


Dal sorgente all'eseguibile
I programmi Assembly

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Scienze dell'Informazione
borghese@dsi.unimi.it
Università degli Studi di Milano


Sommario

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
```

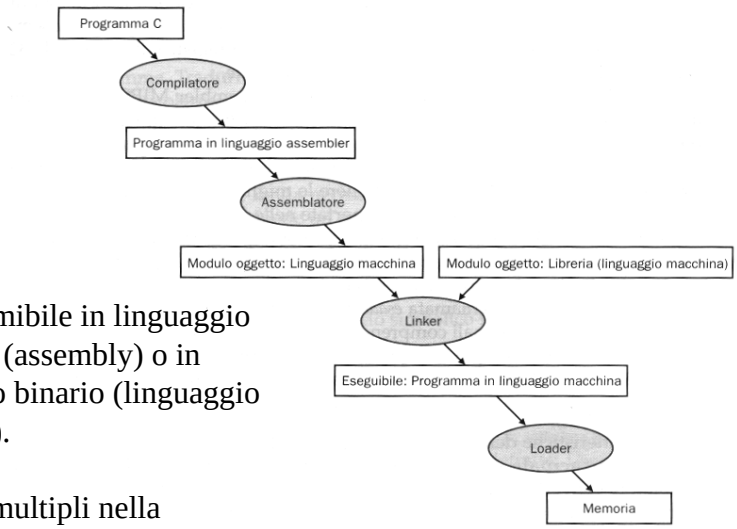

Le istruzioni di un'ISA

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

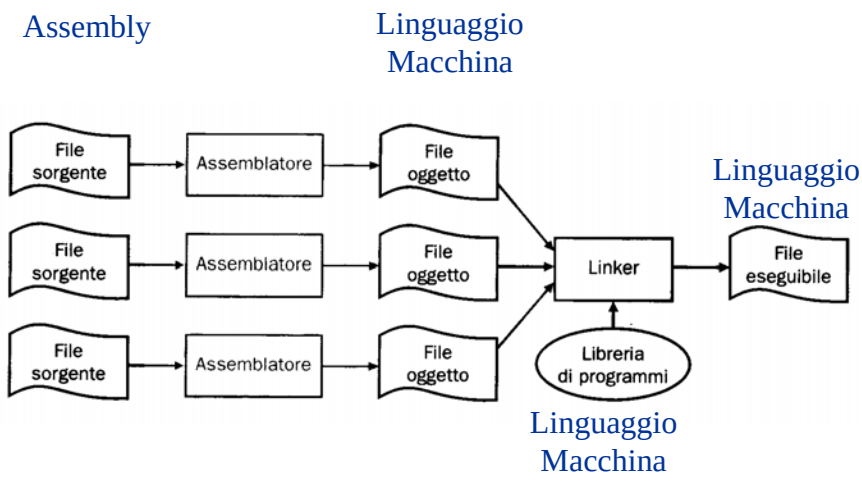
Dai simboli ai numeri binari



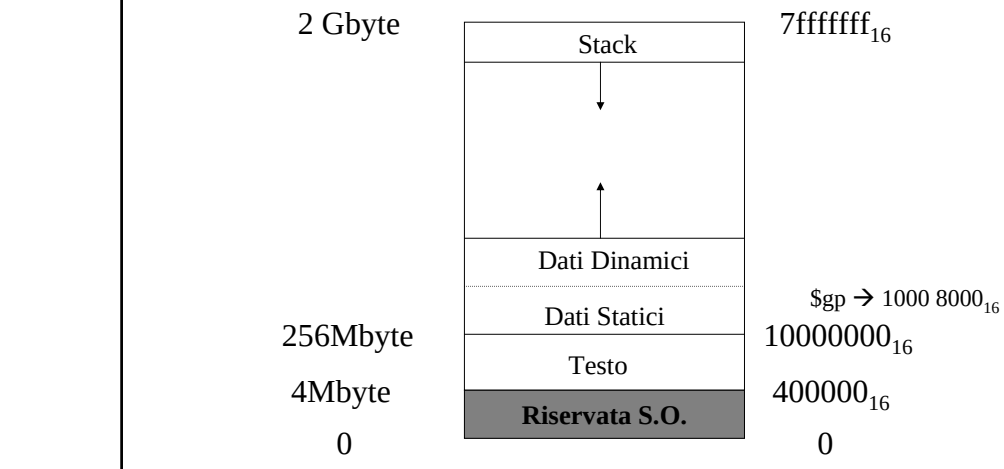
ISA esprimibile in linguaggio simbolico (assembly) o in linguaggio binario (linguaggio macchina).

Passaggi multipli nella traduzione.

Dall'assembly all'eseguibile



Organizzazione logica della memoria



Il compilatore

Dal codice sorgente C all'assembly (dipende dall'ISA dell'HW)

Il numero di linee aumenta notevolmente

Le strutture degli oggetti vengono tradotte in codice che gestisce la memoria riservata all'oggetto (base + offset).

L’assemblatore

Adatta il codice Assembly all’ISA (Assembly) dell’Architettura e quindi codifica in linguaggio macchina.

Esempi di adattamento del codice Assembly:

Sviluppo delle pseudo-istruzioni:

move $t0, $t1 → add $t0, $zero, $t1?

blt (branch on less than) → slt + bne

far branch → branch + jump

Conversione delle costanti da una qualsiasi base in base Hex.

Traduzione in linguaggio macchina (creazione del file oggetto).

Compilatore ed assemblatore possono essere uniti in un un’unica fase.

L’assemblatore: i problemi del file oggetto

L’assemblaggio produce:

- L’insieme delle istruzioni in linguaggio macchina
- I dati statici
- Le informazioni necessarie per inserire le istruzioni in memoria correttamente.

Un file oggetto è così costituito:

- Header. Posizione e dimensione dei vari pezzi che costituiscono il file oggetto.
- Segmento testo. Contiene le istruzioni.
- Segmento dati statici. Contiene i dati relativi al file oggetto.
- Informazione di rilocazione. Identifica istruzioni, etichette e dati che dipendono dall’indirizzo a partire dal quale viene caricato il programma in memoria.
