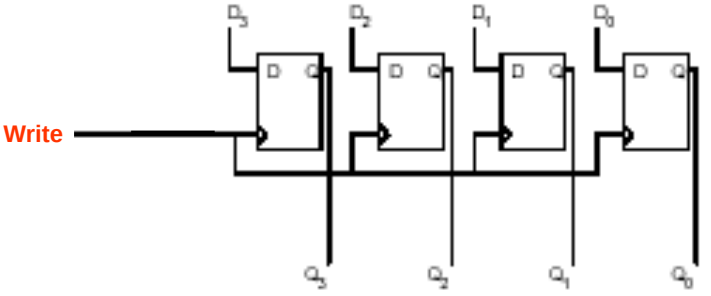


Lo stato (contenuto) del bistabile è sempre disponibile.

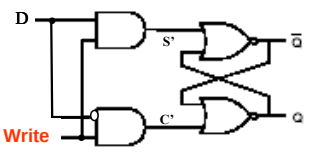
La lettura è possibile per tutta la durata del ciclo di clock.

Scrittura di un registro

Ad ogni colpo di clock lo stato del registro assume il valore dell'ingresso dati.

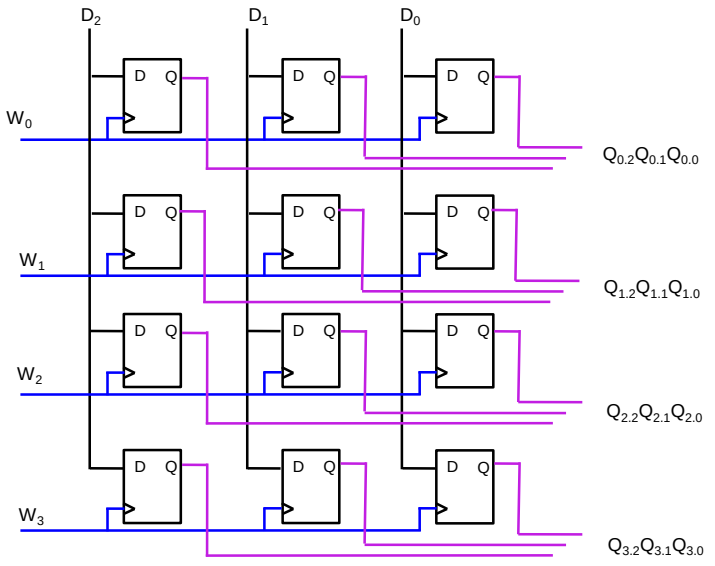


Cosa occorre modificare perchè il registro venga scritto quando serve?
Introdurre una sorta di *"apertura del cancello (chiusura circuito)"* .
Può essere sincronizzata o meno con il clock.
3
Il segnale di write apre il passaggio al conteuto di D attraverso il latch. Quando il segnale di Write è a zero, lo stato non varia.

