


Dal sorgente all'eseguibile
I programmi Assembly

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

Riferimenti sul Patterson: Cap. 2.10 + Appendice A, tranne A.7


Sommario

Dal linguaggio ad alto livello al codice in memoria

Lo SPIM e gli elementi di un programma Assembly

Esempi di programmi Assembly: costanti e ricorsione

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
```

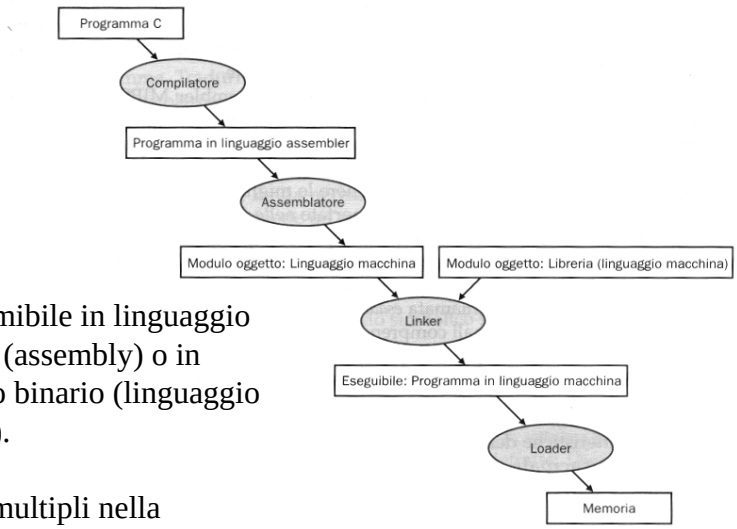

Le istruzioni di un'ISA

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



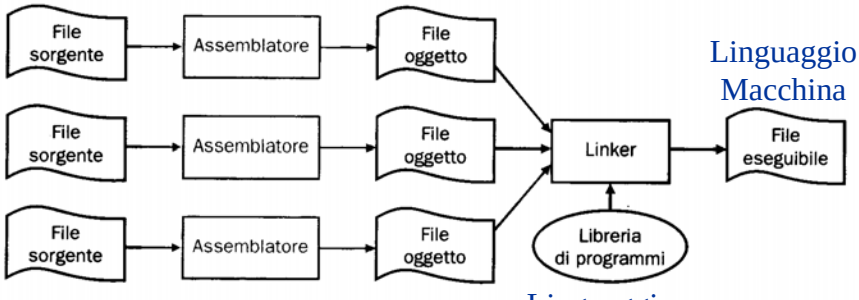
ISA esprimibile in linguaggio simbolico (assembly) o in linguaggio binario (linguaggio macchina).

Passaggi multipli nella traduzione.

Dall'assembly all'eseguibile

Assembly

Linguaggio Macchina



Linguaggio Macchina

Linguaggio Macchina

Compilazione di moduli diversi viene fatta in parallelo

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:

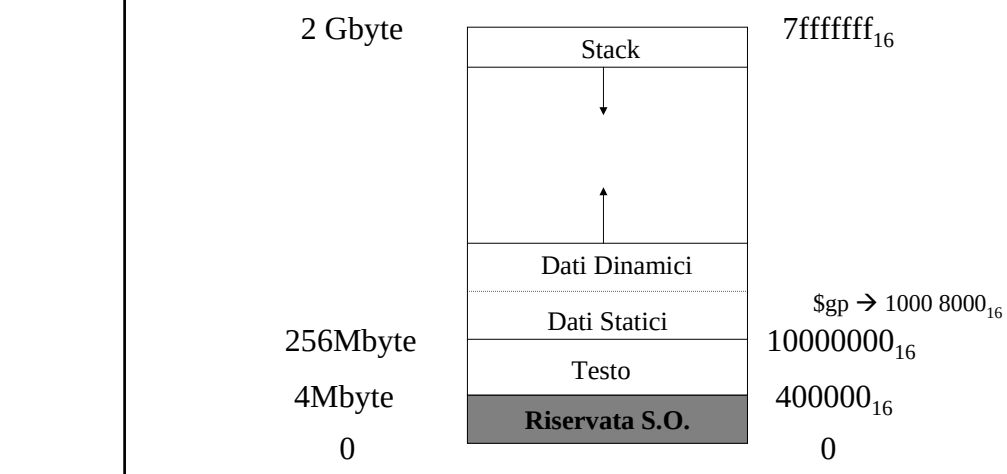
- move $t0, $t1 → add $t0, $zero, $t1?
- blt (branch on less than) → slt + bne
- far branch → branch + jump

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.

Organizzazione logica della memoria



MIPS: Software conventions for Registers

0	zero	constant 0
1	at	reserved for assembler
2	v0	expression evaluation &
3	v1	function results
4	a0	arguments
5	a1	
6	a2	
7	a3	
8	t0	temporary: caller saves
. . .		(callee can clobber)
15	t7	
16	s0	callee saves
. . .		(caller can clobber)
23	s7	
24	t8	temporary (cont'd)
25	t9	
26	k0	reserved for OS kernel
27	k1	
28	gp	Pointer to global area
29	sp	Stack pointer
30	fp	frame pointer (s8)
31	ra	Return Address (HW)

$gp punta a metà del primo segmento dati: da 256,000 kByte a 256,064kByte, cioè all'indirizzo (256,032) Kbyte. Accesso alla memora come ***lw rt, Offset($gp)***.
(NB Offset è espresso in complemento a 2 su 16 bit ed è compreso tra -2^{15} -1 e $+2^{15}$-1).

