


L'Instruction Set Architecture ed il Linguaggio Assembly

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Scienze dell'Informazione
borghese@dsi.unimi.it

Università degli Studi di Milano

Riferimento Patterson: Capitolo 2 (fino a 2.3), A.1, A.2, A.5


Sommario

L'ISA ed il linguaggio macchina

L'Assembly

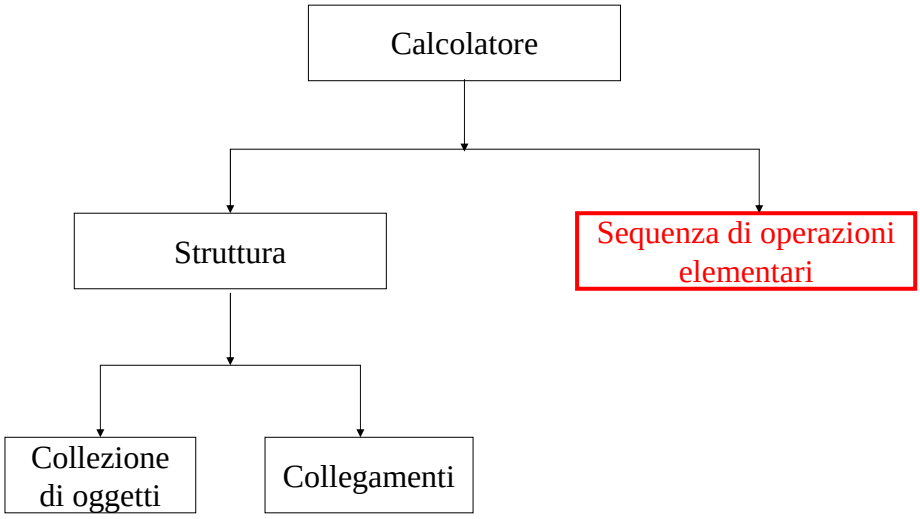
I registri

I tipi di istruzioni: istruzioni aritmetiche

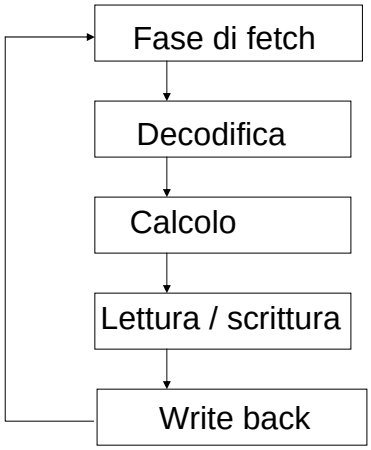
Organizzazione della memoria

Istruzioni di accesso alla memoria.

Descrizione di un elaboratore



Caratteristiche di un'ISA



Formato e codifica di un'istruzione
- tipo e dimensione.

Posizione degli operandi e risultato.
- quanti?
- memoria e/o registri

Tipo e dimensione dei dati

Operazioni consentite

Definizione di un'ISA

Definizione del funzionamento: insieme delle istruzioni (interfaccia verso i linguaggi ad alto livello).

- Tipologia di istruzioni.
- Meccanismo di funzionamento.

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

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

Tipi di istruzioni

- Le istruzioni comprese nel linguaggio macchina di ogni calcolatore possono essere classificate nelle seguenti quattro categorie:
  - Istruzioni aritmetico-logiche;
  - Istruzioni di trasferimento da/verso la memoria *(load/store);*
  - Istruzioni di salto condizionato e non condizionato per il controllo del flusso di programma;
  - Istruzioni di trasferimento in ingresso/uscita (I/O).

Le istruzioni in linguaggio macchina

- Linguaggio di programmazione direttamente comprensibile dalla macchina
  - Le parole di memoria sono interpretate come *istruzioni*
  - Vocabolario è *l'insieme delle istruzioni (instruction set)*

Programma in linguaggio ad alto livello (C)

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

Programma in linguaggio macchina

```
011100010101010
000110101000111
000010000010000
001000100010000
```