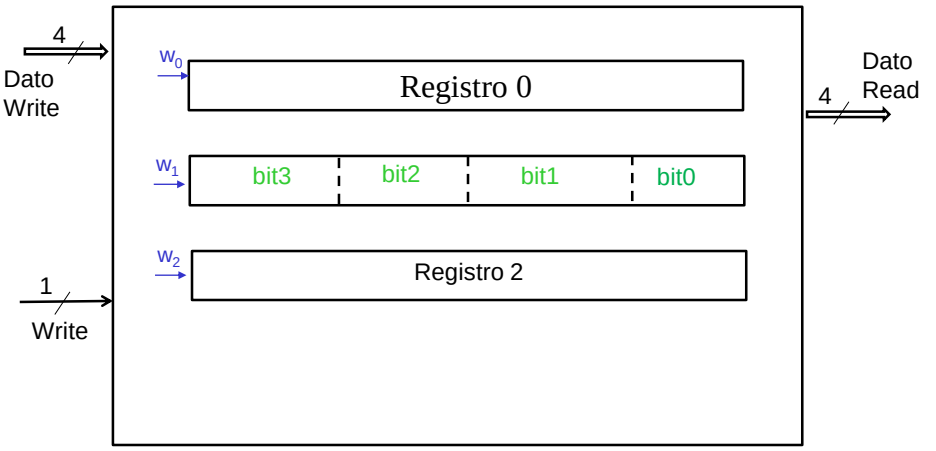


Registro

Nucleo di un banco 4 registri x 3 bit

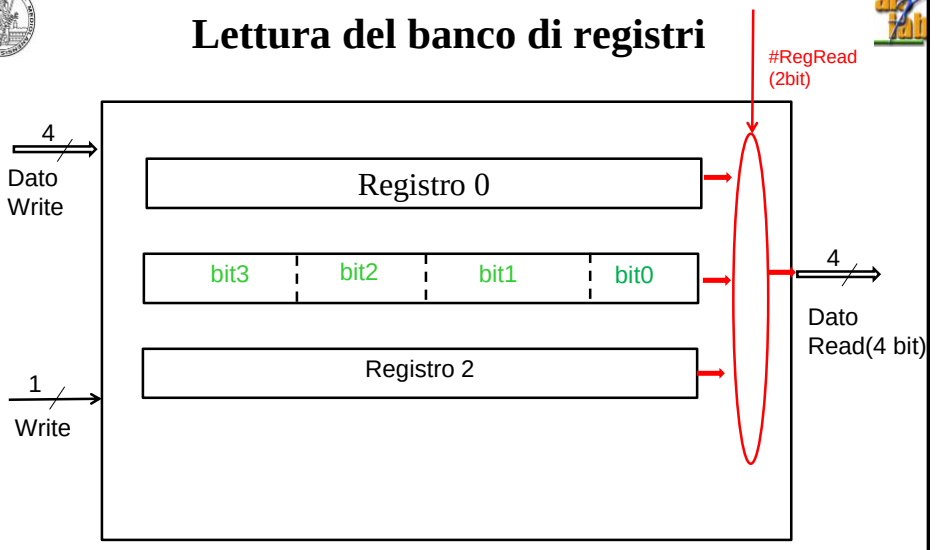


Funzionamento di un banco di registri (3 registri da 4 bit)



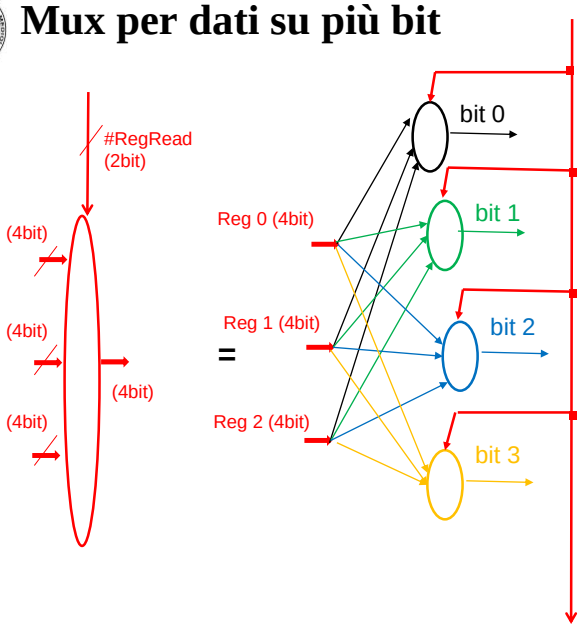
Come seleziono il dato da leggere fra i 3 dati possibili?
Come seleziono il registro su cui scrivere fra i 3 registri?