- La tabella dei simboli. Contiene le etichette che non sono definite (ad esempio riferimenti esterni, di altri moduli oggetto o librerie).
- Informazioni di debug. Consente di associare ai costrutti Assembly i costrutti C (la traduzione non è uno a uno).

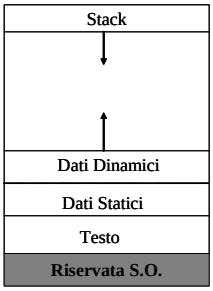
Il linker

Consente di fare ricompilare ed assemblare solo i moduli che vengono modificati.

Il linker è costituito da 3 step:
1. Inserire i moduli di codice ed i dati (statici) e le etichette associate in memoria.
2. Determinare gli indirizzi dei dati e delle etichette.
3. Risolvere le etichette interne ai moduli ed esterne (trovare la corrispondenza).

Nel passo 3, il linker utilizza le informazioni di rilocazione degli oggetti e le tabelle dei simboli.

Quali sono i simboli da risolvere?
- Etichette di salto (branch o jump)
- Indirizzo dei dati (e.g. A[0]).



Dopo avere risolto tutte le etichette (sostituito le corrispondenze), occorre trovare gli indirizzi assoluti associati alle etichette.
Vengono cioè **rilocati** (riposizionati) gli oggetti al loro indirizzo finale.

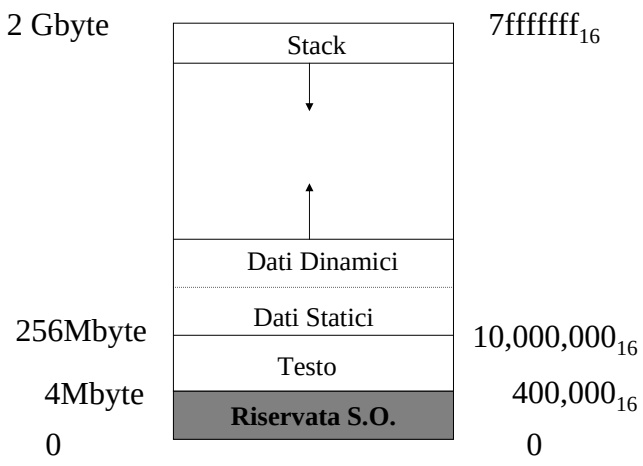
Viene creato il file eseguibile. Ha lo stesso formato del file oggetto ma non ha riferimenti non risolti e gli indirizzi sono assoluti (rilocazione).

Esempio

Object file header			
	Name	Procedure A	
	Text Size	100_{hex} (=256byte)	
	Data Size	20_{hex} (=32 byte)	
Text Segment	Address	Instruction	
	0	lw $a0, 0($gp)	
	4	jal B	
		add $t2, $t1, $t0	
	….	…	
Data Segment	0	(X)	
	…	…	
Relocation info	Address	Instruction type	Dependency
	0	lw	X
	4	jal	B
Symbol table	Label	Address	
	X	--	
	B	--	

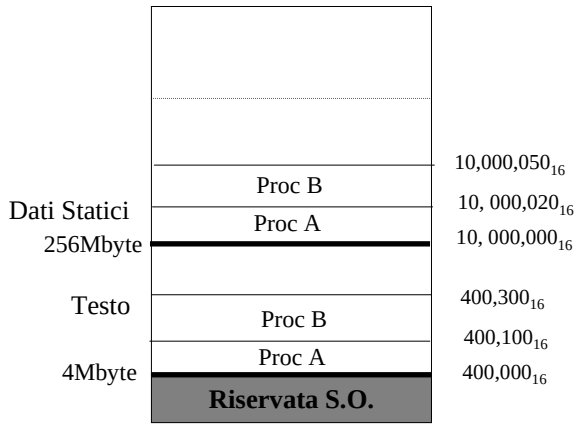
Object file header			
	Name	Procedure B	
	Text Size	200_{hex} (=512byte)	
	Data Size	30_{hex} (=48 byte)	
Text Segment	Address	Instruction	
	0	sw $a1, 0($gp)	
	4	jal A	
	….	…	
Data Segment	0	(Y)	
	…	…	
Relocation info	Address	Instruction type	Dependency
	0	sw	Y
	4	jal	B
Symbol table	Label	Address	
	Y	--	
	A	--	

Organizzazione logica della memoria



Il funzionamento del linker