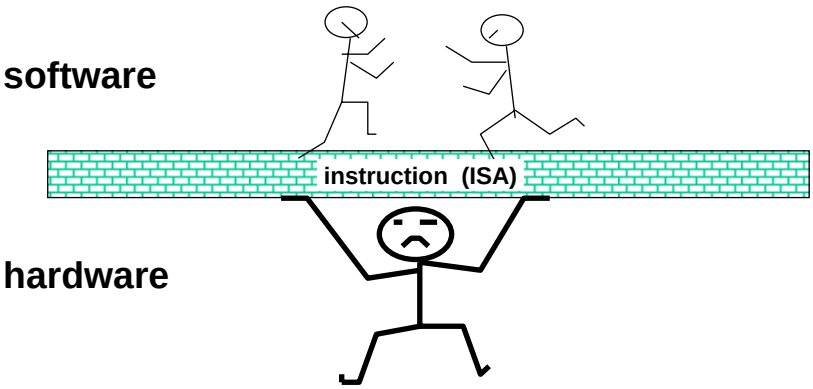

Le istruzioni di un'ISA

Devono contenere tutte le informazioni necessarie ad eseguire il ciclo di esecuzione dell'istruzione. Registri, comandi, ...

Ogni architettura di processore ha il suo linguaggio macchina

- Architettura definita dall'insieme delle istruzioni elementari.
  - **ISA (Instruction Set Architecture)**
- Due processori con lo stesso linguaggio macchina hanno la stessa architettura delle istruzioni anche se le implementazioni hardware possono essere diverse.
- Consente al SW di accedere direttamente all'hardware di un calcolatore

Insieme delle istruzioni



Quale è più facile modificare?

Sommario

L'ISA ed il linguaggio macchina

L'Assembly

I registri

I tipi di istruzioni: istruzioni aritmetiche

La memoria


Linguaggio assembly

- Le istruzioni assembly 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'assembly 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.


Linguaggio C: somma dei primi 100 numeri

```
main()
{
      int i;
      int sum = 0;
      for (i = 0; i <= 100; i = i + 1)
              sum = sum + i*i;
      printf("La somma da 0 a 100 è %d\n",sum);
}
```

Linguaggio assembly: somma dei primi 100 numeri

```
.text                          addu $t9, $t8, $t4
.align 2                       addu $t9, $t8, $t7
.globl main                    sw  $t9, 24($sp)
main:                          addu $t7, $t6, 1
        subu $sp, $sp, 32      sw $t7, 28($sp)
        sw $ra, 20($sp)        bne $t5, 100, loop
        sw $a0, 32 ($sp)
        sw $0, 24($sp)         ……
        sw $0, 28($sp)
loop:   lw  $t6, 28($sp)
        lw $t8, 24($sp)
        mult $t4, $t6, $t6
```


Assembly come linguaggio di programmazione

- Principali *svantaggi* della programmazione in linguaggio assembly:
  - Mancanza di portabilità dei programmi su macchine diverse
  - Maggiore lunghezza, difficoltà di comprensione, facilità d'errore rispetto ai programmi scritti in un linguaggio ad alto livello
- Principali *vantaggi* della programmazione in linguaggio assembly:
  - Ottimizzazione delle prestazioni.
  - Massimo sfruttamento delle potenzialità dell'hardware sottostante.
- Le strutture di controllo hanno forme limitate
- Non esistono tipi di dati all'infuori di interi, virgola mobile e caratteri.
- La gestione delle strutture dati e delle chiamate a procedura deve essere fatta in modo esplicito dal programmatore.

Assembly come linguaggio di programmazione

- Alcune applicazioni richiedono un approccio *ibrido* nel quale le parti più critiche del programma sono scritte in assembly (per massimizzare le prestazioni) e le altre parti sono scritte in un linguaggio ad alto livello (le prestazioni dipendono dalle capacità di ottimizzazione del compilatore).

  Esempio: Sistemi embedded o dedicati

Sistemi "automatici" di traduzione da linguaggio ad alto livello (linguaggio C) ad assembly e codice binario ed implementazione circuitale (e.g. sistemi di sviluppo per FPGA).

Sommario

L'ISA ed il linguaggio macchina

L'Assembly

I registri

I tipi di istruzioni: istruzioni aritmetiche

Organizzazione della memoria

Istruzioni di accesso alla memoria.