Lettura del banco di registri



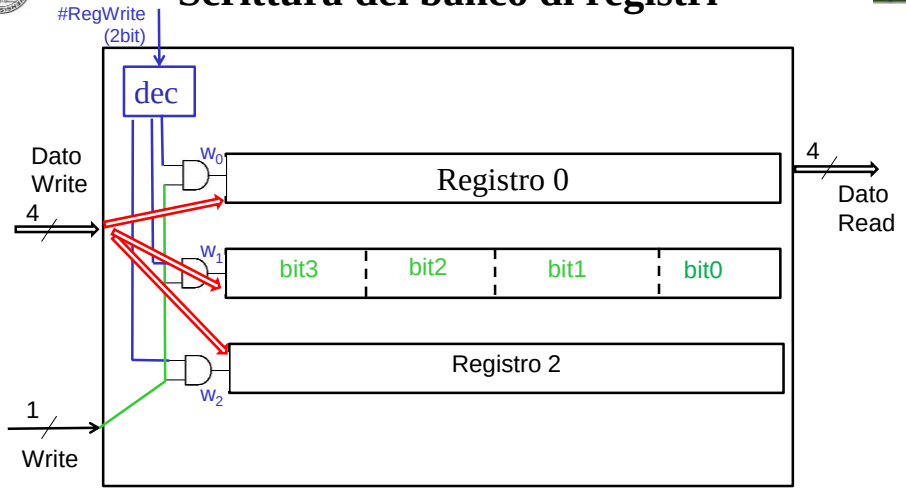
Seleziono uno dei registri = porto in uscita l'uscita Q di tutti i bit del registro selezionato

Mux per dati su più bit



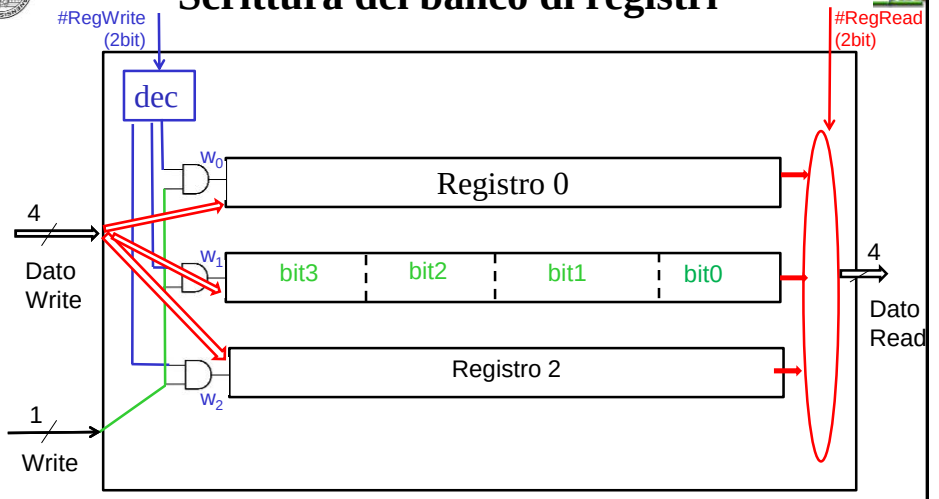
Mux a più dati:
1) Unico circuito di decodifica
2) Tante porte OR quante l'ampiezza del dato.

Scrittura del banco di registri



Invio il dato da scrivere a tutti i registri ma devo inviare il segnale di scrittura solamente al registro selezionato