Impostazione corretta del $gp e dell'offset

La memoria viene letta/scritta con indirizzamento mediante Indirizzo_base + offset
(ad esempio lw $t0, Offset(<Registro_contenente_indirizzo_base>)

Il $gp punta solitamente ad un indirizzo 32kbyte sopra il limite inferiore del segmento dati:

Segmento dati: 256Mbyte = 0x1000 0000 byte.
Offset: 32Kbyte = 0x8000byte

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

Indirizzo della prima posizione in memoria (Mmin = 256Mbyte) riservabile ai dati, espressa in funzione di $gp (base + offset):
Base address: $gp = 0x1000 0000 + 0x8000 = 0x1000 8000 byte.
Offset: -32Kbyte = numero su 16 bit con segno = 0x8000.
Mmin = `0x8000($gp)`

Ogni altro indirizzo può essere facilmente individuato sommando lo spiazzamento relativo a Mmin = 0x1000 0000 e quindi riducendo lo spiazzamenti rispetto a $gp.

Esempio:
Indirizzo 256,000,016 byte => 256,032Kbyte – 32Kbyte + 16byte.
In Hex: 0x1000 0010 = 0x1000 8000 – 0x8000 + 0x10
(la somma viene effettuata modulo 64Kbyte)

L'assemblatore: i 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.

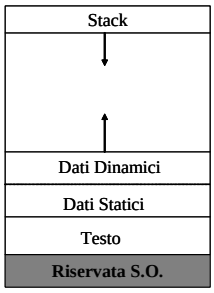
Un file oggetto è così costituito:
- Header. Posizione e dimensione dei vari pezzi che costituiscono il file oggetto.
- Segmento testo. Contiene le istruzioni.
- Segmento dati statici. Contiene i dati relativi al file oggetto.
- Informazione di rilocazione. Identifica istruzioni, etichette e dati che 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 (*Rebuild*).

Il linker è costituito da 3 step:
1. Disporre i moduli di codice ed i dati (statici).
2. Identificare gli indirizzi dei dati e delle isrtuzioni di salto "critiche".
3. Risolvere le etichette interne ai moduli ed esterne (trovare la corrispondenza). Questo passo è equivalente a compilare una tabella di rilocazione.

Nei passi 2 e 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

Analizziamo due procedure:

Proc A