I registri

- I registri sono associati alle variabili di un programma dal compilatore.
- Un processore possiede un numero limitato di registri: ad esempio il processore MIPS possiede **32 registri composti da 32-bit (word), register file.**
- I registri possono essere direttamente indirizzati mediante il loro numero progressivo (0, …, 31) preceduto da $: ad es.
  `$0, $1, …, $31`
- Per convenzione di utilizzo, sono stati introdotti nomi simbolici significativi. Sono preceduti da $, ad esempio:
  `$s0,$s1,...,$s7($s8)` Per indicare variabili in C

  `$t0, $t1, ... $t9` Per indicare variabili temporanee

Uso dei registri: convenzioni

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

I registri per le operazioni floating point

- Esistono 32 registri utilizzati per l'esecuzione delle istruzioni.
- Esistono **32** registri per le operazioni floating point (virgola mobile) indicati come

  `$f0, …, $f31`

  – Per le operazioni in doppia precisione si usano i registri contigui

  `$f0, $f2, $f4, …`

Sommario

L'ISA ed il linguaggio macchina

L'Assembly

I registri

I tipi di istruzioni: istruzioni aritmetiche

Organizzazione della memoria

Istruzioni di accesso alla memoria.

Istruzioni aritmetico-logiche

- In MIPS, un'istruzione aritmetico-logica possiede in generale *tre* operandi: i due registri contenenti i valori da elaborare *(registri sorgente)* e il registro contenente il risultato *(registro destinazione).*
- L'ordine degli operandi è **fisso:** prima il registro contenente il risultato dell'operazione e poi i due operandi.
- L'istruzione assembly contiene il codice operativo e tre campi relativi ai tre operandi:

```
OPCODE  DEST,  SORG1, SORG2
```

Le operazioni vengono eseguite esclusivamente sui registri.

Esempi: istruzioni add e sub

Codice C: `R = A + B;`

Codice assembler MIPS:

```
add $s0,  $s1,  $s2
add rd,   rs,   rt
```

mette la somma del contenuto di rs e rt in rd:

```
add rd, rs, rt      # rd ← rs + rt
```

Nella traduzione da linguaggio ad alto livello a linguaggio assembly, le variabili sono associate ai registri dal compilatore

sub serve per sottrarre il contenuto di due registri sorgente rs e rt:

```
sub rd rs rt
```

e mettere la differenza del contenuto di rs e rt in rd

```
sub rd, rs, rt      # rd ← rs - rt
```

Istruzioni aritmetico-logiche

Il fatto che ogni istruzione aritmetica ha tre operandi sempre nella stessa posizione consente di semplificare l'hw, ma complica alcune cose…

Codice C:

```
Z = A – (B + C + D) =>
E = B + C + D; Z = A – E;
```

Suppongo che le variabili siano contenute nei seguenti registri:
A -> $s0 B -> $s1 C -> $s2 D -> $s3 Z -> $s5

Codice MIPS:

```
add $t0, $s1, $s2
add $t1, $t0, $s3
sub $s5, $s0, $t1
```


Istruzioni aritmetico-logiche

- Operazioni con un numero di operandi maggiore di tre possono essere effettuate scomponendole in operazioni più semplici.
- Ad esempio, per eseguire la somma e sottrazione delle variabili `A.. D` nella variabile `Z` servono tre istruzioni :

Codice C:

```
Z = A + B - C + D
```

Codice MIPS:

```
add $t0, $s0, $s1
sub $t1, $t0, $s2
add $s5, $t1, $s3
```

Implementazione alternativa

- Operazioni con un numero di operandi maggiore di tre possono essere effettuate scomponendole in operazioni più semplici.
- Ad esempio, per eseguire la somma e sottrazione delle variabili `A.. D` nella variabile `Z` servono tre istruzioni :

Codice C: **`Z = (A + B) – (C – D)`**

Codice MIPS:

```
add $t0, $s0, $s1
sub $t1, $s2, $s3
sub $s5, $t0, $t1
```

Quale implementazione è la migliore? Sceglierà il compilatore il quale cerca di massimizzare la parallelizzazione del codice.

`add`: varianti

- **`addi $s1, $s2, 100 #add immediate`**
  - Somma una costante: il valore del secondo operando è presente nell'istruzione come costante e sommata estesa in segno.
    `rt ← rs + costante`
- **`addu $s0, $s1, $s2 #add unsigned`**
  - Evita overflow: la somma viene eseguita considerando gli addendi sempre positivi. Il bit più significativo è parte del numero e non è bit di segno.
- **`addiu $s0, $s1, 100 #add immediate unsigned`**
  - Somma una costante ed evita overflow.