Per prima cosa vengono posizionate nella posizione desiderata le 2 procedure (A sotto e B sopra): copia delle istruzioni e dei dati.



Calcoli degli indirizzi testo

Segmento testo:

Inizia dopo il segmento riservato al S.O., indirizzo 0x400 000 = 0100 0000 0000 0000 0000 0000 binario = 1x 2^{22} = 4Mbyte.

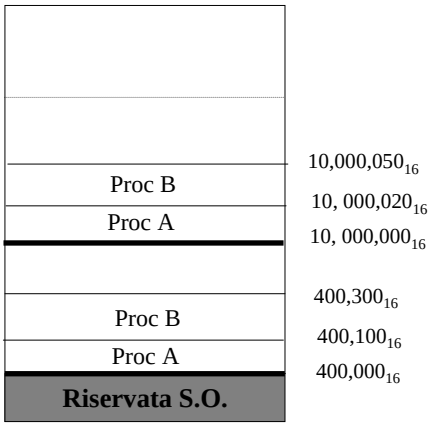
Procedura A. Inizia subito dopo. Indirizzo 0 della procedura è l'indirizzo 0x400 000.

Procedura B. Inizia dopo la procedura A. Indirizzo 0 della procedura B è: 0x400 000 + 0x100 (dimensione della procedura B) = 0x400 100.

Queste osservazioni consentono di sostituire le etichette di salto.

Risoluzione delle etichette sul codice

Executable file header		
	Text Size	300_{hex} (=768byte)
	Data Size	50_{hex} (=80 byte)
Text Segment	Address	Instruction
Proc A	400,000	lw $a0, 0($gp)
	400,004	jal 400,100
	400,008	add $t2, $t1, $t0
	…	…
Proc B	400,100	sw $a1, 0($gp)
	400,104	jal 400,000
	….	…
Data Segment	Address	
	…	(X)
	…	(Y)



Calcoli degli indirizzi sui dati

Segmento dati:

Inizia dopo il segmento riservato ai dati, indirizzo 0x1000 0000 = 0001 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 binario = 1x 2^{28} byte = 256Mbyte.

I dati della procedura A vengono scritti immediatamente sopra i 256 Mbyte. La notazione 0($p) indica che i dati si trovano all'inizio (0) del segmento dati.

Per indirizzarli occorre una procedura in due passi:

- Impostare correttamente il $gp.
- Impostare correttamente l'offset.

Impostazione corretta del $gp

Il $gp deve puntare ad un indirizzo 32kbyte sopra il limite del segmento dati (256Mbyte = 0x1000 0000 byte).

$gp = 0x1000 0000 + 0x8000 = 0x1000 8000 byte.

-0x8000 = 1000 0000 0000 0000 byte = -1x2^{15} byte.

-0x7980 = 1000 0000 0010 0000 byte = -(1x2^{15} – 32) byte.

Impostazione corretta dell'offset

I dati della procedura A possono essere scritti direttamente sopra il segmento testo. L'indirizzo di partenza dei dati, X, è l'indirizzo 256Mbyte.

Dobbiamo esprimere questo indirizzo in termini relativi al $gp:

X = 0x1000 8000 – 0x8000 = 0x1000 0000.

Per leggere il primo dato in memoria opereremo una:
lw $registro, -0x8000($sp).

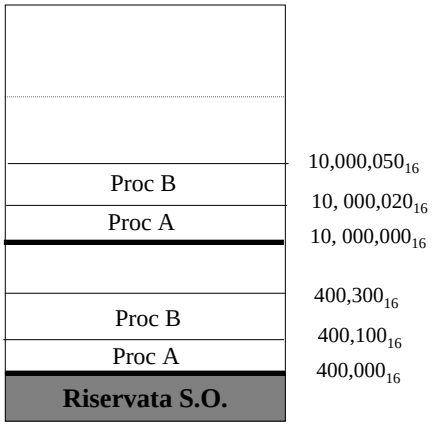
-0x8000 = (su 16 bit) 1000 0000 0000 0000 = -2^{15}, in complemento a 2!!

Risoluzione delle etichette sui dati

Executable file header		
	Text Size	300_{hex} (=768byte)
	Data Size	50_{hex} (=80 byte)
Text Segment	Address	Instruction
Proc A	400,000	lw $a0, 8000($gp)
	400,004	jal 400,100
	400,008	add $t2, $t1, $t0
	…	…
Proc B	400,100	sw $a1, 8020($gp)
	400,104	jal 400,000
	….	…
Data Segment	Address	
	10,000,000	(X)
	10,000,020	(Y)

$gp = $10,008,000_{hex}$ = 256Mbyte + 32Kbyte

256Mbyte = $gp – 32Kbyte → Offset = 8000_{hex}



Il loader

Dalla memoria su disco alla memoria principale (Unix).

• Lettura dello header del file eseguibile per determinare le dimensioni del segmento testo e dati (statici).

• Creazione di uno spazio in memoria sufficientemente ampio per contenere il testo ed i dati.

• Copia delle istruzioni e dei dati da disco alla memoria.

• Copia dei parametri (che devono essere passati al programma) in cima allo stack (abbassamento dello stack).

• Inizializza i registri della macchina.

• Trasferimento del programma ad una procedura (di sistema) che trasferisce i parametri dallo stack ai registri argomento e chiama (salta) alla prima istruzione della procedura main.

• Al termine del programma verrà eseguita una syscall (exit).

Sommario

Dal linguaggio ad alto livello al linguaggio Assembly

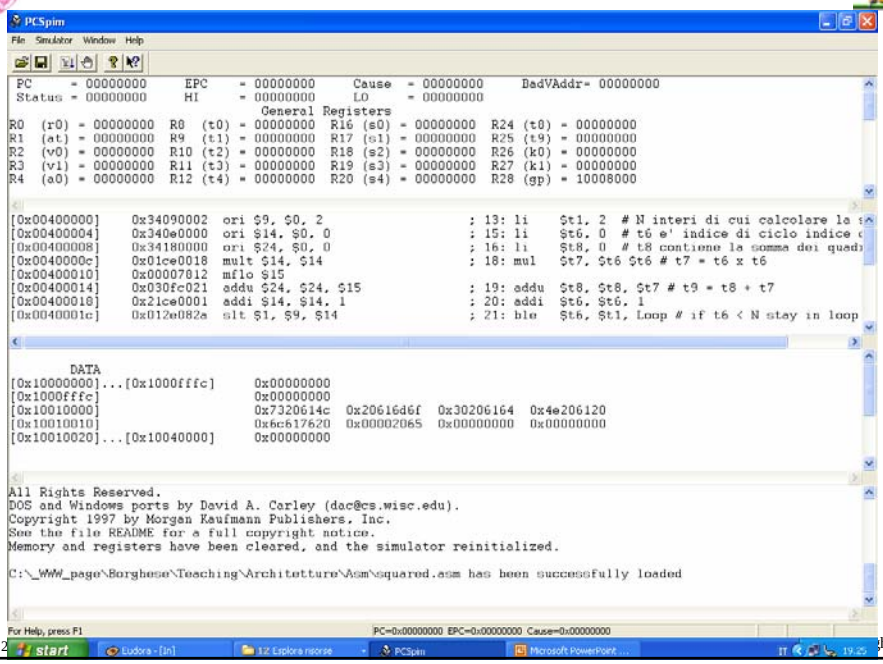
Lo SPIM e gli elementi di un programma Assembly

Esempi di programmi Assembly e le costanti

Il simulatore SPIM del MIPS

- **SPIM: *A* MIPS R2000/R3000 Simulator : PCSPIM version 7.1 scritto da James Larus.**
- http://www.cs.wisc.edu/~larus/spim.html
- Piattaforme:
  - Unix or Linux system
  - Microsoft Windows (Windows 98, NT, 2000, XP)
  - Microsoft DOS

SPIM interface



System call

- **print_int:** stampa sulla console il numero intero che le viene passato come argomento;