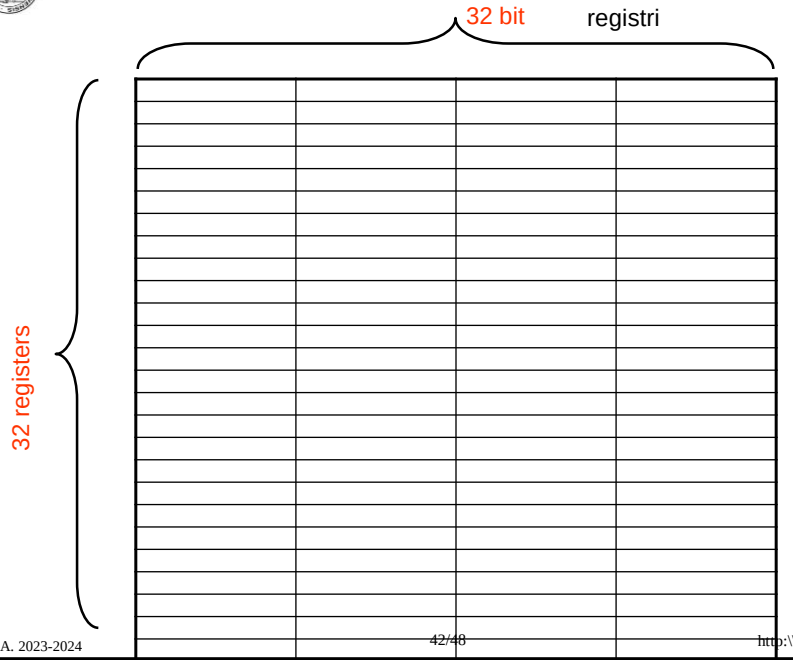
Scrittura del banco di registri



Invio il dato da scrivere a tutti i registri ma devo inviare il segnale di scrittura solamente al registro selezionato

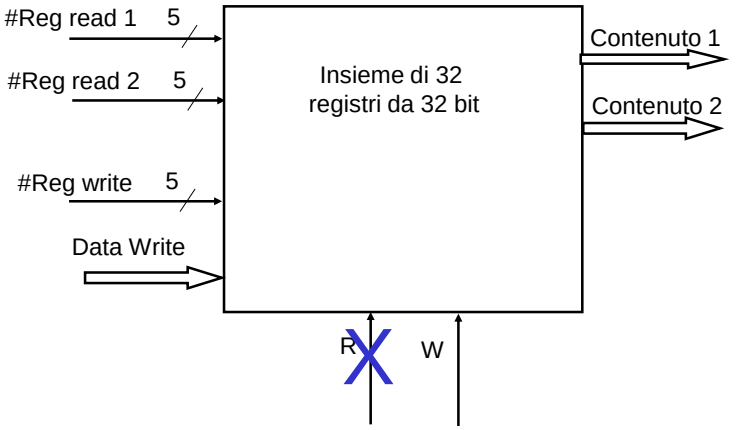
Banco di Registri MIPS

Struttura costituita da un insieme di registri



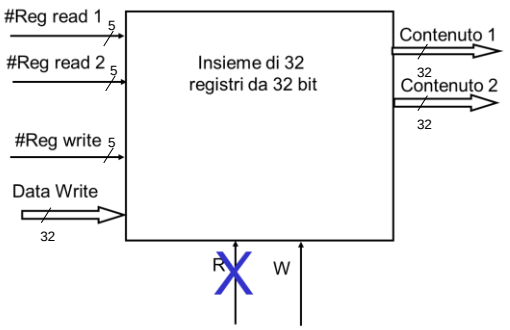
Register file

Banco di registri utilizzabile come memoria:
- 2 porte di lettura
- 1 porta di scrittura



Possono essere letti fornendo il numero del registro in lettura (uscita)
Possono essere scritti fornendo il numero di registro in scrittura (ingresso) + segnale di write

Gestione del register file

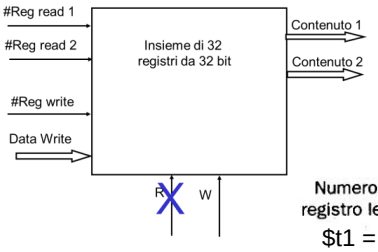


La lettura **non modifica** il contenuto di un registro (collego l'uscita Slave con il circuito combinatorio).