Moltiplicazione

- Due istruzioni:
  - `mult rs rt`
  - `multu rs rt` `# unsigned`
- Il registro destinazione è ***implicito.***
- Il risultato della moltiplicazione viene posto sempre in due registri dedicati di una parola (special purpose) denominati ***hi (High order word)*** e ***lo (Low order word)***
- La moltiplicazione di due numeri rappresentabili con 32 bit può dare come risultato un numero non rappresentabile in 32 bit

Moltiplicazione

- Il risultato della moltiplicazione si preleva dal registro **hi** e dal registro **lo** utilizzando le due istruzioni:
  - `mfhi rd` `# move from hi`
    - Sposta il contenuto del registro **hi** nel registro **rd**
  - `mflo rd` `# move from lo`
    - Sposta il contenuto del registro **lo** nel registro **rd**

Test sull'overflow

Risultato del prodotto

Pseudoistruzioni

- Per semplificare la programmazione, MIPS fornisce un insieme di *pseudoistruzioni*
- Le pseudoistruzioni sono un modo compatto ed intuitivo di specificare un insieme di istruzioni
  - Non hanno un corrispondente 1 a 1 con le istruzioni dell'ISA.
- La traduzione della pseudoistruzione nelle istruzioni equivalenti è attuata automaticamente dall'assemblatore

Esempi:

- `move $t0, $t1`
  - `add $t0, $zero, $t1` `# (in alternativa) addi $t0, $t1, 0`
- `mul $s0, $t1, $t2`
  - `mult $t1, $t2`
  - `mflo $s0`
- `div $s0, $t1, $t2`
  - `div $t1, $t2`
  - `mflo $s0`

Sommario

L'ISA ed il linguaggio macchina

L'Assembly

I registri

I tipi di istruzioni: istruzioni aritmetiche

Organizzazione della memoria

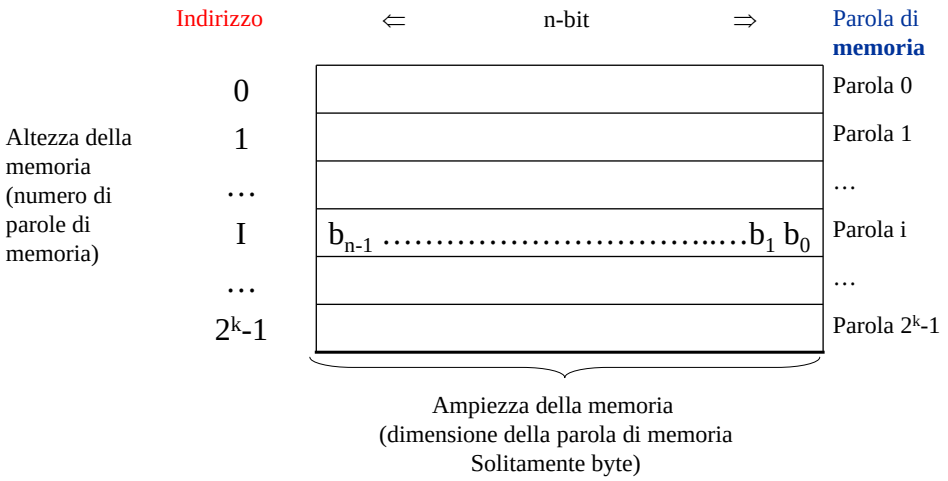
Istruzioni di accesso alla memoria.

Memoria Principale

- Le memorie in cui ogni locazione può essere raggiunta in un breve e prefissato intervallo di tempo misurato a partire dall'istante in cui si specifica l'indirizzo desiderato, vengono chiamate memorie ad accesso casuale *(Random Access Memory – RAM)*
- Nelle RAM il *tempo di accesso alla memoria* (tempo necessario per accedere ad una parola di memoria) è *fisso* e *indipendente* dalla posizione della parola alla quale si vuole accedere.
- Il contenuto delle locazioni di memoria può rappresentare sia istruzioni che dati, sui quali l'architettura sta lavorando.
- La memoria può essere visto come un array monodimensionale.

La memoria

- La memoria è vista come un unico grande array uni-dimensionale.
- Un **indirizzo di memoria** costituisce un indice all'interno dell'array.



Indirizzi nella memoria principale

- La memoria è organizzata in *parole* composte da *n-bit* che possono essere indirizzati separatamente.
- Ogni parola di memoria è associata ad un indirizzo composto da *k-bit.*
- I 2^k indirizzi costituiscono lo *spazio di indirizzamento* del calcolatore. Ad esempio un indirizzo composto da *32-bit* genera uno spazio di indirizzamento di 2^{32} o *4Gbyte*.