- **print_float:** stampa sulla console il numero in virgola mobile con singola precisione che le viene passato come argomento;
- **print_double:** stampa sulla console il numero in virgola mobile con doppia precisione che le viene passato come argomento;
- **print_string:** stampa sulla console la stringa che le è stata passata come argomento terminandola con il carattere **Null**;
- **read_int:** legge una linea in ingresso fino al carattere a capo incluso (i caratteri che seguono il numero sono ignorati);
- **read_float:** leggono una linea in ingresso fino al carattere a capo incluso (i caratteri che seguono il numero sono ignorati);
- **read_double:** leggono una linea in ingresso fino al carattere a capo incluso (i caratteri che seguono il numero sono ignorati);
- **read_string:** legge una stringa di caratteri di lunghezza **$a1** da una linea in ingresso scrivendoli in un buffer **($a0)** e terminando la stringa con il carattere **Null** (se ci sono meno caratteri sulla linea corrente, li legge fino al carattere a capo incluso e termina la stringa con il carattere **Null)**;
- **sbrk** restituisce il puntatore (indirizzo) ad un blocco di memoria;
- **exit** interrompe l'esecuzione di un programma;

System call

- Sono disponibili delle **chiamate di sistema (system call)** predefinite che implementano particolari servizi
  (ad esempio: stampa a video)
- Ogni system call ha:
  - un codice
  - degli argomenti (opzionali)
  - dei valori di ritorno (opzionali)

CodOp	rs	rt	rd	shamt	funct
0	0	0	0	0	0xC
6 bit					6 bit

Il codice della funzione di sistema richiesta è memorizzata nel registro **$v0**

System call

Nome	Codice ($v0)	Argomenti	Risultato
print_int	1	$a0	
print_float	2	$f12	
print_double	3	$f12	
print_string	4	$a0	
read_int	5		$v0
read_float	6		$f0
read_double	7		$f0
read_string	8	$a0,$a1	
sbrk	9	$a0	$v0
exit	10		

•Per richiedere un servizio ad una chiamata di sistema (**`syscall`**) occorre:

–Caricare il **codice** della **`syscall`** nel registro **`$v0`**