```
0: Proc_A:   lw $a0, 0($gp)
4:           jal B
8:           add $t2, $t1, $t0
             …
```

Proc B

```
0: Proc_B:   sw $a1, 0($gp)
4:           jal A
             …
             …
```

NB In questo caso $gp punta all'inizio dell'area dati

Header Proc A
Text Size 100hex (=256byte)
Data Size 20hex (=32 byte)
…

Header Proc B
Text Size 200hex (=512byte)
Data Size 32hex (=48byte)

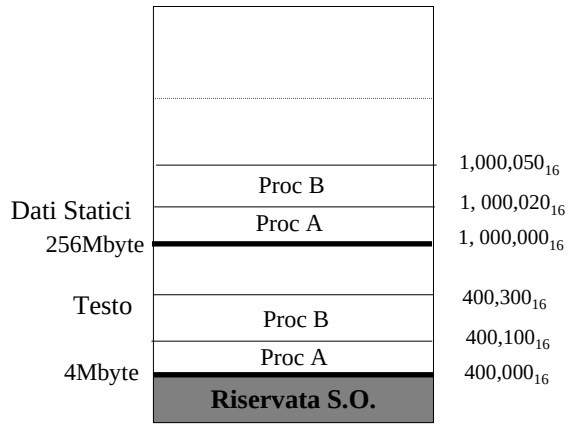
Compilazione

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 Proc_B	
		add $t2, $t1, $t0	
	….	…	
Data Segment	0	(X)	
	…	…	
Relocation info	Address	Instruction type	Dependency
	0	lw	X
	4	jal	Proc_B
Symbol table	Label	Address	
	X	--	
	Proc_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 Proc_A	
	….	…	
Data Segment	0	(Y)	
	…	…	
Relocation info	Address	Instruction type	Dependency
	0	sw	Y
	4	jal	Proc_A
Symbol table	Label	Address	
	Y	--	
	Proc_A	--	

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.

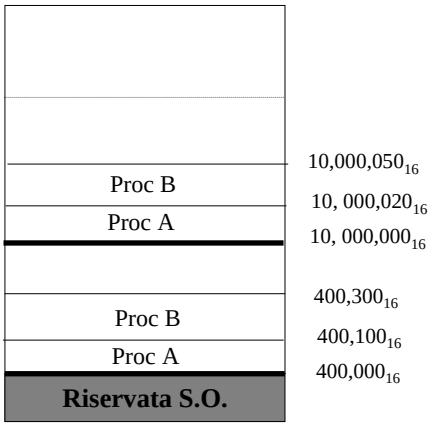
Queste osservazioni consentono di sostituire le etichette di salto a procedura (jal).

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	Data
	0	(X)
	0	(Y)
….	….	….

j, jr si comportano in modo analogo

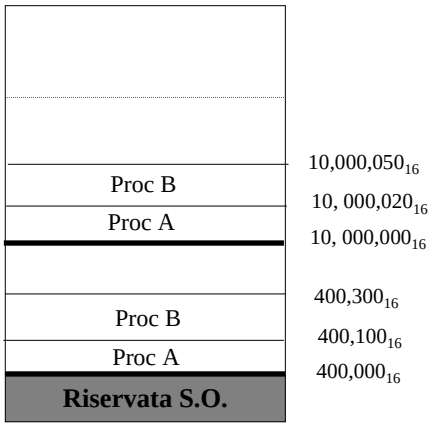
Come si comportano beq e bne?



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
$gp = 0001 0000 0000 0000 0100 0000 0000 0000
Il valore di $gp è comune a tutti i moduli.



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. In questa fase agli indirizzi assoluti dell'eseguibile viene aggiunto l'offset assegnato ai segmenti dati e testo per la presenza di altri programmi in esecuzione in 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).

I problemi del linker

Viene creato un unico file eseguibile che contiene:

- Le funzioni di libreria vengono inserite all'interno dell'eseguibile.
- Tutte i moduli "linkati" vengono inseriti.

Il file eseguibile diventa molto grosso (static link).

Soluzione DLL (dynamic link).