Memoria Principale e parole

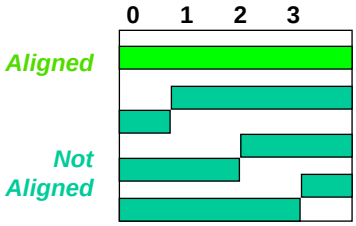
- In genere, la dimensione della parola di memoria non coincide con la dimensione dei registri contenuti nella *CPU*.
- Per ottimizzare i tempi, ad ogni trasferimento vengono trasferiti contemporaneamente un numero di byte pari o multiplo del numero di byte che costituisce la parola dell'architettura.

  ⇒ l'operazione di *load/store* di una parola avviene in un singolo ciclo di clock del bus.
- Le parole hanno quindi generalmente indirizzo in memoria che è multiplo di 4.

=> Problema dell'allineamento dei dati.

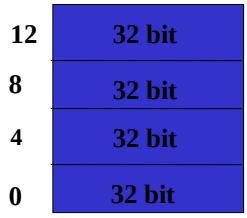
Addressing Objects: Alignment

Alignment: require that objects fall on address that is multiple of their size.



In MIPS è opportuno che ogni parola (word) inizi ad un indirizzo multiplo di 4.
Questo è sempre vero per le istruzioni, può essere desiderabile per i dati.

Indirizzamento della memoria MIPS



byte

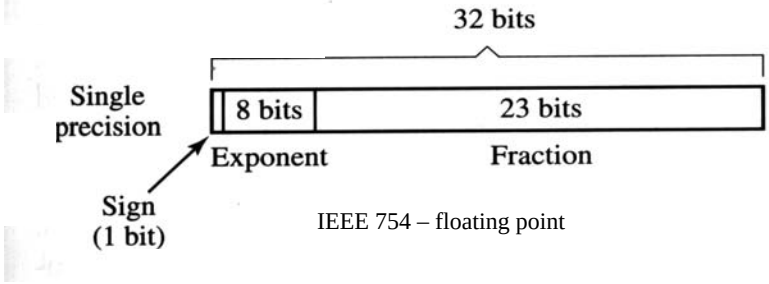
2^k-4	2^k-3	2^k-2	2^k-1
8	9	10	11
4	5	6	7
0	1	2	3

Indirizzamento dei byte all'interno della parola

MIPS utilizza un **indirizzamento al byte**, cioè l'indice punta ad un byte di memoria byte consecutivi hanno indirizzi consecutivi indirizzi di parole consecutive (adiacenti) differiscono di un fattore 4 (8-bit x 4 = 32-bit): ad ogni indirizzo è associato un byte.

⇐ 32-bit = 1 Word ⇒

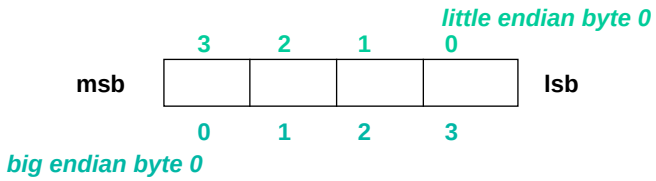
1 Byte = MSB	1 Byte	1 Byte	1 Byte=LSB
8-bit	8-bit	8-bit	8-bit



IEEE 754 – floating point

Addressing Objects: Endianess

- Big Endian: address of most significant byte = word address (xx00 = Big End of word)
  - IBM 360/370, Motorola 68k, MIPS, Sparc, HP
- Little Endian: address of least significant byte = word address (xx00 = Little End of word)
  - Intel 80x86, DEC Vax, DEC Alpha (Windows NT)



Disposizione in memoria

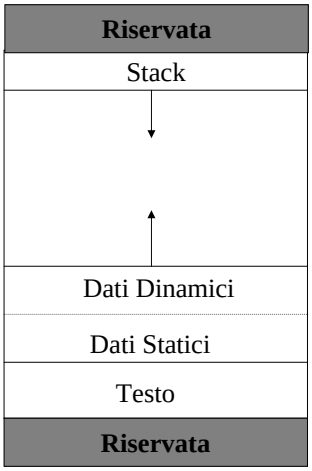
Little endian		Big endian
Word 1 – byte 0	Word address	Word 1 – byte 3
Word 0 – byte 3		Word 0 – byte 0
Word 0 – byte 2		Word 0 – byte 1
Word 0 – byte 1		Word 0 – byte 2
Word 0 – byte 0	Word address	Word 0 – byte 3