–Caricare gli **argomenti** nei registri **`$a0 - $a3`** (oppure nei registri **`$f12 - $f15`** nel caso di valori in virgola mobile)

–Eseguire **`syscall`**

–L'eventuale **valore di ritorno** è caricato nel registro **`$v0 ($f0)`**

Direttive

- Le direttive (data layout directives) danno delle indicazioni all'assemblatore sul contenuto di un file (istruzioni, strutture dati, ecc.)
- Sintatticamente le direttive iniziano tutte con il carattere "."

I segmenti

.data <addr>

Gli elementi successivi sono memorizzati nel segmento dati a partire dall'indirizzo **addr, facoltativo**

.text <addr>

Memorizza gli elementi successivi nel segmento testo dell'utente a partire dall'indirizzo **addr.** (Questi elementi possono essere solo istruzioni o parole).

Direttive per il segmento dati

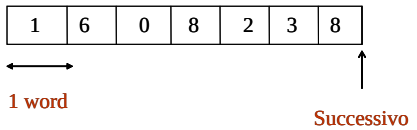
`.byte b1,…,bn`

Memorizza gli **n** valori **`b1, .., bn`** in byte consecutivi di memoria

`.word w1, ..,wn`

Memorizza gli **n** valori su 32-bit **`w1, .., wn`** in parole consecutive di memoria.

`Esempio:.word 1, 6, 0, 8, 2, 3, 8`



`.half h1, ..,hn`

Memorizza gli **n** valori su 16-bit **`h1, .., hn`** in halfword (mezze parole) consecutive di memoria

`.asciiz str`

Memorizza la stringa **`str`** terminandola con il carattere **`Null`** (**`.ascii str`** ha lo stesso effetto, ma non aggiunge alla fine il carattere **`Null`**)

`.space n`

Alloca uno spazio pari ad **n** byte nel segmento dati

Direttive per l'assemblatore

`.globl sym`

Dichiara **`sym`** come etichetta globale (ad essa è possibile fare riferimento da altri file). Tipicamente si utilizza per la procedura main.

`.align n`

Allinea il dato successivo a blocchi di 2^n byte: ad esempio

- **`.align 2 = .word`** allinea alla parola il valore successivo
- **`.align 1 = .half`** allinea alla mezza parola il valore successivo
- **`.align 0`** elimina l'allineamento automatico delle direttive **`.half`, `.word`, `.float`**, e **`.double`** fino a quando compare la successiva direttiva **`.data`**

Rappresentazione di un vettore in memoria

.word + etichetta: esempio