Sommario

Dal linguaggio ad alto livello al codice in memoria

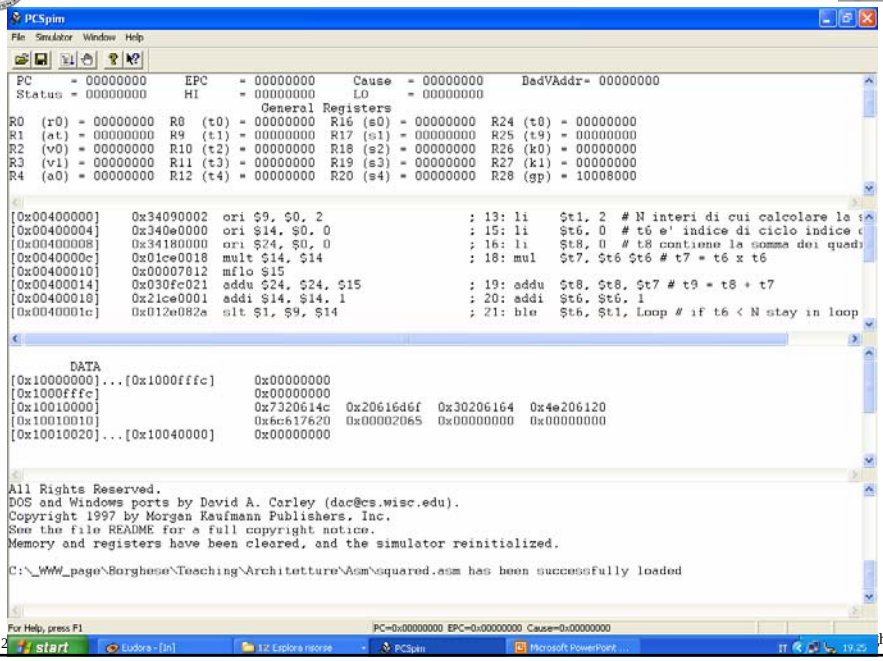
Lo SPIM e gli elementi di un programma Assembly

Esempi di programmi Assembly: costanti e ricorsione

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

- 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 memorizzato **sempre** nel registro **$v0.**
Le syscall hanno tutte la stessa stringa in linguaggio macchina; il sistema operativo capisce cosa deve fare dal valore di $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)`**

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;

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 (`.data`)

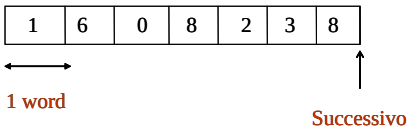
`.byte b1,…,bn`

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`**)

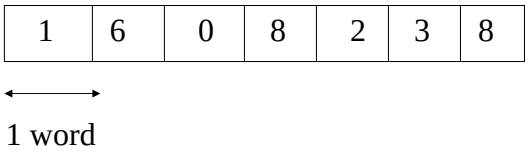
`.space n`

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

Rappresentazione di un vettore in memoria

Etichetta + tipo
array + .word

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



⇒ ***array rappresenta l'indirizzo del primo elemento***

Per indirizzare gli elementi dell'array utilizzo l'istruzione:
`la $t0, array` #Carico in $t0 l'indirizzo di array[0]

Allineamento dei dati (`.data`)

`.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`**

Direttive per il segmento testo (.text)

`.globl sym`

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

I simboli costituiscono delle etichette. Esempio:

0x400000 Proc_A:

e associano ad un indirizzo numerico (della memoria) un codice siumbolico.

Sommario

Dal linguaggio ad alto livello al linguaggio Assembly

Lo SPIM e gli elementi di un programma Assembly

Esempi di programmi Assembly: costanti e ricorsione

Procedure ricorsive

- Procedure che contengono una chiamata a se stesse al loro interno => il codice della procedura viene riutilizzato più volte, ogni volta con parametri diversi.

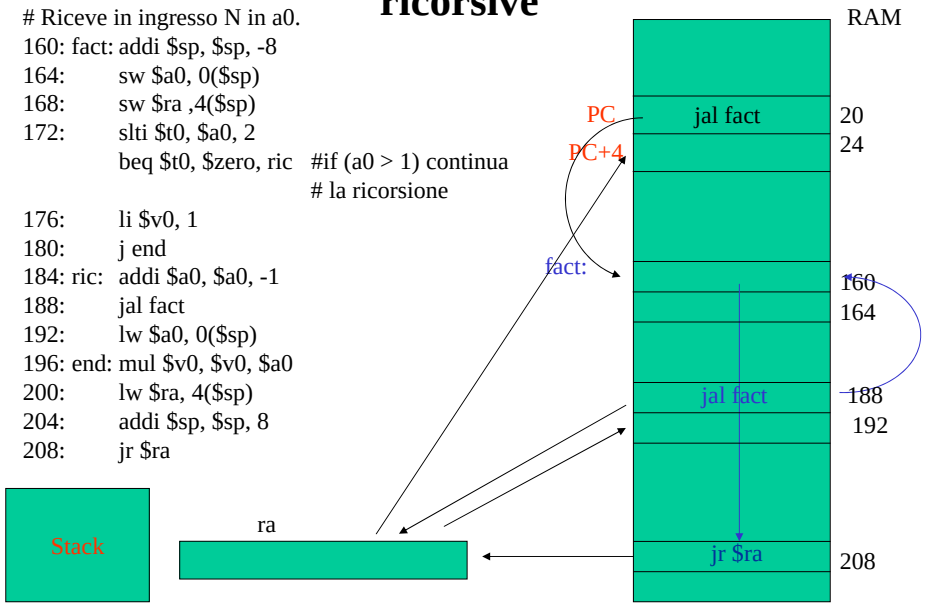
Calcolo del fattoriale di un numero intero