Organizzazione logica della memoria

Nei sistemi basati su processore MIPS (e Intel) la memoria è solitamente divisa in **tre** parti:

- **Segmento testo**: contiene le **istruzioni** del programma
- **Segmento dati**: ulteriormente suddiviso in:
  - ***dati statici*:** contiene dati la cui dimensione è conosciuta al momento della compilazione e il cui intervallo di vita coincide con l'esecuzione del programma
  - ***dati dinamici*:** contiene dati ai quali lo spazio è allocato dinamicamente al momento dell'esecuzione del programma su richiesta del programma stesso.
- **Segmento stack**: contiene lo stack allocato automaticamente da un programma durante l'esecuzione.

Organizzazione logica della memoria



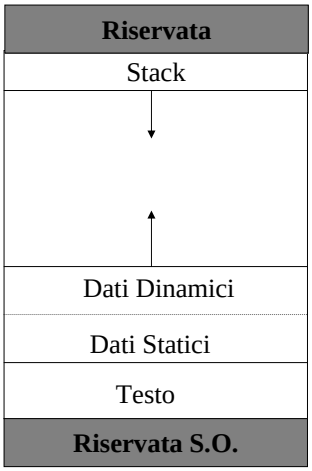
Organizzazione logica della memoria

2 Gbyte

256Mbyte

4Mbyte

0



$7fffffff_{16}$

10000000_{16}

400000_{16}

0

Sommario

L'ISA ed il linguaggio macchina

L'Assembly

I registri

I tipi di istruzioni: istruzioni aritmetiche

Organizzazione della memoria

Istruzioni di accesso alla memoria.

Istruzioni di trasferimento dati

- Gli operandi di una istruzione aritmetica devono risiedere nei registri che sono in numero limitato (32 nel MIPS). I programmi in genere richiedono un numero maggiore di variabili.
- Cosa succede ai programmi i cui dati richiedono più di 32 registri (32 variabili)?
  Alcuni dati risiedono in memoria.
- La tecnica di mettere le variabili meno usate (o usate successivamente) in memoria viene chiamata ***Register Spilling***.

Servono istruzioni apposite per trasferire dati da memoria a registri e viceversa


Istruzioni di trasferimento dati

- MIPS fornisce due operazioni base per il trasferimento dei dati:
  - **lw (load word)** per trasferire una parola di memoria in un registro della CPU
  - **sw (store word)** per trasferire il contenuto di un registro della CPU in una parola di memoria

lw e sw richiedono come argomento l'indirizzo della locazione di memoria sulla quale devono operare


Istruzione *load*

- L'istruzione di *load* trasferisce una copia dei dati/istruzioni contenuti in una specifica locazione di memoria ai registri della *CPU*, lasciando inalterata la parola di memoria:

```
load LOC, r1          # r1 ← [LOC]
```

- La *CPU* invia l'indirizzo della locazione desiderata alla memoria e richiede un'operazione di lettura del suo contenuto.
- La memoria effettua la lettura dei dati memorizzati all'indirizzo specificato e li invia alla *CPU*.

Istruzione di *store*

- L'istruzione di *store* trasferisce una parola di informazione dai registri della *CPU* in una specifica locazione di memoria, sovrascrivendo il contenuto precedente di quella locazione:

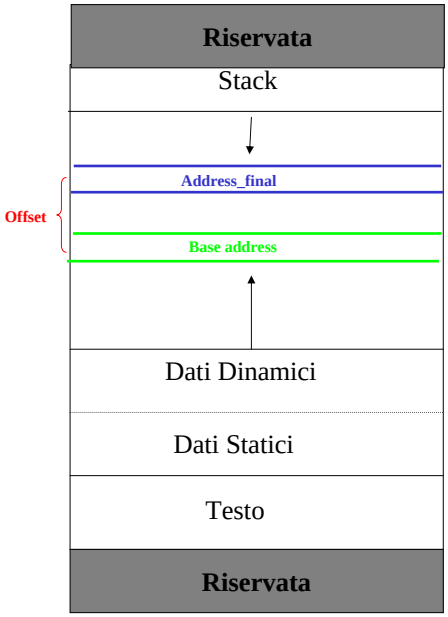
```
store r2, LOC              # [LOC] ← r2
```

- La *CPU* invia l'indirizzo della locazione desiderata alla memoria, assieme con i dati che vi devono essere scritti e richiede un'operazione di scrittura.
- La memoria effettua la scrittura dei dati all'indirizzo specificato.