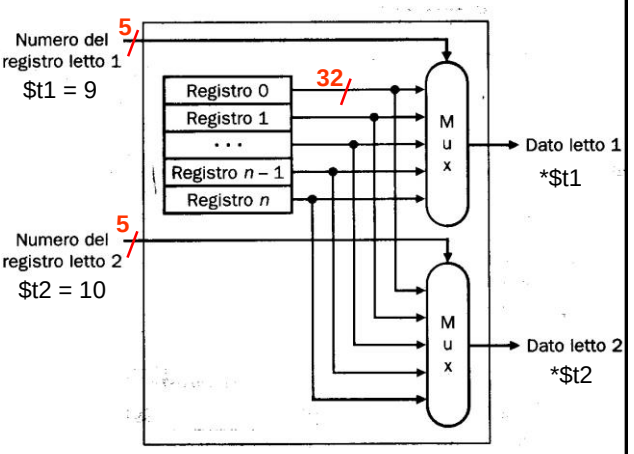
La scrittura invece **modifica** il contenuto del registro. Occorre il segnale Write esplicito.

#bit_indirizzamento = $\log_2$ #bit

Porta di lettura del register file



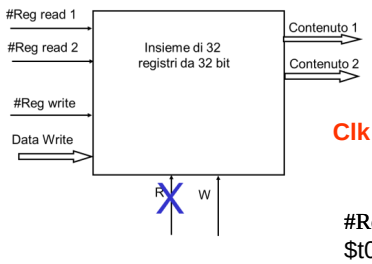
add $t0, $t1, $t2



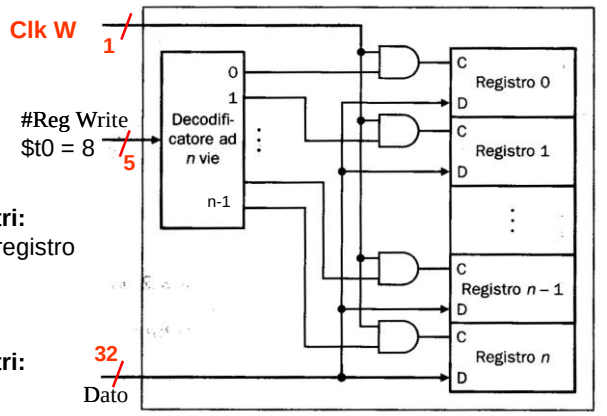
Un mux per ogni porta di lettura.

Ciascun Mux la la complessità di 32 mux, uno per ogni bit.

Porta di scrittura del register file



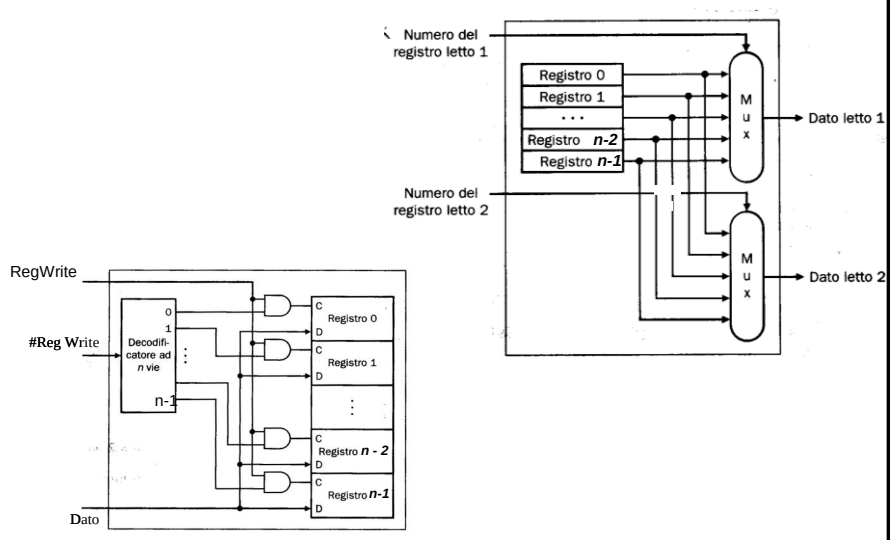
add $t0, $t1, $t2



Ingresso C del latch dei registri:
Decodificatore per indirizzare il registro
AND
Comando W

Ingresso D del latch dei registri:
Bit dato corrispondente.

Register file del MIPS



Sommario

- Linguaggio macchina
- Formato R
- Formato I
- Formato J
- Il register file