```
array: .word 1, 6, 0, 8, 2, 3, 8
```

1	6	0	8	2	3	8

1 word

⇒ *array rappresenta l'indirizzo del primo elemento*

Sommario

Dal linguaggio ad alto livello al linguaggio Assembly

Lo SPIM e gli elementi di un programma Assembly

Esempi di programmi Assembly

Programma di caricamento di costanti

```
# Somma

.text           #Definizione segmento codice
.globl  main    #Definizione del main

main:
  li $t1,10  # carica il valore decimale 10 nel reg. $t1
  li $t2,15  # carica il valore decimale 15 nel reg. $t2

   add $a0,$t2,$t1   # $a0 ← $t2 + $t1

print_result:
   li  $v0, 1 # stampa risultato (10 + 15 = 25)
   syscall
```


Programma di somma di costanti e variabili

```
# L'accesso immediato è usato anche dalle operazioni
# aritmetiche
   .text              #Definizione segmento codice
   .globl  main

main:
   li  $t1,10        # $t1 ← 10
   addi $a0,$t1,15   # $a0 ← $t1 + 15

# stampa risultato
print_result:
   li  $v0,1
   syscall
```

Programma di stampa

```
#Programma che stampa: la risposta è 5
        .data
str:    .asciiz “la risposta è ”
        .text
        .globl main

Main:
        li $v0, 4           # $v0 ← codice della print_string
        la $a0, str         # $a0 ← indirizzo della stringa
        syscall             # stampa della stringa

        li $v0, 1           # $v0 ← codice della print_integer
        li $a0, 5           # $a0 ← intero da stampare
        syscall             # stampa dell’intero

        li $v0, 10          # $v0 ← codice della exit
        syscall             # esce dal programma
```


Programma di lettura scrittura di numeri

```
#Programma che legge e stampa un intero

        .data
prompt:.asciiz ”Dammi un intero: “

        .text
        .globl main

main:
        li $v0, 4       # $v0 ← codice della print_string
        la $a0, prompt # $a0 ←  indirizzo della stringa
        syscall         # stampa la stringa

        li $v0, 5       # $v0 ← codice della read_int
        syscall         # legge un intero e lo carica in $v0

        li $v0, 10      # $v0 ← codice della exit
        syscall         # esce dal programma
```

Programma che somma i quadrati dei primi N numeri

```
# N e' memorizzato in t1.

.data
str:
        .asciiz "La soma da 0 a N vale "
.text
.globl main

main:

        li      $t1, 7    # N=7, interi di cui calcolare la somma dei quadrati
        li      $t6, 0    # t6 e' indice di ciclo
        li      $t8, 0    # t8 contiene la somma dei quadrati
Loop:
        mul     $t7, $t6 $t6        # t7 = t6 x t6
        addu    $t8, $t8, $t7       # t8 = t8 + t7
        addi    $t6, $t6, 1         # t6++
        blt     $t6, $t1, Loop      # if t6 < N stay in loop

        la      $a0, str
        li      $v0, 4              #print
        syscall

        li      $v0, 1              #print
        add     $a0, $t8, $zero
        syscall

        li $v0, 10                  # $v0 codice della exit
        syscall                     # esce dal programma
```


Utilizzo di costanti

- Spesso le operazioni richiedono l'uso di costanti
  (ad esempio: somma del valore decimale 4 al contenuto di un registro).

- Possibili **3** opzioni:
  - le costanti risiedono in memoria e sono caricate con **`lw`**
  - utilizzo di registri speciali (es: $zero)
  - utilizzo di modalità di **indirizzamento immediato (tipo I).**

Esempi