Indirizzamento della memoria

Base + spiazzamento
Base + Offset

Address_final = Base_address + Offset



Istruzione lw

- Nel MIPS, l'istruzione **lw** ha tre argomenti:
  - il *registro destinazione* in cui caricare la parola letta dalla memoria
  - una costante o *spiazzamento* (*offset)*
  - un registro base (*base register*) che contiene il valore dell'indirizzo base *(base address)* da sommare alla costante.
- L'indirizzo della parola di memoria da caricare nel registro destinazione è ottenuto dalla somma della costante e del contenuto del registro base.

Istruzione lw: trasferimento da memoria a registro

```
lw $s1, 100($s2)     # $s1 ← M[$s2 + 100]
```

Al registro destinazione $s1 è assegnato il valore contenuto all'indirizzo di memoria ($s2 + 100) ***in byte****.*

Istruzione sw: trasferimento da registro a memoria

Possiede argomenti analoghi alla lw

Esempio:

```
sw $s1, 100($s2)          # M[$s2 + 100] ← $s1
```

Alla locazione di memoria di indirizzo ($s2 + 100) è assegnato il valore contenuto nel registro $s1

lw & sw: esempio di compilazione

Codice C: `A[12] = h + A[8];`

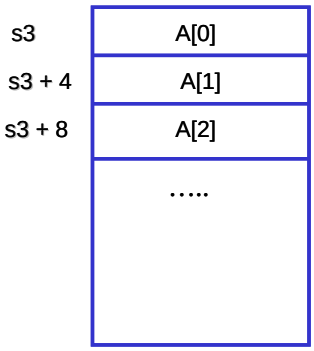
- Si suppone che:
  - la variabile **h** sia associata al registro **$s2**
  - l'indirizzo del primo elemento dell'array *(base address)* sia contenuto nel registro **$s3 (A[0])**

Codice MIPS:

```
lw $t0, 32($s3)          # $t0 ← M[$s3 + 32]
add $t0, $s2, $t0        # $t0 ← $s2 + $t0
sw $t0, 48($s3)          # M[$s3 + 48] ← $t0
```

Memorizzazione di un vettore

- L'elemento numero **i-esimo** di un array si troverà nella locazione
  `br + 4 * i` dove:
  - **`br`** è il registro base;
  - **`i`** è l'indice ad alto livello;
  - il fattore **4** dipende dall'indirizzamento al byte della memoria nel MIPS



A[0]	0	1	2	3
	4	5	6	7
Offset (A[2])	8	9	10	11
	2^k-4	2^k-3	2^k-2	2^k-1

Array: esempio di lettura

- Sia A un array di N word. Realizziamo l'istruzione C: g = h + A[i]
- Si suppone che:
  - le variabili **g, h, i** siano associate rispettivamente ai registri **`$s1, $s2,`** ed **`$s4`**
  - l'indirizzo del primo elemento dell'array *(base address)* sia contenuto nel registro **`$s3`**
- L'elemento **i-esimo** dell'array si trova nella locazione di memoria di indirizzo **`($s3+ 4*i).`**
- Caricamento dell'indirizzo di A[i] nel registro temporaneo **`$t1:`**

```
muli $t1, $s4, 4        # $t1 ← 4 * i
add $t1, $t1, $s3       # $t1 ← add. of A[i]
                        # that is ($s3 + 4 * i)
```

- Per trasferire A[i] nel registro temporaneo **`$t0:`**

```
lw $t0, 0($t1)          # $t0 ← A[i]
```

- Per sommare h e A[i] e mettere il risultato in g:

```
add $s1, $s2, $t0       # g = h + A[i]
```

Istruzioni aritmetiche vs. load/store

- Le istruzioni aritmetiche leggono il contenuto di due registri (operandi) , eseguono una computazione e scrivono il risultato in un terzo registro (destinazione o risultato)
- Le operazioni di trasferimento dati leggono e scrivono un solo operando senza effettuare nessuna computazione

Sommario

L'ISA ed il linguaggio macchina

L'Assembly

I registri

I tipi di istruzioni: istruzioni aritmetiche

Organizzazione della memoria

Istruzioni di accesso alla memoria.