```
main(int argc, char *argv[])
{
    int n;
    printf(”Inserire un numero intero\n");
    scanf("%d", &n);
    printf(”Fattoriale: %d\n", fact(n));
}

int fact(int m)
{
  if (m <= 1)
    return(1);
  else
    return(m*fact(m-1));
}
```

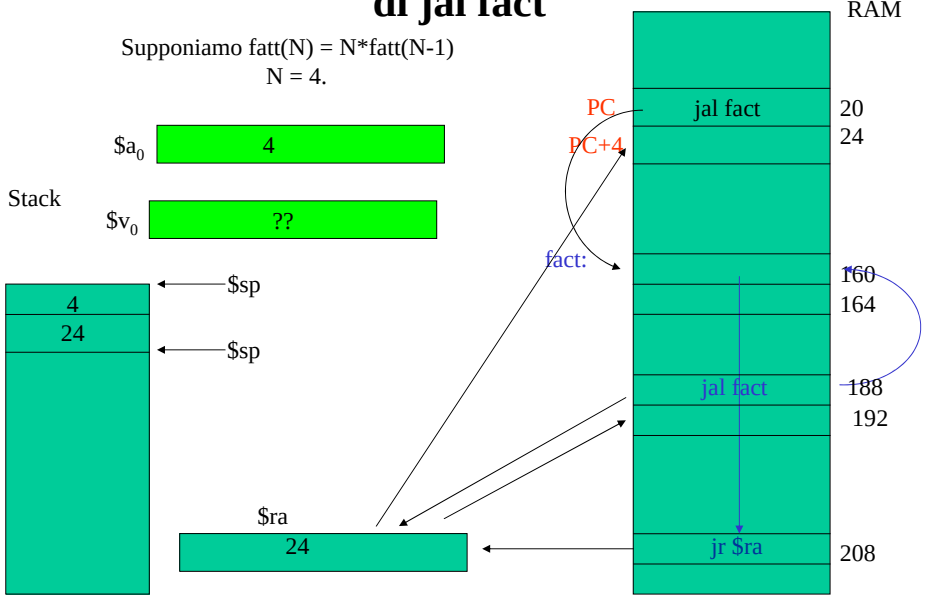
Strutture interessate dalle procedure ricorsive

```
# Riceve in ingresso N in a0.
160: fact: addi $sp, $sp, -8
164:       sw $a0, 0($sp)
168:       sw $ra ,4($sp)
172:       slti $t0, $a0, 2
           beq $t0, $zero, ric   #if (a0 > 1) continua
                                 # la ricorsione
176:       li $v0, 1
180:       j end
184: ric:  addi $a0, $a0, -1
188:       jal fact
192:       lw $a0, 0($sp)
196: end:  mul $v0, $v0, $a0
200:       lw $ra, 4($sp)
204:       addi $sp, $sp, 8
208:       jr $ra
```

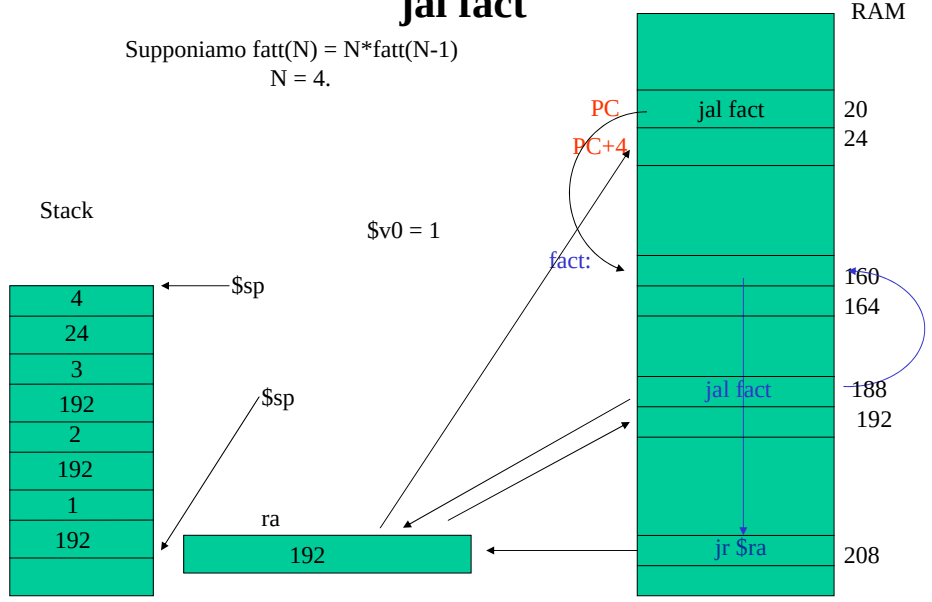


Contenuto subito dopo la prima chiamata di jal fact

Supponiamo fatt(N) = N*fatt(N-1)
N = 4.



Contenuto subito dopo l'ultima chiamata di jal fact



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 – 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
```


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:
        mult    $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
```

Sommario

Dal linguaggio ad alto livello al linguaggio Assembly

Lo SPIM e gli elementi di un programma Assembly

Esempi di programmi Assembly: costanti e ricorsione