```
addi $s0, $s0, 4     # $s0 ← $s0 + 4 (sign-extended)
slti $t0, $s2, 10    # $t0 = 1 if $s2 < 10
andi $s0, $s0, 6     # $s0 ← $s0 and 6 (zero-extended)
ori $s0, $s0, 10     # $s0 ← $s0 or 10 (zero-extended)
li $s0, 20           # $s0 ← 20 (pseudo-instruction)
```

- Le istruzioni di tipo I consentono di rappresentare costanti esprimibili in 16 bit.
- I valori immediati sono espressi in assembly in rappresentazione decimale ma possono anche essere esadecimali o binari.

Gestione di costanti su 32-bit

- Le istruzioni di **tipo I** consentono di rappresentare costanti esprimibili in 16 bit (valore massimo 65535 unsigned).
- Se 16 bit non sono sufficienti per rappresentare la costante, l'assemblatore (o il compilatore) deve fare due passi:
  - si utilizza l'istruzione **lui (load upper immediate)** per caricare i 16 bit più significativi della costante nei 16-bit più significativi di un registro. I rimanenti 16-bit meno significativi del registro sono posti a 0.
  - una successiva istruzione, ad esempio, di **ori, andi,...** specifica i rimanenti 16 bit meno significativi della costante.
- Il registro **`$at`** è riservato all'assemblatore per creare costanti su 32-bit (costanti 'lunghe').

Esempio di caricamento costante di 32 bit

Si consideri la costante su 32 bit: C = 0000 0000 0000 0110 0001 1010 1000 0000 = **400,000 in decimale**

lui $zero, $s0, 6 #6 = 0000 0000 0000 0110

valore di **$s0:** 0000 0000 0000 0110 0000 0000 0000 0000 = 6 x 2^{16} = 393,216

addiu $s0, $s0, 6724 # 6724 = 0001 1010 1000 0000

valore di **$s0:** 0000 0000 0011 1101 0001 1010 1000 0000

Si consideri la costante su 32-bit: C = **118345_{10} = 0x1CE49 =**

C = 0000 0000 0000 0001 1100 1110 0100 1001

= 1_{10} **= 52809_{10}**

C = 1 x 2^{16} + 52809 = 118345

Si può rappresentare con la pseudo-istruzione: **li $t1, 118345** **# $t1 ← 118345**

Esempio, programma per il calcolo del fattoriale in C

```
main()
{
        int Fatt, n;
        int i = 0;

        printf("Inserisci un numero intero ");
        scanf("%d", &n);

        Fatt = 1;
        for (i = 1; i<=n; i++)
        {       N = N * i;
        }
        printf("Il fattoriale di ",%d," e'' : ",%d\n",n, Fatt);
        exit(0);
}
```

Esempio, programma per il calcolo del fattoriale in Assembly – parte dichiarativa

```
# Programma che calcola il fattoriale iterativamente
        .data
prompt: .asciiz "Inserisci un numero intero"
output: .ascii "Il fattoriale è:"
        .text
        .globl main
main:
        li $v0, 4           # $v0 ← codice della print_string
        la $a0, prompt      # $a0 ←  indirizzo della stringa
        syscall             # stampa la stringa

        li $v0, 5           # $v0 ← codice della read_int
        syscall             # legge l'intero e lo carica in
$v0
        move $s0, $v0       # Per pulizia, porta l'intero in
                            # un registro di varibili
```


Esempio, fattoriale - calcolo

```
# calcola il fattoriale

        li $t0, 1     # inizializzo $t0 contatore cicli
        li $t1, 1     # inizializzo $t1 accumulatore
                      # che conterrà il risultato n!
loop:
        mul $t1, $t1, $t0   # $t1 ← $t1 * $t0
        addi $t0, $t0, 1    # incremento $t0 contatore cicli
        ble  $t0, $s0, loop # se $t0 ≤ $s0 (≤ n) go to loop
```

Esempio, fattoriale – stampa risultato

```
# stampa il risultato
        move $a0, $v0       # $a0 ← $v0
        li $v0, 1           # $v0 ← codice della print_int
        syscall             # stampa l'intero in input

        li $v0, 4           # $v0 ← codice della print_string
        la $a0, output      # $a0 ←  indirizzo della stringa
        syscall             # stampa la stringa

        li $v0, 1           # $v0 ← codice della print_int
        move $a0, $t1       # $a0 ← n!
        syscall             # stampa n!

        li $v0, 10          # $v0 ← codice della exit
        syscall             # esce dal programma
```


Sommario

Dal linguaggio ad alto livello al linguaggio Assembly

Lo SPIM e gli elementi di un programma Assembly

Esempi di programmi Assembly e le costanti